



วารสารวิทยาศาสตร์ ลาดกระบัง

e-ISSN : 2539-7257 (Online)

ปีที่ 33 ฉบับที่ 2
กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

เกี่ยวกับวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เกิดขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2532 เป็นต้นมา เป็นวารสารที่เผยแพร่บทความวิจัยและบทความทางวิชาการ ซึ่งได้จัดทำเป็นวารสารอิเล็กทรอนิกส์ (ออนไลน์) Online e-ISSN: 2539-7257 ออกเผยแพร่ 2 ฉบับต่อปี (ฉบับที่ 1 ในเดือนมกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 ในเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม) โดยกำหนดจำนวนบทความที่เผยแพร่ 10 บทความต่อฉบับ (เริ่มต้นในวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 31 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2565)

วัตถุประสงค์

เพื่อเผยแพร่ความรู้ความก้าวหน้าทางวิชาการและการวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาวิชาเคมี สาขาวิชาชีววิทยา สาขาวิชาฟิสิกส์ สาขาวิชาคณิตศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ และ สาขาวิชาสถิติ

ขอบเขตเนื้อหาบทความวิจัยและบทความทางวิชาการที่ทางวารสารรับเผยแพร่

- เคมี เคมีประยุกต์ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
- ชีววิทยาและเทคโนโลยีชีวภาพ
- ฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับวัสดุศาสตร์ ฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับนาโนสเกล ฟิสิกส์ไอโอที ฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับแสงและโฟโตนิกส์
- สถิติ การวิจัยดำเนินงาน คณิตศาสตร์บริสุทธิ์และประยุกต์
- ปัญญาประดิษฐ์ วิทยาการข้อมูล และการประยุกต์ใช้และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการประเมินบทความ

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง เป็นวารสารที่มีระบบการพิจารณาของกระบวนการประเมินบทความ Peer Review บทความทุกบทความต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่เชี่ยวชาญเป็นผู้ประเมินบทความ (Peer Reviewers) ทั้งหมด 3 ท่าน (ต่างกันในส่วน)

หน่วยงาน) โดยที่ผู้ประเมินและผู้แต่งไม่ทราบข้อมูลรายละเอียดชื่อและหน่วยงานกันและกัน (Double-Blind Peer Review) และไม่ได้สังกัดหน่วยงานเดียวกัน

กำหนดการออกเผยแพร่วารสาร

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง มีกำหนดการออกเผยแพร่ 2 ฉบับต่อปี
ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน
ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม-ธันวาคม

ประเภทบทความที่รับเผยแพร่

- บทความวิจัย (Research Article)
- บทความวิชาการ (Academic Article)

ภาษาในบทความที่รับออกเผยแพร่

ภาษาไทย (บทความย่อเขียนเป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ)

ค่าใช้จ่ายในการตีพิมพ์

ไม่มีค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์บทความ โดยไม่มีการเรียกเก็บค่าธรรมเนียมในการส่งและการตีพิมพ์บทความทางวิชาการบทความทางวิชาการที่เผยแพร่แล้วสามารถดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ของวารสารโดยไม่มีค่าธรรมเนียม

ผู้สนับสนุนวารสาร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

แหล่งสนับสนุนวารสาร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลิขสิทธิ์

ลิขสิทธิ์บทความทั้งหมดเป็นของวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กองบรรณาธิการ

ที่ปรึกษาวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.ดุชนิ ธนะบริพัฒน์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูดีไพจิตร

คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

หัวหน้ากองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา กัมปาน

ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.เกตุ กรุดพันธ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย

ศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา ธารีบุญ

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศไทย

ศาสตราจารย์ พลเรือตรีหญิงยุวดี เปรมวิชัย

วิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

ศาสตราจารย์ ดร.ชิตชนก เหลือสินทรัพย์

ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.ชวงค์ เอื้อสุขอารี

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข

ภาควิชาพฤษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว

หัวหน้าศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.วราฤทธิ์ พานิชกิจโกศลกุล

ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ สิทธิเถกิงเกียรติ

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.ไกรศักดิ์ เกษร

ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยนเรศวร ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.ปานไพลิน สีหาราช

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.สรัญญา พันธุ์พฤษ

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎ์ ศรีนวลจันทร์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรภัทร์ หยกรัตนศักดิ์

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

อาจารย์สุจิตรา สุขนธมัต

ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษฎา บุศรา

ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

ผู้ประสานงานวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

นายพนพล รวีเจริญฤทธิกุล

ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

สำนักงานวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

งานจัดทำวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

ส่วนสนับสนุนวิชาการ อาคารวิทยาศาสตร์ 1 (Sc01) คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-329-8400-11 ต่อ 268

สารบัญ (Table of Contents)

	หน้า (Page)
» อโครมาติกอินเด็กซ์ของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ (บทความวิจัย) Achromatic Index of Unitary Addition Cayley Graph (Research Article) รุ่งโรจน์ วงษ์แก้ว ปกรณ์ พูลสมบัติ งามเจ็ด ด่านพัฒนามงคล และ เดชา สมณะ* Rungroj Wongkeao Pakorn Poolsombut Ngarmcherd Danpattanamongkon and Decha Samana*.....	1
» การดูดซับสีอย่างรวดเร็วยโดยใช้ผงถ่านคาร์บอนที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จากมะพร้าวในพื้นที่ตำบลบางตลาด จังหวัดฉะเชิงเทรา (บทความวิจัย) Rapid Aqueous Dye Adsorption Using Carbon Powder Derived from Agricultural Waste of Coconut in Bangtalad Sub-district, Chachoengsao Province (Research Article) พิไลพร หนูทองคำ และ ประสพพร จุลบุตร* Pilaipon Nuthongkum and Prasoppon Junlabhut*.....	18
» การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเมตาฮีริสติก สำหรับปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทาง ทรัพยากร (บทความวิจัย) Comparison of Metaheuristic Methods for Solving Constrained Problems (Research Article) ศุภลักษณ์ ใจเรือง ชัชพล เกษวิริยะกิจ ลักขณา ฤกษ์เกษม* และ ภาสุระ อังกุลานนท์ Supalux Jaiyeng Chatchaphon Ketviriyakit Lakkana Ruekkasaem* and Pasura Aungkulanon.....	36

- » มอนต์มอริลโลไนต์-อัลจิเนตเจลสำหรับการดูดซับและการคายการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51 (บทความวิจัย)
Montmorillonite-Alginate Gel for Basic Red 51 Adsorption and Desorption (Research Article)

ดวงดาว พันอัน ปภาวรินทร์ เรืองฤทธิ์ ศักดิ์สิทธิ์ ชื่นชมเนกจาด และ ดวงรัตน์ ทองคำ*
Duongdaw Pun-on Papawarin Ruangrit Saksit Chuenchomnakjad and Duangrat Thongkum*.....59

- » การจัดกลุ่มพฤติกรรมการเปิดรับข้อมูลข่าวสารความต้องการรัฐสวัสดิการของผู้สูงอายุในประเทศไทย (บทความวิจัย)
Clustering Information Exposure Behavior the Welfare State Needs Among Older Adults in Thailand (Research Article)

อานิษา ราศรี* วุฒิชัย เขยชม ปวีณ์สุดา ฉิมพาลี และ ณัชชา กุลจิราธนโชติ
Arnisa Rasri* Wuttichai Choeichom Paweesuda Chimpalee and Natcha Kunjiratanachot.....77

- » ลักษณะของมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียน (บทความวิจัย)
Characteristics of Mozzarella Cheese Supplemented with Durian Pulp (Research Article)

สุมภา เทิดขวัญชัย น้อมจิตต์ สุธีบุตร ชญาภัทร์ กี่อารีโย นพพร สกุลงยั้งสุข ชาวลิต อุปฐาก และ ธนภพ โสทรโยม*
Sumapar Thedkwanchai Nomjit Suteebut Chayapat Keeariyo Nopporn Sakulyunyongsuk Chaowalit Auppathak and Thanapop Soteyome*.....90

- » การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความแม่นยำของการจำลองอัตราการไหลน้ำท่า (บทความวิจัย)
Comparison of Precision Coefficients for Streamflow Data Simulation (Research Article)

นพรัตน์ เตชะพันธ์รัตนกุล พงศ์พันธ์ กาญจนการุณ* และ ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์
Noparat Techapunratanakul Pongpan Kanjanakaroon* and Chaiwat Ekkawatpanit
.....104

- » การเปรียบเทียบการแทนค่าสูญหายสำหรับปัญหาการขนส่งแบบสมดุล (บทความวิจัย)
A Comparison of the Imputation Methods for Balanced Transportation Problems (Research Article)
อัญญา กองโกย และ กัลยา บุญหล้า*
Unna Kongkoy and Kanlaya Boonlha*124

- » ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบลอยตัวไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงอยู่กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากขานอ้อย (บทความวิจัย)
Floating Photocatalyst based on Titanium Dioxide Immobilized on Carboxymethyl Cellulose Hydrogel from Bagasse (Research Article)
ปรัชญา วาทะสิทธิ์ วงเดือน ไม้สนธิ์ และ วियาร์ตน์ กุมุทานา*
Prachya Watasit Wongduan Maison and Wiyarat Kumutanat*138

- » การวิเคราะห์ปัจจัยในทฤษฎีรวมของการยอมรับและการใช้เทคโนโลยี รุ่น บทความ2 :
อิทธิพลการกำกับกับการยอมรับและการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (บทความวิจัย)
Factors Analysis of Unified Theory of Acceptance and Use of Technology Version 2: Influence on the Regulation of Acceptance and Use of Vending Machines (Research Article)
อภิญา อิงอาจ* และ สุพจน์ อิงอาจ
Apinya Ingard* and Supot Ingard.....161

อโครมาติกอินเดกซ์ของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ Achromatic Index of Unitary Addition Cayley Graph

รุ่งโรจน์ วงษ์แก้ว ปกรณ์ พูลสมบัติ งามเชิด ด่านพัฒนามงคล และ เดชา สมณะ*

Rungroj Wongkeao Pakorn Poolsombut Ngarmcherd Danpattanamongkon and Decha Samana*

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพฯ ประเทศไทย

Department of Mathematics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 2 พฤษภาคม 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 28 มิถุนายน 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 30 มิถุนายน 2567

Received: 2 May 2024, Revised: 28 June 2024, Accepted: 30 June 2024

บทคัดย่อ

สำหรับจำนวนเต็มบวก $n > 1$ ยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ $G_n = Cay^+(\mathbb{Z}_n, U_n)$ คือกราฟที่มี \mathbb{Z}_n เซตของจุดยอด และถ้าให้ $U_n = \{a \in \mathbb{Z}_n : \gcd(a, n) = 1\}$, \mathbb{Z}_n เป็นจำนวนเต็มมอดุโล n แล้วจุดยอด a, b ประชิดกันก็ต่อเมื่อ $a + b \in U_n$ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษายูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ $G_n = Cay^+(\mathbb{Z}_n, U_n)$ และหาขอบเขตล่างกับขอบเขตบนของอโครมาติกอินเดกซ์ของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มคู่ อีกทั้งได้พัฒนาขอบเขตของอโครมาติกอินเดกซ์ของกราฟ G_n เมื่อ $n = 2^k$ โดยที่ k เป็นจำนวนนับ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้พบว่ายูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ G_n เป็นกราฟสองส่วนบริบูรณ์ $K_{2^{k-1}, 2^{k-1}}$ เมื่อ $n = 2^k$

คำสำคัญ : ยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ อโครมาติกอินเดกซ์ การระบายสีสมบูรณ์

Abstract

For a positive integer $n > 1$, the unitary addition Cayley Graph $G_n = Cay^+(\mathbb{Z}_n, U_n)$ is the graph whose vertex set is \mathbb{Z}_n and if $U_n = \{a \in \mathbb{Z}_n : \gcd(a, n) = 1\}$, \mathbb{Z}_n the integers modulo n then two vertices a, b are adjacent if and only if $a + b \in U_n$. In this research,

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: decha.sa@kmitl.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.263249>

we study about the unitary addition Cayley graphs, $G_n = \text{Cay}^+(\mathbb{Z}_n, U_n)$, and to find the lower bound and upper bound of achromatic index of unitary addition Cayley graph where n is even and we improve the bound of achromatic index of graph G_n when $n = 2^k$, k is the positive integer. Moreover, we found that the unitary addition Cayley graph G_n is the complete bipartite graph $K_{2^{k-1}, 2^{k-1}}$ for $n = 2^k$.

Keywords: unitary addition Cayley graph, Achromatic index, Complete coloring

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีกราฟกันอย่างแพร่หลายและได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น ปัญหาการเล่นเกม ปัญหาการจัดสรรทรัพยากร การหาเส้นทางที่สั้นที่สุด และการประยุกต์ใช้สำหรับวงจรไฟฟ้า เป็นต้น

จุดเริ่มต้นของการตั้งปัญหาสี่สี (Four color problem) [1-3] เริ่มขึ้นในปี ค.ศ.1852 Francis Guthrie [4] ได้ตั้งและเสนอปัญหาเพื่อหาความเป็นไปได้ที่สามารถใช้สีเพียง 4 สีในการใช้ระบายแผนที่โดยที่ประเทศที่มีชายแดนติดกันจะต้องมีสีที่แตกต่างกัน กับ Augustus De Morgan ทำให้ปัญหานี้ได้ขยายไปสู่กลุ่มคนทั่วไปที่สนใจและนักคณิตศาสตร์ ซึ่งต่อในปี ค.ศ. 1878 Cayley [5] ได้เขียนเกี่ยวกับปัญหานี้ และได้ส่งเผยแพร่ในหัวข้อ “on the colouring of maps” จนกระทั่งในปี ค.ศ.1976 Appel และ Haken [6] ได้ค้นพบคำตอบของปัญหา 4 สีนี้ ซึ่งทั้งสองได้แสดงให้เห็นว่าสามารถแบ่งปัญหานี้ออกได้เป็นเกือบ 2,000 กรณี ซึ่งได้แบ่งตามจำนวนของการจัดเรียงประเทศในแผนที่และการระบายสีของการจัดเรียงนั้น ถูกพบวิธีที่เป็นไปได้หลายแบบ พวกเขาได้นำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยและหลังจากคอมพิวเตอร์ใช้เวลาคำนวณไปกว่า 1,200 ชั่วโมง จึงสรุปได้ว่าคำตอบที่ได้นั้นเป็นจริง แต่ทว่านักคณิตศาสตร์อีกหลายคนที่ยังไม่ยอมรับและยังมีข้อสงสัยในวิธีการพิสูจน์นี้อยู่ ดังนั้นจึงได้กำเนิดปัญหาใหม่ขึ้นมาว่าจะสามารถใช้การพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียว โดยจะไม่มีการใช้คอมพิวเตอร์ได้หรือไม่ และเพราะเหตุนี้จึงได้มีบทนิยามของจำนวนโครมาติกขึ้น นั่นคือจำนวนสีที่น้อยที่สุดที่สามารถระบายจุดยอดของกราฟ G โดยที่จุดยอดที่ประชิดกันจะระบายสีแตกต่างกัน และใช้สัญลักษณ์ $X(G)$

ในปี ค.ศ.1965 Vizing [7] ได้นิยามเกี่ยวกับการระบายสีเส้นเชื่อม โครมาติกอินเดกซ์ของกราฟ G และใช้สัญลักษณ์ $X'(G)$ แทนโครมาติกอินเดกซ์ โดยได้พบว่า $\Delta \leq X'(G) \leq \Delta + 1$ ต่อมาในปี ค.ศ.1973 Beineke และ Wilson [8] ได้ศึกษาวิธีต่าง ๆ ในการสร้างกราฟ G ที่มีโครมาติกอินเดกซ์ $X'(G) = \Delta + 1$

ในเวลาต่อมาปี ค.ศ.1967 Harary และคณะ [9] ได้กำหนดนิยาม k -การระบายสีสมบูรณ์ (Complete k -coloring) และนิยามจำนวนเต็ม k ที่มากที่สุดที่สามารถระบายสี k -สมบูรณ์ให้กับจุดยอด

ของกราฟ G ว่า จำนวนโครมาติก (Achromatic number) โดยใช้สัญลักษณ์ $\psi(G)$ และได้ศึกษาขอบเขตของจำนวนโครมาติกบนความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของกราฟ G ได้แก่ จำนวนเส้น จำนวนโครมาติก จำนวนอิสระ (Independence number) จำนวนปก (Covering number) และจำนวนโครมาติกของส่วนเติมเต็มของกราฟ G โดยทางผู้วิจัยมีความสนใจทั้งการระบายสีสมบูรณ์ จำนวนโครมาติก จำนวนโครมาติกอินเด็กส์ และลักษณะเชิงกราฟของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ จึงได้ศึกษาและค้นคว้าเพิ่มพบว่า ในปี ค.ศ.1878 Cayley [10] ได้นิยามและนำเสนอกราฟที่สร้างจากเซตก่อกำเนิด (Generating set) และความสัมพันธ์บนกรุป จากนั้นได้มีนักวิจัยอีกหลายท่านได้ขยายแนวคิดในการสร้างกราฟและศึกษาสมบัติพร้อมทั้งพิจารณาลักษณะเชิงกราฟของกราฟที่ขยายมาจากเคย์เลย์กราฟ อาทิเช่น ในปี ค.ศ.2007 Klotz และ Sander [11] ได้ศึกษาสมบัติบางประการและจำนวนโครมาติกของยูนิทารีเคย์เลย์กราฟ (unitary Cayley graph) เขียนแทนด้วย $Cay^-(\mathbb{Z}_n, U_n)$ หรือ X_n สำหรับจำนวนเต็มบวก n โดยที่ $n > 1$

ในปี ค.ศ.2011 Sinha. และคณะ [12] ได้ศึกษาสมบัติของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ (unitary addition Cayley graph) เขียนแทนด้วย $Cay^+(\mathbb{Z}_n, U_n)$ หรือ G_n โดยที่ n เป็นจำนวนเต็มบวกและ $n > 1$ และได้ลักษณะเชิงระนาบของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ ต่อมาในปี ค.ศ.2017 Momrit และ Promsakon [13] ได้ค่าจริงและขอบเขตของจำนวนโครมาติกของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้หาขอบเขตบนและขอบเขตล่างของโครมาติกอินเด็กส์ของยูนิทารีแอดดิเคย์เลย์กราฟ G_n และลักษณะโครงสร้างของกราฟนี้

2. วิธีการทดลอง

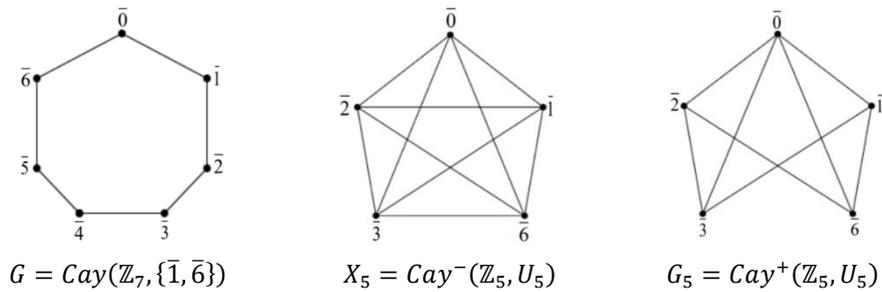
บทนิยามและทฤษฎีบทที่จะกล่าวในหัวข้อนี้ ส่วนแรกจะให้บทนิยามที่จะช่วยจำแนกและศึกษาสมบัติของลักษณะโครงสร้างของเคย์เลย์กราฟในแต่ละแบบ รวมถึงการหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟด้วยฟังก์ชันออยเลอร์-ฟี (Euler-phi function) ส่วนต่อมาจะแสดงบทนิยามและยกตัวอย่างการระบายสีให้จุดยอดหรือเส้นเชื่อมของกราฟที่มีเงื่อนไขของการระบายสีที่แตกต่างกัน ได้แก่ การระบายสี การระบายสีสมบูรณ์ จำนวนโครมาติก จำนวนโครมาติก โครมาติกอินเด็กส์ และโครมาติกอินเด็กส์ เพื่อช่วยให้จำแนกการระบายสีและนำไปศึกษาสมบัติและพิสูจน์ทฤษฎีบทต่าง ๆ ในหัวข้อต่อไป

2.1 กราฟและการระบายสีจุดยอด (Graph and vertex coloring)

ในหัวข้อนี้ จะให้บทนิยามเกี่ยวกับกราฟและประเภทของกราฟที่น่าสนใจและการระบายสีจุดยอดเบื้องต้น ส่วนบทนิยามเกี่ยวกับประเภทของกราฟและส่วนอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ผู้อ่านสามารถศึกษาเพิ่มในหนังสือของ West [14] ซึ่งในงานวิจัยนี้ เราจะพิจารณาเฉพาะกราฟเชิงเดียว (Simple graph)

$G = (V(G), E(G))$ ที่ $V(G)$ แทนเซตของจำนวนจุดยอด และ $E(G)$ แทนเซตของจำนวนเส้นเชื่อม ซึ่ง *ระดับชั้น* (Degree) ของจุดยอด v ในกราฟ G คือ จำนวนเส้นเชื่อมที่มี v เป็นจุดปลาย เขียนแทนด้วย $d_G(v)$ หรือ $d(v)$ ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของระดับชั้นของจุดยอดทั้งหมดในกราฟ G เขียนแทนด้วย $\Delta(G)$ และ $\delta(G)$ ตามลำดับ กราฟ G เรียกว่า *กราฟปกติ* (Regular graph) ถ้ากราฟ G มีระดับชั้นต่ำสุดเท่ากับระดับชั้นสูงสุด นั่นคือ $\Delta(G) = \delta(G)$ ถ้ากราฟปกติ G มี $\Delta(G) = \delta(G) = r$ แล้ว กราฟปกติ G เรียกอีกแบบว่า *r -กราฟปกติ* (r -regular graph) ต่อจากนี้จะเป็นบทนิยาม ทฤษฎีบท และตัวอย่างของเคย์เลย์กราฟ กราฟขยายจากเคย์เลย์กราฟ และฟังก์ชันออยเลอร์-ฟี

บทนิยาม 2.1 *เคย์เลย์กราฟ* (Cayley graph) [10] ให้ Γ เป็นกรุปจำกัด และให้ $S \subset \Gamma$ โดยที่ $e \notin S$ และ $S = S^{-1}$ *เคย์เลย์กราฟ* $G = \text{Cay}(\Gamma, S)$ คือ กราฟที่มีจุดยอดเป็นสมาชิกในกรุป Γ และเซตของเส้นเชื่อมคือ $E = \{g, gs\} : g \in \Gamma, s \in S\}$



รูปที่ 1. ตัวอย่างของเคย์เลย์กราฟ ยูนิทารีเคย์เลย์กราฟ และยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ

จากบทนิยาม 2.1 สามารถสร้างเคย์เลย์กราฟแบบต่าง ๆ ได้ เมื่อกำหนดกรุปย่อย S และกรุปจำกัด Γ โดยที่ $S \subset \Gamma$ เช่น ถ้ากำหนดให้ Γ แทนด้วย \mathbb{Z}_n (จำนวนเต็มมอดุโล n) และ S แทนด้วย U_n แล้วจะได้เคย์เลย์กราฟในบทนิยาม 2.2 และ 2.3 แต่กราฟที่ได้นั้นก็มีความแตกต่างกัน เมื่อกำหนดเซตของเส้นเชื่อมของเคย์เลย์กราฟที่ต่างกัน ดังรูปที่ 1

บทนิยาม 2.2 *ยูนิทารีเคย์เลย์กราฟ* [13] เขียนแทนด้วย $X_n = \text{Cay}^-(\mathbb{Z}_n, U_n)$ และ $U_n = \{a \in \mathbb{Z}_n : \gcd(a, n) = 1\}$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มมากกว่า 1 โดยที่ $V(X_n) = \mathbb{Z}_n$ และ $E(X_n) = \{(a, b) : a, b \in \mathbb{Z}_n, a - b \in U_n\}$

บทนิยาม 2.3 *ยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ* [12] เขียนแทนด้วย $G_n = \text{Cay}^+(\mathbb{Z}_n, U_n)$ ที่ $U_n = \{a \in \mathbb{Z}_n : \gcd(a, n) = 1\}$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มมากกว่า 1 โดยที่ $V(G_n) = \mathbb{Z}_n$ และ $E(G_n) = \{(a, b) : a, b \in \mathbb{Z}_n, a + b \in U_n\}$

บทนิยาม 2.4 ให้ $\phi(n)$ เป็นจำนวนสมาชิกในระบบส่วนตค่างลดทอนมอดุโล n นั่นคือ $\phi(n)$ เท่ากับจำนวนของจำนวนเต็มบวกที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ n และเป็นจำนวนเฉพาะสัมพัทธ์กับ n จะเห็นว่า $\phi(n)$ สามารถหาค่าได้ทุกค่าของจำนวนเต็มบวก n และเรียกว่า ฟังก์ชันออยเลอร์-ฟี [15]

ทฤษฎีบท 2.5 สำหรับจำนวนเต็มบวก n ใด ๆ และ n เป็นจำนวนเฉพาะก็ต่อเมื่อ $\phi(n) = n - 1$ [15]

ทฤษฎีบท 2.6 ให้ $n = p_1^{a_1} p_2^{a_2} \dots p_i^{a_i}$ เมื่อ p_i เป็นจำนวนเฉพาะที่ต่างกัน และ a_i เป็นจำนวนเต็มบวก จะได้ว่า $\phi(n) = \prod_{i=1}^k (p_i^{a_i} - p_i^{a_i-1}) = n \prod_{i=1}^k \left(1 - \frac{1}{p_i}\right)$ [15]

ในปี ค.ศ. 2011 Sinha และคณะ [12] ได้ศึกษาสมบัติหลายประการเกี่ยวกับยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ทฤษฎีบท 2.7 ให้ v เป็นจุดยอดใด ๆ ของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ G_n แล้วจะได้ว่า

$$\deg(v) = d(v) = \begin{cases} \phi(n) & \text{ถ้า } n \text{ เป็นจำนวนคู่} \\ \phi(n) & \text{ถ้า } n \text{ เป็นจำนวนคี่และ } (v, n) \neq 1 \\ \phi(n) - 1 & \text{ถ้า } n \text{ เป็นจำนวนคี่และ } (v, n) = 1 \end{cases}$$

$$|E(G_n)| = \begin{cases} \frac{\phi(n) \times n}{2} & \text{ถ้า } n \text{ เป็นจำนวนคู่} \\ \frac{\phi(n) \times (n-1)}{2} & \text{ถ้า } n \text{ เป็นจำนวนคี่} \end{cases}$$

นอกจากนี้ได้จำแนกลักษณะเชิงกราฟของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ ดังนี้

1. ถ้า n เป็นจำนวนคู่แล้ว $\phi(n) - 1$ – กราฟปกติ
2. ถ้า n เป็นจำนวนคี่แล้ว $(\phi(n), \phi(n) - 1)$ – กราฟกึ่งปกติ
3. สำหรับทุก n ที่เป็นจำนวนเต็มคู่ หรือ $n = 3$ จะได้ว่ากราฟ G_n เป็นกราฟสองส่วน

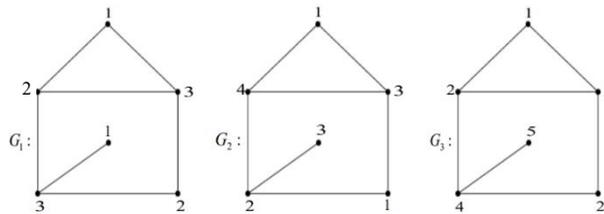
การระบายสีกราฟ ได้มีผู้ศึกษาและนิยามหลายแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้วิจัยและเป้าหมายของงานวิจัย เช่น เกียรติสุดา นาคประสิทธิ์ [16] ได้นิยามว่า “ถ้ากราฟ G สามารถแบ่งกันเซตของจุดยอดออกเป็นเซตอิสระ (Independent set) นั่นคือ จุดยอดสองจุดใด ๆ ในเซตนี้ไม่ประชิดกัน เป็นจำนวน k เซต V_1, V_2, \dots, V_k แล้วจะกล่าวว่า G สามารถระบายสี k สี (k -colorable) และเรียกเซตทั้ง k เซตว่า คลาสของสี (Color classes) จำนวนเต็มบวก k ที่น้อยที่สุดซึ่ง G สามารถระบายสี k สีได้เรียกว่า *รงคเลข* (Chromatic number) ของ G เขียนแทนด้วย $\chi(G)$ ” เป็นต้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนิยามการระบายสีกราฟตามอ้างอิงใน [9] เพื่อต้องการนิยามและนำเสนอจำนวนโครมาติกและอโครมาติกอินเด็กส์ของกราฟ

บทนิยาม 2.8 การระบายสีจุดยอด (Vertex coloring) คือ การกำหนดสีให้กับจุดยอดของกราฟ โดยจุดยอดสองจุดที่ประชิดกัน จะต้องระบายสีที่แตกต่างกัน ถ้าการระบายสีจุดยอดทั้งหมดของ G ใช้ k สี

แล้วจะเรียกว่า k -การระบายสี (k -coloring of graph G) ของ G และกล่าวว่า G เป็น k -การระบายสีสมบูรณ์ (Complete k -coloring) ถ้าการระบายสีจุดยอดของ G ใช้ k สีและทุกสองสีใด ๆ จะมีเส้นเชื่อมอย่างน้อยหนึ่งเส้น (คูสี) แล้ว $X(G)$ คือ จำนวน k สีที่น้อยที่สุดที่สามารถระบายจุดยอดของกราฟ G (นั่นคือ จำนวนเต็ม k ที่น้อยที่สุดใน k -การระบายสีของ G) แต่ถ้า k เป็นจำนวนเต็มมากที่สุดที่ทำให้การระบายสีจุดยอดของ G เป็น k -การระบายสีสมบูรณ์ แล้วจะเรียกจำนวน k ว่า จำนวนวโครมาติก และเขียนแทนด้วย $\psi(G)$

หมายเหตุ ในการกำหนดสีจะใช้ตัวเลขแทนสีต่าง ๆ ที่ระบายให้กับจุดยอดหรือเส้นเชื่อมดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 2.9 กำหนดให้กราฟ G_1 , G_2 และ G_3 สมสัณฐาน (Isomorphic) กัน สามารถระบายสีจุดยอดของแต่ละกราฟ เป็น k -การระบายสีสมบูรณ์ ได้จำนวน k แตกต่างกันได้ แสดงในรูปที่ 2

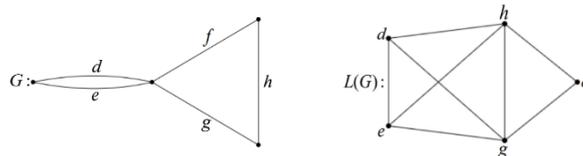


รูปที่ 2. k -การระบายสีสมบูรณ์ของกราฟ G_1 , G_2 และ G_3 (เมื่อ $k = 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ)

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่า กราฟ G_3 ระบายสีจุดยอดใช้ 5 สี แต่มีบางคูสีไม่มีเส้นเชื่อมหากัน (จุดยอดสี 1 และจุดยอดสี 4 ไม่ประชิดกัน) จึงไม่เป็นการระบายสีสมบูรณ์ แต่กราฟ G_1 และ G_2 เป็นการระบายสีสมบูรณ์ เพราะสีทุกสีนั้นประชิดกันจนครบจำนวนสี และจำนวนสีมากที่สุด คือ 4 ดังนั้น $\psi(G) = 4$

2.2 กราฟเส้นและการระบายสีเส้นเชื่อม (Line graph and edge coloring)

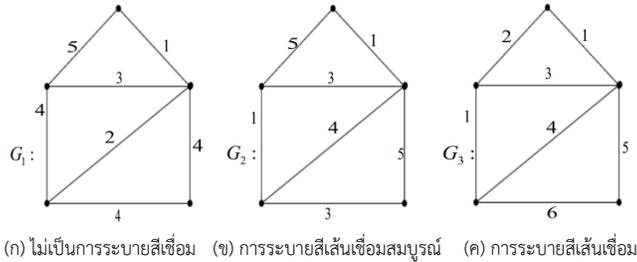
บทนิยาม 2.10 กราฟเส้น (Line graph) ของกราฟ G เขียนแทนด้วย $L(G)$ คือ กราฟซึ่ง $uv \in E(L(G))$ เมื่อ u และ v คือเป็นจุดยอดที่ประชิดกันบนกราฟ G [14] ตัวอย่างดังรูปที่ 3



รูปที่ 3. กราฟ G และกราฟเส้นของกราฟ G

บทนิยาม 2.11 การระบายสีเส้นเชื่อม (Edge coloring) คือ การกำหนดสีให้กับเส้นเชื่อมของกราฟ โดยเส้นเชื่อมสองเส้นที่ตกกระทบจุดยอดเดียวกัน จะต้องระบายสีแตกต่างกัน ถ้าการระบายสีเส้นเชื่อมทั้งหมดของ G ใช้ q สี แล้วจะเรียกว่า q -การระบายสีเส้นเชื่อม (q -edge coloring of graph G) ของ G และกล่าวว่า G เป็น q -การระบายสีเส้นเชื่อมสมบูรณ์ (Complete q -edge coloring) ถ้าการระบายสีเส้นเชื่อมของ G ใช้ q สีและทุกสองสีใด ๆ ที่ระบายให้กับเส้นเชื่อมของ G มีจุดยอดอย่างน้อยหนึ่งจุดที่ตกกระทบร่วมกันแล้ว โครมาติกอินเด็กซ์ $\chi'(G)$ คือ จำนวน q สีที่น้อยที่สุดที่สามารถระบายสีเส้นเชื่อมของกราฟ G ได้ ในทางกลับกันถ้า q เป็นจำนวนเต็มที่มากที่สุดที่ทำให้การระบายสีเส้นเชื่อมของ G เป็น q -การระบายสีเส้นเชื่อมสมบูรณ์ แล้วจะเรียกจำนวน q ว่า โครมาติกอินเด็กซ์ และเขียนแทนด้วย $\psi'(G)$

ตัวอย่าง 2.12 กำหนดให้กราฟ G_1, G_2 และ G_3 ที่ซึ่งสมมูลกัน และได้กำหนดสีให้เส้นเชื่อมของแต่ละกราฟ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4. ตัวอย่างการกำหนดสีให้กับเส้นเชื่อมของกราฟ G_1, G_2 และ G_3 โดยที่ G_1, G_2 และ G_3 สมมูลกัน

จากรูปที่ 4(ค) พบว่าเส้นเชื่อมของกราฟ G_3 ถูกระบายสีทั้งหมด 6 สี โดยที่เส้นเชื่อมที่ตกกระทบกับจุดยอดเดียวกันระบายสีต่างกัน แต่มีสองสีที่ระบายสีเส้นเชื่อมโดยที่ไม่มีจุดยอดตกกระทบร่วมกัน (นั่นคือสี 2 กับ สี 4 หรือ สี 3 กับ สี 6) ดังนั้นการกำหนดสีเส้นเชื่อมกราฟ G_3 จึงเป็นการระบายสีเส้นเชื่อม (6-การระบายสีเส้นเชื่อม) แต่ไม่เป็นการระบายสีเส้นเชื่อมสมบูรณ์ ส่วนการกำหนดสีให้กับเส้นเชื่อมของกราฟ G_2 รูปที่ 4(ข) พบว่าเป็นการระบายสีเส้นเชื่อมสมบูรณ์ (5-การระบายสีเส้นเชื่อมสมบูรณ์) และไม่สามารถระบายสีเส้นเชื่อมมากกว่า 5 สีได้ (5 เป็นจำนวนที่มากที่สุด) ดังนั้น โครมาติกอินเด็กซ์ของกราฟ G_2 เท่ากับ 5 ($\psi'(G_2) = 5$) และการกำหนดสีเส้นเชื่อมของกราฟ G_1 ในรูปที่ 4(ก) ไม่เป็นการระบายสีเส้นเชื่อมเพราะมีเส้นเชื่อมที่ถูกระบายสีเดียวกันแต่ตกกระทบจุดยอดร่วมกัน คือ เส้นเชื่อมที่ระบายสี 4

ในการหาขอบเขตของโครมาติกอินเด็กซ์ของกราฟ G_n ในหัวข้อถัดไป ผู้วิจัยจะนำทฤษฎีบทนี้เพื่อช่วยในการหาค่าขอบเขตและพัฒนาขอบเขตของโครมาติกอินเด็กซ์ของกราฟ G_n

ทฤษฎีบท 2.13 ถ้า G เป็นกราฟเชิงเดียวแล้ว $\Delta(G) \leq X'(G) \leq \Delta(G) + 1$ [7]

ทฤษฎีบท 2.14 ให้ $K_{m,n}$ เป็นกราฟสองส่วนบริบูรณ์ จะได้ว่า $L(K_{m,n})$ มีจำนวนจุดยอดเท่ากับ mn และแต่ละจุดยอดจะมีดีกรีเท่ากับ $m + n - 2$ และกราฟ $L(K_{m,n})$ สมสัณฐานกับกราฟ $K_m \times K_n$ [18]

ทฤษฎีบท 2.15 ถ้า G เป็นกราฟเชิงเดียวที่สามารถระบายสีสมบูรณ์ได้ k สี แล้วเส้นเชื่อมของกราฟ G จะมีอย่างน้อย $k(k - 1)/2$ เส้น นั่นคือ $\psi(G) \leq \sqrt{2|E(G)|} + 1$ [9]

ทฤษฎีบท 2.16 สำหรับ $t \geq 2$ จะได้ว่า [19]

1. ถ้า $\left[2t^2 - \frac{t}{2}\right] \leq m \leq \left[2t^2 + \frac{3}{2}t - 1\right]$ แล้ว $\psi'(K_{m,n}) \leq t(2m - t - 1) + 1$
2. ถ้า $\left[2t^2 + \frac{3}{2}t\right] \leq m \leq \left[2(t + 1)^2 - \frac{1}{2}(t + 1) - 1\right]$ แล้ว $\psi'(K_{m,n}) \leq \frac{m^2}{t+1}$

ทฤษฎีบท 2.17 ให้ $m \geq 4$ จะได้ว่า $\psi(K_m \times K_n) \geq \begin{cases} m + n - 1 & \text{เมื่อ } m = n \\ 2n - \left\lfloor \frac{n}{m-1} \right\rfloor & \text{เมื่อ } m \neq n \end{cases}$ [20]

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

วิธีการดำเนินงานและผลวิจัยจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งจะศึกษาเงื่อนไขลักษณะเชิงกราฟที่ทำให้ยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟมีลักษณะเป็นกราฟสองส่วนบริบูรณ์และหาขอบเขตของอโครมาติกอินเด็กซ์ของกราฟ G_n อีกทั้งได้พัฒนาขอบเขตบนและขอบเขตล่างของอโครมาติกอินเด็กซ์ของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ G_{2^k} ในส่วนที่สองผู้วิจัยได้สรุปผลวิจัยที่ทำให้ลักษณะเชิงกราฟของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟเป็นกราฟสองส่วนบริบูรณ์ และได้วิเคราะห์ผลขอบเขตบนและขอบเขตล่างของอโครมาติกอินเด็กซ์ยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟเทียบกับผลของขอบเขตของอโครมาติกอินเด็กซ์ของบางยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่

3.1 ลักษณะเชิงกราฟและขอบเขตของอโครมาติกอินเด็กซ์ของกราฟ G_n

จากการศึกษาข้อสังเกตลักษณะเชิงกราฟของ G_n พบว่า กราฟ G_n มีลักษณะเป็นกราฟสองส่วนและกราฟปกติ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มคู่ ที่มีเซตของจุดยอดแบ่งออกเป็นสองส่วนและดีกรีแต่ละจุดยอดมีจำนวนเท่ากัน นั่นก็คือ $V(G_n) = V_1(G_n) \cup V_2(G_n)$ โดยที่ $|V_1(G_n)| = |V_2(G_n)| = \frac{n}{2}$ (ดังตัวอย่าง 3.2) นอกจากนั้น ถ้า $n = 2^k$ เมื่อ k เป็นจำนวนนับแล้วกราฟ G_n จะเป็นกราฟสองส่วนบริบูรณ์ โดยได้พิสูจน์

ในทฤษฎีบท 3.1 (ดังตัวอย่าง 3.3) และได้หาขอบเขตล่างโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโครมาติกและจำนวนโครมาติก ส่วนการหาขอบเขตบนได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโครมาติกและโครมาติกอินเด็กซ์ของกราฟเส้น

ทฤษฎีบท 3.1 กราฟ G_n จะเป็นกราฟสองส่วนที่มีดีกรีแต่ละจุดยอดเท่ากับ $\phi(n)$ และ n เป็นจำนวนเต็มคู่ ถ้า $n = 2^k$ แล้ว G_n จะเป็นกราฟสองส่วนบริบูรณ์

บทพิสูจน์ ให้ $G_n = Cay^+\{\mathbb{Z}_n, U_n\}$ โดยที่ n เป็นจำนวนเต็มคู่ จากทฤษฎีบท 2.7 ทำให้ได้ว่า G_n เป็น $\phi(n)$ -กราฟปกติและกราฟสองส่วน ในกรณี $n = 2^k$ เราจะพิจารณาแยกออกเป็น 3 กรณี โดยที่ให้ $a, b \in V(G_n)$ นั่นคือ $a, b \in \mathbb{Z}_n$

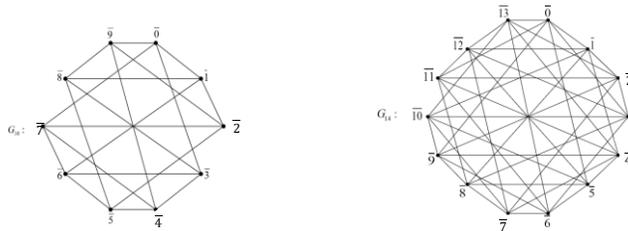
กรณี 1 ให้ a และ b เป็นจำนวนเต็มคู่ จะได้ว่า $a = 2m$ และ $b = 2t$ สำหรับบางจำนวนเต็ม m, t ทำให้ได้ว่า $a + b = 2m + 2t = 2(m + t)$ จะเห็นได้ว่า 2 เป็นตัวประกอบของ $a + b$ นั่นคือ $\gcd(a + b, 2^k) = \gcd(2(m + t), 2^k) \neq 1$ เพราะฉะนั้นจะไม่มีเส้นเชื่อมระหว่างจุดยอด a และ b

กรณี 2 ให้ a และ b เป็นจำนวนเต็มคี่ จะได้ว่า $a = 2m + 1$ และ $b = 2t + 1$ สำหรับบางจำนวนเต็ม m, t ทำให้ได้ว่า $a + b = 2m + 2t + 2 = 2(m + t + 1)$ จะเห็นได้ว่า 2 เป็นตัวประกอบของ $a + b$ นั่นคือ $\gcd(a + b, 2^k) = \gcd(2(m + t + 1), 2^k) \neq 1$ เพราะฉะนั้นจะไม่มีเส้นเชื่อมระหว่างจุดยอด a กับจุดยอด b

กรณี 3 ให้ a เป็นจำนวนเต็มคู่ และ b เป็นจำนวนเต็มคี่ จะได้ว่า $a = 2m$ และ $b = 2t + 1$ สำหรับบางจำนวนเต็ม m, t ทำให้ได้ว่า $a + b = 2m + 2t + 1$ จะเห็นได้ว่า 2 ไม่เป็นตัวประกอบของ $a + b$ นั่นคือ $\gcd(a + b, 2^k) = \gcd(2m + 2t + 1, 2^k) = 1$ เพราะฉะนั้น จะเกิดเส้นเชื่อมระหว่างจุดยอด a กับจุดยอด b เมื่อพิจารณาจุดยอดใด ๆ ในกราฟ G_{2^k} และใช้ทฤษฎีบท 2.7 จะเห็นได้ว่า $\phi(2^k) = 2^k - 2^{k-1} = 2^{k-1}(2 - 1) = 2^{k-1}$ จึงสรุปได้ว่า G_{2^k} จะเป็นกราฟสองส่วนบริบูรณ์ $K_{2^{k-1}, 2^{k-1}}$

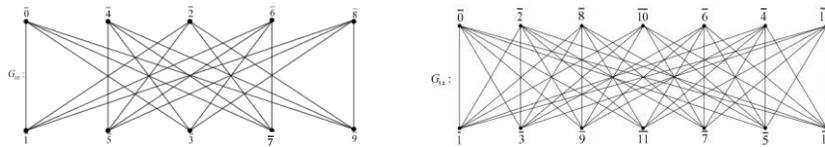
□

ตัวอย่าง 3.2 พิจารณากราฟ $G_{10} = Cay^+\{\mathbb{Z}_{10}, U_{10}\}$ และ $G_{14} = Cay^+\{\mathbb{Z}_{14}, U_{14}\}$ ซึ่งสามารถวาดได้ดังรูปที่ 5

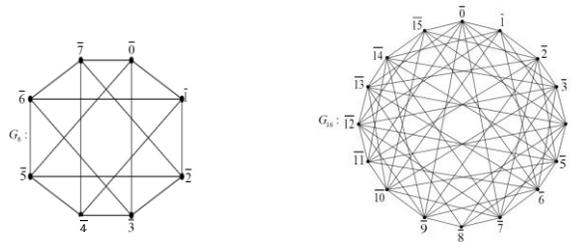


รูปที่ 5. กราฟ G_{10} และกราฟ G_{14}

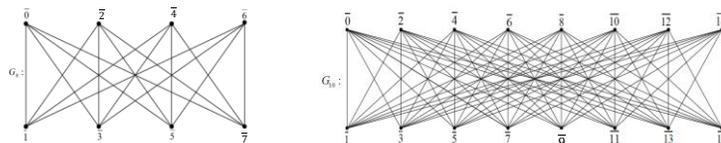
จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าลักษณะเชิงกราฟของ G_{10} และ G_{14} เป็น 4-กราฟปกติและ 6-กราฟปกติตามลำดับ และพิจารณา G_{10} และ G_{14} ให้เป็นกราฟสองส่วนได้ โดยแบ่งเซตของจุดยอดออกเป็น 2 เซตย่อย โดยที่สมาชิกในเซตย่อยเดียวกันจะไม่มีเส้นเชื่อมไปหากัน คือ $V_1(G_{10}) = \{\bar{0}, \bar{4}, \bar{2}, \bar{6}, \bar{8}\}$, $V_2(G_{10}) = \{\bar{1}, \bar{5}, \bar{3}, \bar{7}, \bar{9}\}$ และ $V_1(G_{14}) = \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{8}, \bar{10}, \bar{6}, \bar{4}, \bar{12}\}$, $V_2(G_{14}) = \{\bar{1}, \bar{3}, \bar{9}, \bar{11}, \bar{7}, \bar{5}, \bar{13}\}$ ได้ดังรูปที่ 6

รูปที่ 6. กราฟ G_{10} และกราฟ G_{14} เป็นกราฟสองส่วน

ตัวอย่าง 3.3 พิจารณากราฟ $G_8 = Cay^+\{\mathbb{Z}_8, U_8\}$ และ $G_{16} = Cay^+\{\mathbb{Z}_{16}, U_{16}\}$ ซึ่งสามารถวาดกราฟได้ดังรูปที่ 7

รูปที่ 7. กราฟ G_8 และกราฟ G_{16}

จากรูปที่ 7 สามารถพิจารณา G_8 และ G_{16} ให้เป็นกราฟสองส่วนบริบูรณ์ได้ โดยแบ่งเซตของจุดยอดของแต่ละกราฟออกเป็น 2 เซตย่อยดังนี้ $V_1(G_8) = \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}, \bar{6}\}$, $V_2(G_8) = \{\bar{1}, \bar{3}, \bar{5}, \bar{7}\}$ และ $V_1(G_{16}) = \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}, \bar{6}, \bar{8}, \bar{10}, \bar{12}, \bar{14}\}$, $V_2(G_{16}) = \{\bar{1}, \bar{3}, \bar{5}, \bar{7}, \bar{9}, \bar{11}, \bar{13}, \bar{15}\}$ ตามลำดับ

รูปที่ 8. กราฟ G_8 และกราฟ G_{16} เป็นกราฟสองส่วนบริบูรณ์

ทฤษฎีบท 3.4 ให้ n เป็นจำนวนเต็มคู่ และ $n = p_1^{k_1} p_2^{k_2} \dots p_q^{k_q}$ โดยที่ p_i เป็นจำนวนเฉพาะ และ k_i เป็นจำนวนเต็มบวก จะได้ว่า $\psi'(G_n) \geq \prod_{i=1}^q (p_i^{k_i} - p_i^{k_i-1})$

บทพิสูจน์ ให้ $G_n = \text{Cay}^+\{\mathbb{Z}_n, U_n\}$ โดยที่ n เป็นจำนวนเต็มคู่ จากทฤษฎีบท 2.13 ทฤษฎีบท 2.7 ทำให้ได้ว่า $\psi'(G_n) \geq \chi'(G_n) \geq \Delta(G_n) = \phi(n)$ และจากทฤษฎีบท 2.6 ทำให้ได้

$$\prod_{i=1}^q (p_i^{k_i} - p_i^{k_i-1}) = \phi(n) = \Delta(G_n) \leq \chi'(G_n) \leq \psi'(G_n)$$

สรุปได้ว่า

$$\psi'(G_n) \geq \prod_{i=1}^q (p_i^{k_i} - p_i^{k_i-1})$$

□

ทฤษฎีบท 3.5 ให้ n เป็นจำนวนเต็มคู่และ $n = p_1^{k_1} p_2^{k_2} \dots p_q^{k_q}$ โดยที่ p_i เป็นจำนวนเฉพาะและ k_i เป็นจำนวนเต็มบวก จะได้ดั่งสมการที่ (*)

$$\psi'(G_n) \leq \sqrt{n \times \left[\left(\prod_{i=1}^q (p_i^{k_i} - p_i^{k_i-1}) \right)^2 - \prod_{i=1}^q (p_i^{k_i} - p_i^{k_i-1}) \right]} + 1 \quad (*)$$

บทพิสูจน์ ให้กราฟ G_n เป็นยูนิทารีแอตติชันเคย์เลย์กราฟและ n เป็นจำนวนเต็มคู่ จากความสัมพันธ์ของ โครมาติกอินดิเค็กซ์กับจำนวนโครมาติกของกราฟใด ๆ ที่ว่า $\psi(G) = \psi(L(G))$ และจากทฤษฎีบท 2.15 ทำให้ได้ว่า $\psi(L(G_n)) \leq \sqrt{2|E(L(G_n))|} + 1$

$$\text{ฉะนั้น} \quad \psi'(G_n) \leq \sqrt{2|E(L(G_n))|} + 1 \quad (**)$$

จากทฤษฎีบท 2.13 และทฤษฎีบท 2.7 เนื่องจาก G_n เป็น $\phi(n)$ - กราฟปกติ

$$\begin{aligned} \text{ทำให้ได้ว่า} \quad |E(L(G_n))| &= \frac{\text{จำนวนจุดยอดของ } L(G_n) \times \text{จำนวนดีกรีของ } L(G_n)}{2} \\ &= \frac{\frac{\phi(n) \times n}{2} \times 2(\phi(n) - 1)}{2} \\ &= \frac{n \times \phi(2p_1^{k_1} p_2^{k_2} \dots p_q^{k_q}) \times (\phi(2p_1^{k_1} p_2^{k_2} \dots p_q^{k_q}) - 1)}{2} \end{aligned}$$

$$\text{จากทฤษฎีบท 2.6 ทำให้ได้ว่า } |E(L(G))| = \frac{n \times \prod_{i=1}^q (p_i^{k_i} - p_i^{k_i-1}) \times (\prod_{i=1}^q (p_i^{k_i} - p_i^{k_i-1}) - 1)}{2}$$

$$\text{นำไปแทนในสมการ (**)} \quad \text{จะได้ } \psi'(G_n) \leq \sqrt{2 \frac{n \times \prod_{i=1}^q (p_i^{k_i} - p_i^{k_i-1}) \times (\prod_{i=1}^q (p_i^{k_i} - p_i^{k_i-1}) - 1)}{2}} + 1$$

$$= \sqrt{n \times \left[\left(\prod_{i=1}^q (p_i^{k_i} - p_i^{k_i-1}) \right)^2 - \prod_{i=1}^q (p_i^{k_i} - p_i^{k_i-1}) \right]} + 1$$

□

จากบทพิสูจน์การหาค่าของ $\phi(n)$ สามารถทำได้หลายวิธี เพื่อความสะดวกจึงได้แยกกรณีดังต่อไปนี้ ถ้า n เป็นจำนวนเต็มคู่และ p เป็นจำนวนเฉพาะแล้ว

$$\phi(n) = \begin{cases} p-1 & ; n = 2p \\ 2^{k-1}(p-1) & ; n = 2^k p \\ p^{k-1}(p-1) & ; n = 2p^k \\ 2^k - 2^{k-1} & ; n = 2^k \\ \text{และยังมีกรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

จากทฤษฎีบท 3.4 และทฤษฎีบท 3.5 เมื่อกำหนดให้ $n = 2p_1^{k_1} p_2^{k_2} \dots p_q^{k_q}$ โดยที่ p_i และ k_i เป็นจำนวนเฉพาะจะทำให้ได้บทแทรก 3.6 และบทแทรก 3.7 ตามลำดับ

บทแทรก 3.6 ถ้า n เป็นจำนวนเต็มคู่และ p เป็นจำนวนเฉพาะแล้ว

$$\psi'(G_n) \geq \begin{cases} p-1 & ; n = 2p \\ 2^{k-1}(p-1) & ; n = 2^k p \\ p^{k-1}(p-1) & ; n = 2p^k \\ 2^{k-1} & ; n = 2^k \\ \text{และยังมีกรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

บทแทรก 3.7 ถ้า n เป็นจำนวนเต็มคู่และ p เป็นจำนวนเฉพาะแล้ว

$$\psi'(G_n) \leq \begin{cases} \sqrt{2p(p^2 - 3p + 2)} & \text{เมื่อ } n = 2p \\ \sqrt{2^{2k-1}p(p-1)[2^{k-1}(p-1) - 1]} + 1 & \text{เมื่อ } n = 2^k p \\ \sqrt{2p^{2k-1}(p-1)[2^{k-1}(p-1) - 1]} + 1 & \text{เมื่อ } n = 2p^k \\ \sqrt{2^{3k-2} - 2^{2k-1}} + 1 & \text{เมื่อ } n = 2^k \\ \text{และยังมีกรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

ทฤษฎีบท 3.1 และทฤษฎีบท 3.4-3.5 กับความสัมพันธ์ของการระบายสีทำให้ได้ขอบเขตของอโครมาติกอินเด็กซ์ของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ ผู้วิจัยจึงได้นำทฤษฎีบท 3.1 กับความสัมพันธ์ของการระบายสี ทฤษฎีบท 2.16 และทฤษฎีบท 2.17 เพื่อพัฒนาขอบเขตของจำนวนอโครมาติกอินเด็กซ์ของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ ได้ผลวิจัยดังนี้

บทแทรก 3.8 $\psi'(G_{2^k}) \geq 2^k - 1$ สำหรับจำนวนเต็ม $k \geq 3$

บทพิสูจน์ ให้ G_{2^k} เป็นยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟที่มีจุดยอด 2^k จุด จากทฤษฎีบท 3.1 จะได้ว่า G_{2^k} เป็นกราฟสองส่วนบริบูรณ์ $K_{2^{k-1}, 2^{k-1}}$ และความสัมพันธ์ของโครมาติกอินเด็กซ์กับจำนวนโครมาติกของกราฟใด ๆ ที่ว่า $\psi'(G) = \psi(L(G))$ นั่นคือ

$$\begin{aligned}\psi'(G_{2^k}) &= \psi(L(G_{2^k})) \\ &= \psi(L(K_{2^{k-1}, 2^{k-1}})) \\ &= \psi(K_{2^{k-1}} \times K_{2^{k-1}})\end{aligned}$$

และจากทฤษฎีบท 2.17 จะได้ว่า $\psi'(G_{2^k}) \geq 2^{k-1} + 2^{k-1} - 1$

$$\geq 2^k - 1$$

ดังนั้น $\psi'(G_{2^k}) \geq 2^k - 1$ สำหรับจำนวนเต็ม $k \geq 3$

บทแทรก 3.9 กำหนดให้ k เป็นจำนวนนับที่มากกว่า 4 จะได้ว่า □

1. $\psi'(G_{2^k}) \leq t(2^k - t - 1) + 1$ โดยที่ $t = \frac{-2 + \sqrt{9 + 2^{k+4}}}{8}$,
2. $\psi'(G_{2^k}) \leq \frac{2^{2k-2}}{t+1}$ โดยที่ $t = \frac{-6 + \sqrt{1 + 2^{k+4}}}{8}$

บทพิสูจน์ ให้กราฟ G_n เป็นยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ เมื่อ $n = 2^k$ และ $k \in \mathbb{N}$ จากทฤษฎีบท 2.16 และทฤษฎีบท 3.1 จะให้ได้ว่า

$$(1) \quad \psi'(G_{2^k}) \leq t(2^k - t - 1) + 1 \quad \text{ถ้า} \quad \left[2t^2 - \frac{t}{2}\right] \leq 2^{k-1} \leq \left[2t^2 + \frac{3}{2}t - 1\right]$$

$$(2) \quad \psi'(G_{2^k}) \leq \frac{2^{2k-2}}{t+1} \quad \text{ถ้า} \quad \left[2t^2 + \frac{3}{2}t\right] \leq 2^{k-1} \leq \left[2(t+1)^2 - \frac{1}{2}(t+1) - 1\right]$$

พิจารณาค่า t จากกรณี (1) $\left[2t^2 - \frac{t}{2}\right] \leq 2^{k-1} \leq \left[2t^2 + \frac{3}{2}t - 1\right]$ จะได้ว่า

$$\left[2t^2 - \frac{t}{2}\right] \leq 2^{k-1} \quad \text{และ} \quad 2^{k-1} \leq \left[2t^2 + \frac{3}{2}t - 1\right]$$

$$2t^2 - \frac{t}{2} - 1 < 2t^2 - \frac{t}{2} \leq 2^{k-1} \quad \text{และ} \quad 2^{k-1} \leq 2t^2 + \frac{3}{2}t - 1 < 2t^2 + \frac{3}{2}t$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad 2t^2 - \frac{t}{2} - 1 < 2^{k-1} \quad \text{และ} \quad 2^{k-1} < 2t^2 + \frac{3}{2}t$$

$$4t^2 - t + (-2 - 2^k) < 0 \quad \text{และ} \quad 4t^2 + 3t - 2^k > 0$$

จะได้ $t \in \left(\frac{1-\sqrt{33+2^{k+4}}}{8}, \frac{1+\sqrt{33+2^{k+4}}}{8} \right)$ และ $t \in \left(-\infty, \frac{-3-\sqrt{9+2^{k+4}}}{8} \right) \cup \left(\frac{-3+\sqrt{9+2^{k+4}}}{8}, \infty \right)$

และจะได้ว่ามีจำนวน $t \in \left(\frac{-3+\sqrt{9+2^{k+4}}}{8}, \frac{1+\sqrt{33+2^{k+4}}}{8} \right)$ ที่สอดคล้องเงื่อนไขใน (1)

เพราะฉะนั้นจึงเลือกให้ $t = \frac{-2+\sqrt{9+2^{k+4}}}{8}$ โดยที่ $k \geq 5$

พิจารณาค่า กรณี (2) $\left| 2t^2 + \frac{3}{2}t \right| \leq 2^{k-1} \leq \left| 2(t+1)^2 - \frac{1}{2}(t+1) - 1 \right|$ จะได้ว่า

$$\left| 2t^2 + \frac{3}{2}t \right| \leq 2^{k-1} \quad \text{และ} \quad \left| 2(t+1)^2 - \frac{1}{2}(t+1) - 1 \right| \geq 2^{k-1}$$

$$2t^2 + \frac{3}{2}t - 1 < 2t^2 + \frac{3}{2}t \leq 2^{k-1} \quad \text{และ} \quad 2(t+1)^2 - \frac{1}{2}(t+1) > 2(t+1)^2 - \frac{1}{2}(t+1) - 1 \geq 2^{k-1}$$

$$2t^2 + \frac{3}{2}t - 1 < 2^{k-1} \quad \text{และ} \quad 2(t+1)^2 - \frac{1}{2}(t+1) > 2^{k-1}$$

$$4t^2 - 3t - 2 - 2^k < 0 \quad \text{และ} \quad 4(t+1)^2 - (t+1) - 2^k > 0$$

$$4(t^2 + 2t + 1) - (t+1) - 2^k > 0$$

$$4t^2 + 8t + 4 - t - 1 - 2^k > 0$$

$$4t^2 + 7t + 3 - 2^k > 0$$

และทำนองเดียวกับกรณี (1)

เพราะฉะนั้นจึงเลือกให้ $t = \frac{-6+\sqrt{1+2^{k+4}}}{8}$ โดยที่ $k \geq 5$

ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่า ถ้า $n = 2^k$ เมื่อ $k \geq 5$

$$\text{ให้ } t = \frac{-2+\sqrt{9+2^{k+4}}}{8} \text{ จะได้ } \psi'(G_n) \leq t(2^k - t - 1) + 1$$

$$\text{ให้ } t = \frac{-6+\sqrt{1+2^{k+4}}}{8} \text{ จะได้ } \psi'(G_{2^k}) \leq \frac{2^{2k-2}}{t+1}$$

□

3.2 ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการศึกษายูนิทารีแอดดิชันเคย์เลย์กราฟ ทำให้ทราบว่ากราฟจะมีลักษณะเชิงกราฟเป็นกราฟสองส่วนบริบูรณ์เมื่อ $n = 2^k$, k เป็นจำนวนนับและจุดยอดมีลักษณะ $|V_1(G_n)| = |V_2(G_n)| = \frac{n}{2}$ เมื่อ $V(G_n) = V_1(G_n) \cup V_2(G_n)$ ส่วนการหาขอบเขตของโครมาติกอินเด็กส์ของ G_n โดยใช้ทฤษฎีบท 3.4

และทฤษฎีบท 3.5 สามารถหาค่าได้ทุกกรณีที่ n เป็นจำนวนเต็มคู่ แต่ค่าขอบเขตไม่ดีเท่ากับบทแทรก 3.8 และบทแทรก 3.9 ในกรณีที่ $n = 2^k$

4. สรุปผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการหาค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบนของอโครมาติกอินเด็กส์ของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลอร์กราฟ G_n เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มคู่ นอกจากนี้ยังได้พัฒนาขอบเขตของอโครมาติกอินเด็กส์ของกราฟ G_n เมื่อ $n = 2^k$ ที่ซึ่ง k เป็นจำนวนนับได้แล้ว ซึ่งกรณี n เป็นจำนวนเต็มคี่ ลักษณะโครงสร้างเชิงกราฟของ G_n จะเป็นกราฟหลายส่วน และสามารถขยายงานวิจัยเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ของยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลอร์กราฟ และการหาค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบนของกราฟ G_n ด้วย นอกจากนี้แล้วลักษณะเชิงกราฟยูนิทารีเคย์เลอร์กราฟ X_n มีลักษณะคล้ายกับยูนิทารีแอดดิชันเคย์เลอร์กราฟ G_n จึงสามารถศึกษาการหาขอบเขตในการระบายสีได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] ภูวนาท ไชยณรงค์. 2561, จำนวนอโครมาติกของกราฟพิเศษบางชนิด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการสอนคณิตศาสตร์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. [Phuwanat Chainurak. 2018. Achromatic Numbers of Some Special Graphs. Master of Science Thesis, Mathematics Teaching Program, Graduate School, Chiang Mai University. (in Thai)]
- [2] นิตยา ชิงชัย. 2527. ทฤษฎีกราฟเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1, ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. [Nittaya Chingchai. 1984. Introduction of Graph Theory. 1st ed. Department of Mathematics, Faculty of Science, Chiang Mai University. (in Thai)]
- [3] วรานุช เขมมณี. 2559. ทฤษฎีกราฟเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. [Varanoot Khemmani. 2016. Introduction to Graph Theory. 1st ed.: Chulalongkorn University Press, Bangkok. (in Thai)]
- [4] Guthrie, F. 1880. 9. Note on the Colouring of Maps. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*. 10, 727-728. <https://doi:10.1017/S0370164600044631>.
- [5] Cayley, P. (1879). On the Colouring of Maps. *Proceedings of the Royal Geographical Society and Monthly Record of Geography*, 1(4), 259–261. <https://doi.org/10.2307/1799998>.

- [6] Appel, K. I., and Haken, W. 1977. The solution of the Four-Color-Map problem. *Scientific American*, 237(4), 108–121.
- [7] Vizing, V.G. 1965. The chromatic class of a multigraph. *Cybernetics*, 1(3), 32-41. <https://doi.org/10.1007/bf01885700>.
- [8] Beineke, L.W., and Wilson, R. 1973. On the edge-chromatic number of a graph. *Discrete Mathematics*, 5(1), 15-20. [https://doi.org/10.1016/0012-365x\(73\)90023-x](https://doi.org/10.1016/0012-365x(73)90023-x).
- [9] Harary, Frank, Hedetniemi, Stephen, and Prins, Geert. 1967. An interpolation theorem for graphical homomorphisms. *Portugaliae mathematica* 26(4), 453-462.
- [10] Cayley. 1878. Desiderata and Suggestions: No. 2. The Theory of Groups: Graphical Representation. *American Journal of Mathematics*, 1(2), 174. <https://doi.org/10.2307/2369306>.
- [11] Klotz, W., and Sander, T. 2007. Some properties of unitary Cayley graphs. *The Electronic Journal of Combinatorics*, 14(1). <https://doi.org/10.37236/963>.
- [12] Sinha, D., Garg, P., and Singh, A. 2011. Some Properties of Unitary Addition Cayley Graphs. *Notes on Number Theory and Discrete Mathematics*, 17(3), 49-59.
- [13] Momrit, P., and Promsakon, C. 2017. The achromatic number of unitary addition Cayley graphs. The proceedings of 22nd Annual Meeting in Mathematics (AMM 2017). Department of Mathematics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, GRA-OR-1-GRA-02-9.
- [14] Douglas B. West. 2001. Introduction to graph theory. 2nd ed. Prentice Hall.
- [15] อัจฉรา หาญชูวงศ์. 2542. ทฤษฎีบทจำนวน. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. [Ajchara Harnchoowong. 1999. Theory of Number. 1st ed Chulalongkorn University Press, Bangkok. (in Thai)]
- [17] เกียรติสุดา นาคประสิทธิ์. 2555. การระบายสีแบบเท่าเทียมในกราฟ. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 17(1), 150-156. [Keaitsuda Nakprasit. 2012. Equitable Colorings in Graphs. *Burapha Science Journal*, 17(1), 150-156. (in Thai)]
- [18] Hoffman, A.J. 1964. On the Line Graph of the Complete Bipartite Graph. *Annals of Mathematical Statistics*, 35(2), 883-885. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177703593>.

- [19] Chiang, N.P. and Fu, H.L. 1995. The achromatic indices of the regular complete multipartite graphs. *Discrete Mathematics*, 141(1-3), 61-66. [https://doi.org/10.1016/0012-365x\(93\)e0207-k](https://doi.org/10.1016/0012-365x(93)e0207-k).
- [20] Chiang, N.P., and Fu, H.L. 1992. On the achromatic number of the Cartesian product $G_1 \times G_2$. *Australasian Journal of Combinatorics*, 6, 111-117.

การดูดซับสี้อมอย่างรวดเร็วโดยใช้ผงถ่านคาร์บอนที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้ง
ทางการเกษตรจากมะพร้าวในพื้นที่ตำบลบางตลาด จังหวัดฉะเชิงเทรา
Rapid Aqueous Dye Adsorption Using Carbon Powder Derived
from Agricultural Waste of Coconut in Bangtalad Sub-district,
Chachoengsao Province

พิไลพร หนูทองคำ และ ประสพพร จุลบุตร์*

Pilaipon Nuthongkum and Prasopporn Junlabhut*

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ จ.ฉะเชิงเทรา ประเทศไทย
Department of applied physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University,
Chachoengsao, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 4 ธันวาคม 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 21 สิงหาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 22 สิงหาคม 2567

Received: 4 December 2023, Revised: 21 August 2024, Accepted: 22 August 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการกำจัดสี้อมที่ปนเปื้อนจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ส่งผลต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับสี้อมจากถ่านคาร์บอนที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งที่มีต้นทุนต่ำผ่านกระบวนการคาร์บอนในเข้ชั้นขั้นตอนเดียว เตรียมถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ โดยการเผาถ่านในเตาเผาแนวตั้งขนาด 200 ลิตร ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ โดยเปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ และศึกษาลักษณะทางโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) ในขณะที่ตรวจสอบสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และเครื่องตรวจเอกซเรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry: EDS) ผลการศึกษาพบว่าผงถ่านคาร์บอนจากวัสดุเหลือทิ้งมีลักษณะทางโครงสร้างสอดคล้องกับลักษณะทางโครงสร้างของคาร์บอนที่มีการจัดเรียงอย่างไม่เป็นระเบียบ เช่นเดียวกับกับโครงสร้างของผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ พบว่าขนาดรัศมีรูพรุนเฉลี่ยมีค่า 23.45 ± 0.69 , 4.72 ± 0.17 , 4.22 ± 0.19 และ N/A ไมโครเมตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุพบว่าถ่านจากวัสดุทั้งสามตัวอย่าง มีคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก มีสารเจือปนเล็กน้อยเนื่องจากกระบวนการคาร์บอนในเข้ชั้นในปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 2.84 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของสี้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ถ่านเป็นวัสดุดูดซับเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: pjunlabhut@gmail.com

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.261438>

เชิงพาณิชย์ในสภาวะปกติ พบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสมคือ 15 นาที โดยผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีประสิทธิภาพร้อยละ 94.78 และ 97.38 ตามลำดับ เมื่อคำนวณร้อยละความแตกต่างของประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมต่างกัน 2.70 แสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกันมาก อัตราการลดลงของความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูต่อหน่วยเวลาในรูปแบบ pseudo-first-order reaction จากสมการของ Lagergren ก็มีค่าใกล้เคียงกัน 0.02968 min^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ 0.03775 min^{-1} อย่างไรก็ตามในด้านของการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า เน้นการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมในชุมชน โดยเฉพาะในจังหวัดฉะเชิงเทรา อีกทั้งยกระดับวัสดุเหลือทิ้งที่ต้นทุนต่ำในชุมชนประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

คำสำคัญ : ตัวดูดซับ ผงถ่านคาร์บอน มะพร้าว วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร สีย้อมเมทิลีนบลู

Abstract

This research emphasizes the significance of dye contaminants in industrial textile wastewater and their potential impact on health and the environment. The study aims to investigate the efficiency of low-cost carbon adsorbents derived from coconut waste through a single-step carbonization process for removing dye from aqueous solutions. The preparation of carbon powder from agriculture coconut waste, including coconut husk, young coconut shell and mature coconut shell, involves carbonization in a vertical furnace with a capacity of 200 L at a temperature of 600°C for four hours. The characteristics of the carbon adsorbents derived from coconut waste were compared with commercially activated carbon powder. The crystalline structure was analyzed by X-ray Diffractometer (XRD), while the surface morphology and elemental composition were examined with a Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive Spectrometry (EDS). The results revealed that the carbon from coconut waste exhibited a carbon structure similar to commercial activated carbon. The surface morphology showed average surface pore size of 23.45 ± 0.69 , 4.72 ± 0.17 , 4.22 ± 0.19 , and N/A micrometers for coconut husk, young coconut shell, mature coconut shell and commercial activated carbon, respectively. Elemental analysis indicated that all the carbon materials mainly consisted of carbon and oxygen as the major components, with less than 2.84% impurities occurring in the carbonization process. The adsorption performance of methylene blue using carbon materials as adsorbents revealed that the suitable contact time was 15 minutes. The carbon waste from mature coconut shells and commercial activated carbon exhibited removal efficiencies of 94.78% and 97.38%, respectively. Despite a small difference in removal efficiency at 2.70%, indicating that the adsorption efficiency was similar to the commercial activated carbon.

The pseudo-first-order reaction kinetics based on Lagergren's equation exhibited a similar value of 0.02968 min^{-1} , comparable to the commercial activated carbon's value of 0.03775 min^{-1} . However, efficient resource utilization focuses on the environmental, particularly in Chachoengsao Province. Additionally, efforts are being made to use low-cost waste materials from the community to be used as adsorbents for dye removal in wastewater treatment.

Keywords: Adsorbent, Carbon powder, Coconut, Agriculture waste, Methylene blue dye

1. บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญต่อประเทศไทยเป็นอย่างมากและสีย้อมนับเป็นวัตถุดิบหลักที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เมทิลีนบลู (Methylene Blue) หรือเมทิลไทโอนีนีเยมคลอไรด์ (Methylthioninium Chloride) เป็นสีย้อมที่นิยมใช้ในกระบวนการฟอกย้อม หากมีการทิ้งน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัยใกล้แหล่งน้ำ อีกทั้งอนุภาคของสีย้อมบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านสู่ผิวน้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสง ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง กระทั่งต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศทางน้ำอย่างมหาดศาล [1]-[6] ในการกำกับดูแลเรื่องการปล่อยน้ำเสียปนเปื้อนจากอุตสาหกรรม ถูกควบคุมด้วยประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมและประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมในปีพ.ศ. 2559 และพ.ศ. 2560 ตามลำดับ พบว่ามีการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม ให้ค่าสีมีค่าไม่เกิน 300 ADMI [6] กระบวนการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนจากกระบวนการฟอกย้อมสามารถทำได้หลากหลาย เช่น การบำบัดทางชีวภาพด้วยระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน การบำบัดทางเคมีด้วยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน หรือการใช้ไฟฟ้าเคมี เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ถึงแม้ประสิทธิภาพสูงแต่ล้วนเป็นกระบวนการที่ต้องการแหล่งพลังงานทั้งสิ้น กระบวนการบำบัดทางกายภาพจากกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงในสภาวะปกติ กระบวนการไม่ซับซ้อน และต้นทุนต่ำ [1],[6]

พื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทราแบ่งเป็นพื้นที่ปลูกมะพร้าว 20,678 ไร่ ซึ่งให้ผลผลิตเฉลี่ย 880 กก./ไร่ รวมผลผลิตต่อปีประมาณ 18,197 ตัน นำรายได้เข้าสู่จังหวัดสูงถึง 152 ล้านบาทในปีพ.ศ. 2559-2560 [7] มะพร้าวมีคุณค่าทางโภชนาการที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย และยังเป็นพืชเศรษฐกิจในจังหวัด แต่เนื่องด้วยราคาที่ดินผวน จึงมีการนำเอามะพร้าวมาทำการแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า สิ่งก็ตามมาคือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น เปลือกมะพร้าว เส้นใยมะพร้าว ขุยมะพร้าว และกะลามะพร้าว เป็นต้น สวนมะพร้าวน้ำหอมโคโคคาบอย ตำบลบางตลาด อำเภอคลองเขื่อน จังหวัดฉะเชิงเทรา ผลิตถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากสวนมะพร้าว ได้แก่ เปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ ด้วยเตาผลิตถ่านแบบถัง 200 ลิตร ชนิดแนวตั้ง โดยใช้วงมะพร้าว และทางมะพร้าว เป็นเชื้อเพลิง เพื่อลดขยะจากการเกษตร และยังได้ถ่านที่มีคุณภาพ นอกจากถ่านแล้วในกระบวนการเผายังทำให้ได้น้ำส้มควันไม้ เพื่อจัดจำหน่ายอีกด้วย เพื่อเพิ่มมูลค่าของวัสดุที่เหลือทิ้ง สวนมะพร้าว

น้ำหอมโคโคควาบอย จึงทำความร่วมมือกับมหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ร่วมทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของถ่านคาร์บอนที่เผาได้จากวัสดุเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าว เพื่อเปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ที่มีจำหน่ายทั่วไป โดยทำการศึกษากระบวนการดูดซับโดยใช้วัสดุดูดซับจากถ่านซึ่งโดยปกติกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำ ดูดติดบนผิวของวัสดุดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนพื้นผิวและภายในรูพรุน [6]

ในงานวิจัยจึงมุ่งเน้นเพิ่มมูลค่าของวัสดุที่เหลือทิ้ง ด้วยการเผาถ่านจากเศษวัสดุเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าวสามชนิด ได้แก่ เปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ ด้วยเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร ชนิดแนวตั้งที่อุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการศึกษาค่าผลของการดูดซับที่เหมาะสม รวมทั้งทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยทำการเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของผงถ่านคาร์บอน

การเตรียมผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากสวนมะพร้าว น้ำหอมโคโคควาบอย ต.บางตลาด อ.คลองเขื่อน จ.ฉะเชิงเทรา ทำโดยการเผาด้วยเตาเผาผลิตถ่านแบบถัง 200 ลิตร ชนิดแนวตั้ง ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลผลิตเป็นถ่านคาร์บอนคุณภาพสูง ดังรูปที่ 1 โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกาบมะพร้าวและทางมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 1. กระบวนการเตรียมถ่านที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้ง (ก) ถ่านเปลือกมะพร้าว (ข) ถ่านกะลามะพร้าวอ่อน และ (ค) ถ่านกะลามะพร้าวแก่



รูปที่ 2. ผงถ่านคาร์บอนจากวัสดุเหลือทิ้ง (ก) ผงถ่านเปลือกมะพร้าว (ข) ผงถ่านกะลามะพร้าวอ่อน (ค) ผงถ่านกะลามะพร้าวแก่ และ (ง) ผงถ่านถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

จากนั้นนำถ่านคาร์บอนจากวัสดุเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าวและถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์บดละเอียดด้วยเครื่องปั่นอัตโนมัติกำลังไฟฟ้า 1,200 วัตต์ รุ่น BE-127A เพื่อลดขนาด และทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช เพื่อให้ได้ขนาดที่สม่ำเสมอตั้งรูปที่ 2 และทำการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องตรวจเอกซเรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน

2.2 การดูดซับสีย้อมเมทิลินบลู

เตรียมเป็นสารละลายความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลาร์ จากสารตั้งต้นเมทิลินบลูที่มีมวลโมเลกุล 319.86 กรัมต่อโมล เพื่อทำการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยใช้ผงถ่านคาร์บอนจากเศษวัสดุเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าวเป็นตัวดูดซับที่สภาวะปกติ เริ่มต้นจากการชั่งวัสดุตัวดูดซับปริมาณ 0.25 กรัม เติมนลงในสารละลายเมทิลินบลูปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 5-30 นาที เมื่อครบกำหนดเวลา ทำการแยกวัสดุดูดซับด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 3,800 รอบต่อวินาที และนำสารละลายเมทิลินบลูที่ผ่านการดูดซับไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลินบลูเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น ด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับกับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ด้วยค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป และศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันและพันธะทางเคมีของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรไมโครสโคป

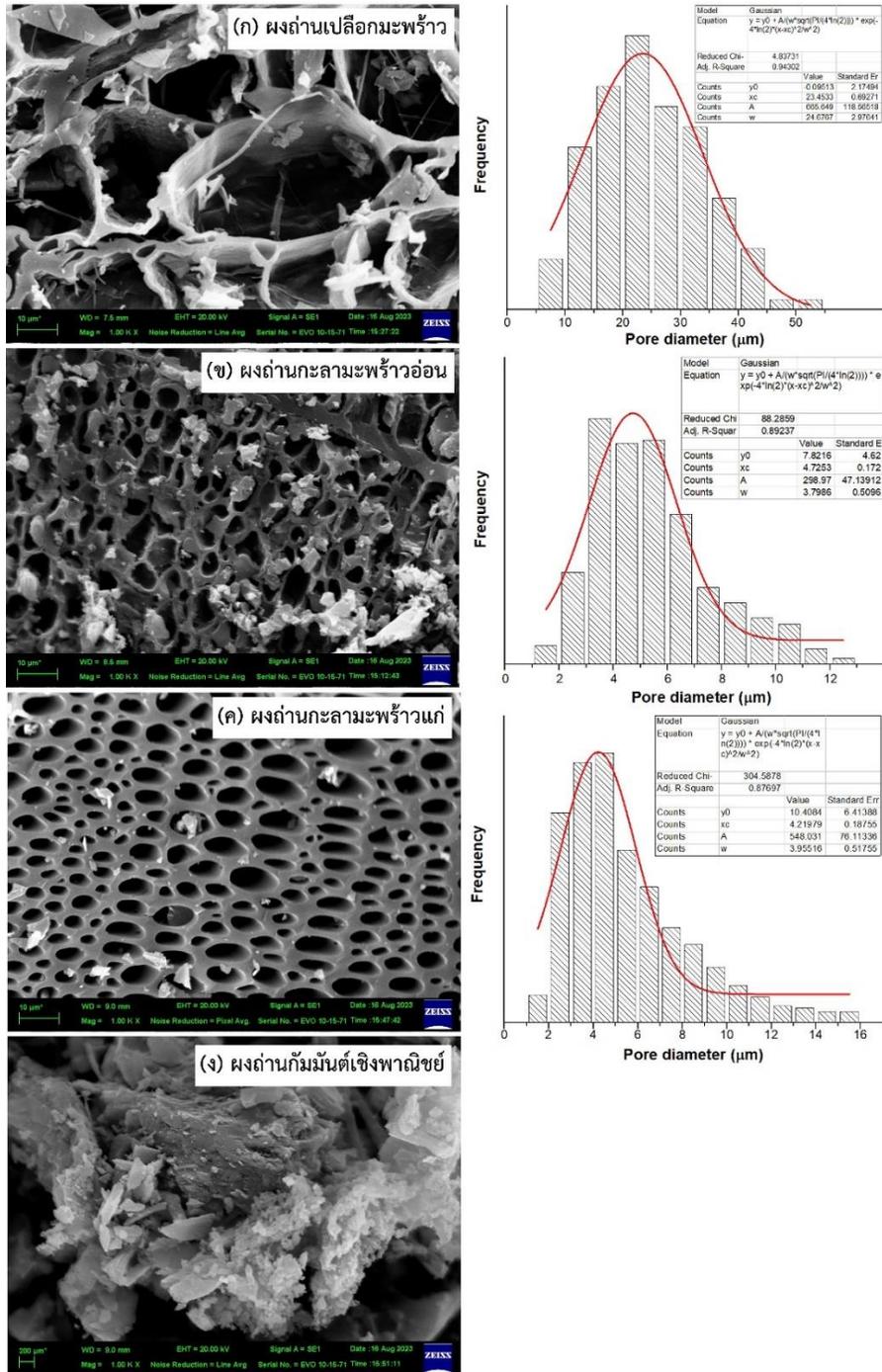
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ศึกษาสมบัติของถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ ที่ผ่านการลดขนาดด้วยเครื่องปั่นอัตโนมัติและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว มีพื้นผิวภายนอกไม่เรียบ มีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่และเล็กปะปนกัน แต่ขนาดของรูพรุนบริเวณพื้นผิวมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3 (ก) ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้น เกิดจากการระเหยของสารระเหยในวัสดุตั้งต้น ทำให้เกิดเป็นช่องว่างหรือโพรงและก่อตัวเป็นรูพรุนเนื่องจากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน [3]-[5] ผง

ถ่านคาร์บอนจากเปลือกกะลามะพร้าวอ่อนแสดงดังรูปที่ 3 (ข) พบว่าการกระจายตัวของรูพรุนสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว แต่ถ่านคาร์บอนที่ได้จากเปลือกกะลามะพร้าวแก่ จากรูปที่ 3 (ค) พบว่า ลักษณะพื้นผิวภายนอกเรียบ มองเห็นรูพรุนได้อย่างชัดเจน และมีการกระจายตัวของรูพรุนอย่างเป็นระเบียบ ขนาดของรูพรุนใกล้เคียงกัน สังเกตการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยขนาดรูพรุนบริเวณพื้นผิวของผงถ่านด้วยซอฟต์แวร์ Image J จากภาพ SEM ของผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ พบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีค่า 23.45 ± 0.69 , 4.72 ± 0.17 , 4.22 ± 0.19 และ N/A ไมโครเมตร ตามลำดับ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ต่างกัน เกิดจากประเภทของวัสดุตั้งต้นที่ต่างกัน ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญต่อขนาดรูพรุนของถ่านและส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับ [8]

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องตรวจรังสีเอกซ์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDS) พบว่าผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก ข้อมูลจากตารางที่ 1 พบว่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์มีความบริสุทธิ์สูง และไม่พบสิ่งเจือปนอื่น ส่วนผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ที่เตรียมจากเตาเผาผลิตถ่านแบบถ้ำ 200 ลิตร ชนิดแนวตั้ง ที่อุณหภูมิ 600°C พบธาตุคาร์บอนในปริมาณที่สูงเพิ่มขึ้น 83.03, 88.92 และ 89.78 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และปริมาณธาตุออกซิเจนร้อยละ 11.67, 8.29 และ 9.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติของถ่านที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันปริมาณของคาร์บอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุตั้งต้น เนื่องจากกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำหน้าที่สลายสารระเหยที่คงอยู่ในวัสดุตั้งต้น [9]-[10] นอกจากนี้ผงถ่านที่ได้จากการเผาด้วยวัสดุเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าวทั้งสามตัวอย่างยังแสดงสิ่งเจือปนเล็กน้อยของโพแทสเซียม และซิลิกอน ในปริมาณร้อยละ 2.84:2.47, 2.79:0 และ 1.02:0 ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันทำในพื้นที่ที่อับอากาศจึงพบปริมาณธาตุออกซิเจนต่ำ และเนื่องจากวัสดุตั้งต้นเป็นสารชีวมวล จึงอาจพบธาตุซิลิกอนเล็กน้อยในผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าวได้ การเจือปนแสดงถึงความบริสุทธิ์ของถ่านคาร์บอนที่ได้และผลการทดลองพบว่าถ่านคาร์บอนที่ได้จากวัสดุกะลามะพร้าวแก่มีความบริสุทธิ์ของถ่านมากที่สุด เมื่อเทียบกับถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว และกะลามะพร้าวอ่อน



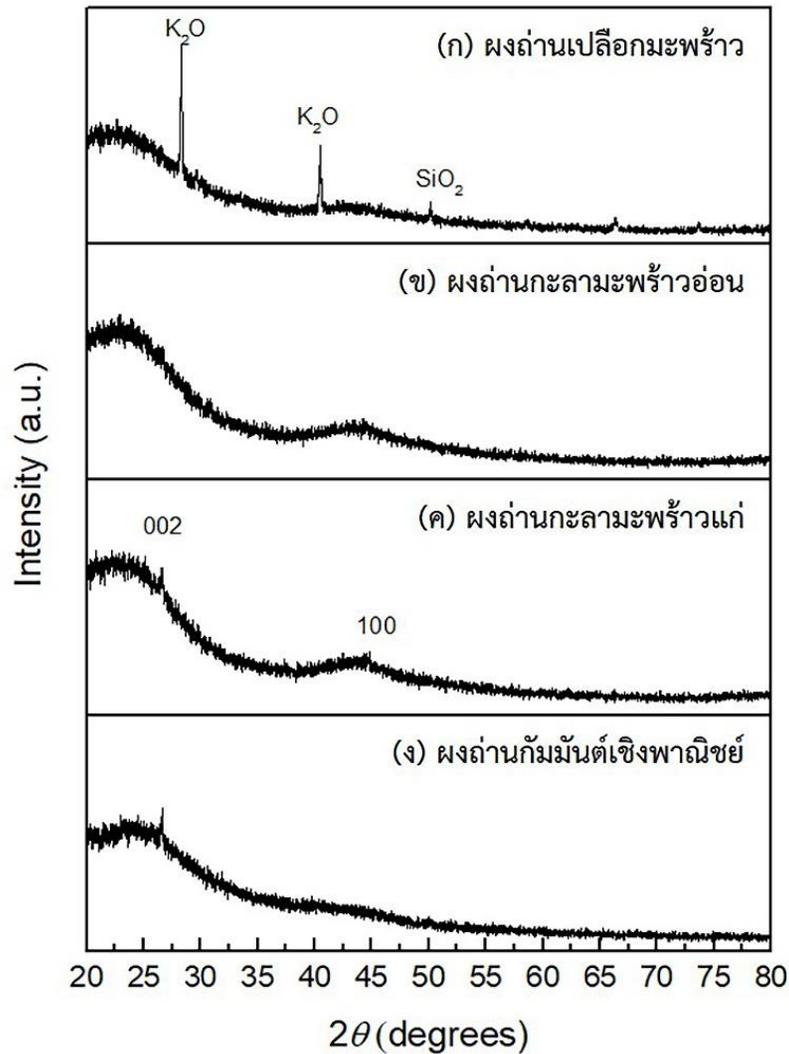
รูปที่ 3. ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟองถ่านคาร์บอนจาก (ก) ฟองถ่านเปลือกมะพร้าว (ข) ฟองถ่านกะลามะพร้าวอ่อน (ค) ฟองถ่านกะลามะพร้าวแก่ และ (ง) ฟองถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

ตารางที่ 1. องค์ประกอบของธาตุของผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

ตัวอย่าง	ผงถ่านเปลือกมะพร้าว	ผงถ่านกะลามะพร้าวอ่อน	ผงถ่านกะลามะพร้าวแก่	ผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)			
คาร์บอน	83.03	88.92	89.78	74.84
ออกซิเจน	11.67	8.29	9.20	25.16
โพแทสเซียม	2.84	2.79	1.02	-
ซิลิกอน	2.47	-	-	-
ทั้งหมด	100.00			

จากการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 20-80 องศา พบว่าผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ มีลักษณะการเลี้ยวเบนของพีคกว้าง (Broad peak) ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน จากรูปที่ 4 (ก) พบว่าผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว มีโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ที่มุม 28.8 และ 40.6 องศา ตรงกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 26-1327 สอดคล้องกับลักษณะพีคของโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และพบพีคที่มุม 50.2 องศา ตรงกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 82-0511 สอดคล้องกับลักษณะพีคของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างของสารประกอบโพแทสเซียมออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์เกิดระหว่างกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน [9]-[12] ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จาก EDS

จากรูปที่ 4 (ค) และ 4 (ง) ผงถ่านคาร์บอนกะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนตรงกันที่มุม 26 องศา ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางโครงสร้างของแกรไฟต์ [6] ตรงกับกระบวนการเลี้ยวเบน (002) ไม่มีโครงสร้างอินทรีย์อื่นเจือปน ความร้อนเนื่องจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันส่งผลให้สารประกอบอินทรีย์ในวัสดุตั้งต้นถูกสลาย และบางส่วนเกิดปฏิกิริยารีดิวซ์ไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงและเกิดการซ้อนกันเป็นชั้นของระนาบระหว่างการทำให้เป็นคาร์บอน [6],[10]

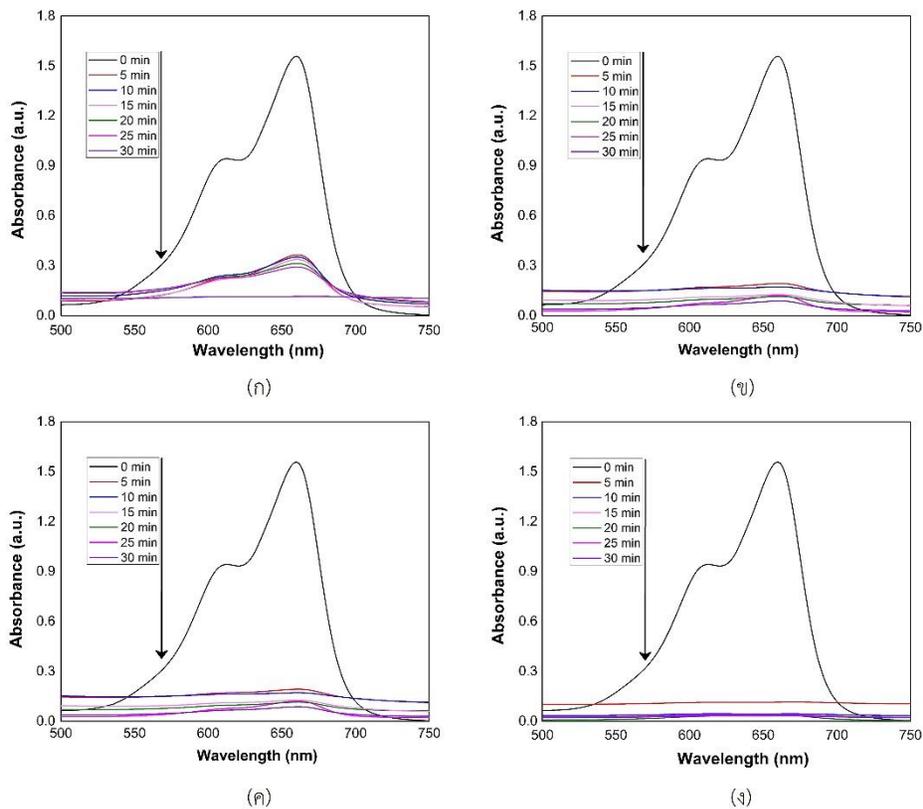


รูปที่ 4. ลักษณะโครงสร้างของผงถ่านคาร์บอนจาก (ก) ผงถ่านเปลือกมะพร้าว (ข) ผงถ่านกะลามะพร้าวอ่อน (ค) ผงถ่านกะลามะพร้าวแก่ และ (ง) ผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

3.2 ศึกษาผลการดูดซับสีย้อม

จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมโดยใช้ผงถ่านคาร์บอนเป็นวัสดุดูดซับที่สภาวะปกติ เปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ พบว่าสเปกตรัมการดูดซับสีย้อมมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรแสดงดังรูปที่ 5 สเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะเวลาในการดูดซับ 5 นาที ส่งผลให้มีการถ่ายโอนโมเลกุลของสีย้อมจากสารละลายไปยังวัสดุดูดซับได้เร็วในช่วงแรก แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งเมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของสีย้อม จะเกิดการแพร่กระจายของสีย้อมเข้าสู่โครงสร้างรู

พรุณภายในวัสดุดูดซับ ทำให้มีอัตราการดูดซับช้าลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อัตราการดูดซับของตัวดูดซับจะมีความจุจำกัด ส่งผลให้เกิดการเข้าสู่สภาวะสมดุล สังเกตได้จากอัตราการดูดซับจะค่อนข้างคงที่ [6],[8],[13] จากการทดลองพบว่าเวลาของสภาวะสมดุลของผงถ่านเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที โดยเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับ ณ จุดสมดุลของผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ มีค่าร้อยละ 90.51, 77.43, 94.78 และ 97.38 ตามลำดับ



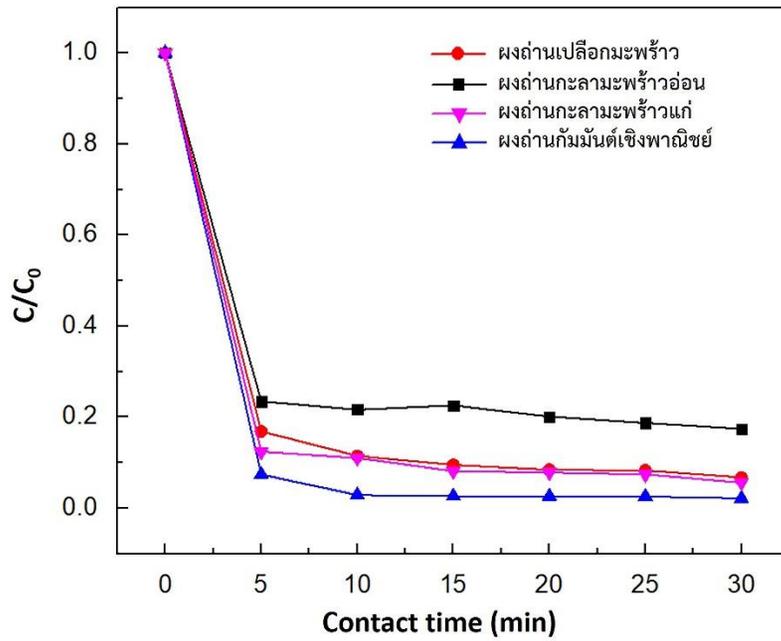
รูปที่ 5. สเปกตรัมการดูดซับสีของ (ก) ผงถ่านเปลือกมะพร้าว (ข) ผงถ่านกะลามะพร้าวอ่อน (ค) ผงถ่านกะลามะพร้าวแก่ และ (ง) ผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ แต่ละช่วงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

จากผลการศึกษาพบว่า ผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าวมีขนาดรศมีเฉลี่ยของรูพรุนบริเวณพื้นผิวสูงกว่าผงถ่านคาร์บอนชนิดอื่นจึงดูดซับสี้อมได้ดีในช่วงต้น ในขณะที่ผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนบนพื้นผิวสม่ำเสมอ มีองค์ประกอบของธาตุอื่นเจือปนน้อย และมีลักษณะทางโครงสร้างของคาร์บอนใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ จึงส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดสี้อมที่ดี เมื่อเทียบกับผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว และกะลามะพร้าวอ่อน เมื่อเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 20-30 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย

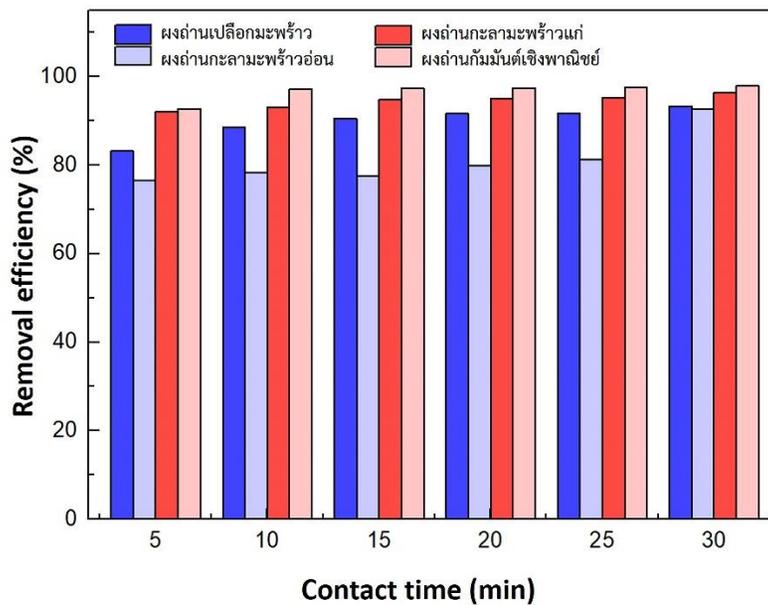
ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของผงถ่านคาร์บอนแสดงได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 6 (ก) ผลการคำนวณอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสีที่ย้อมที่เมื่อเวลาในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น C/C_0 พบว่าค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูผ่านสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในย่านที่ตามองเห็น ($\lambda = 665 \text{ nm}$) ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่ได้จากผงถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งจากมะพร้าวมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบร้อยละของประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลา แสดงในรูปที่ 6 (ข) จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ และผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ใกล้เคียงกันมาก

แม้ว่าผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ที่เตรียมได้อาจจะไม่ได้ยืนยันความเป็นถ่านกัมมันต์ แต่ประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมมีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ เมื่อคำนวณเปรียบเทียบร้อยละความแตกต่างของประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมด้วยผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ กับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ พบว่ามีค่าร้อยละของความแตกต่าง 2.70 จากการทดลองสรุปได้ว่า ตัวดูดซับจากผงถ่านคาร์บอนด้วยกระบวนการเผาวัสดุเหลือทิ้งจากมะพร้าวที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูใกล้เคียงกับวัสดุดูดซับจากผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและพันธะทางเคมีของผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ก่อนและหลังการดูดซับสีย้อมด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared spectrometer: FTIR) ที่ช่วงเลขคลื่น 4,000-500 ต่อเซนติเมตร พบว่าผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวก่อนการดูดซับสีย้อมปรากฏการณ์การสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3779 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งบ่งบอกถึงการมีอยู่ของหมู่คาร์บอกซิล ฟีนอล และแอลกอฮอล์บนพื้นผิวของผงถ่านคาร์บอน [8],[14]-[16] ปรากฏการณ์การสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1720-1664 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C=O ในหมู่คาร์บอกซิลิก [15] ปรากฏการณ์การสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1583 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C=C ในวงแหวนอะโรมาติก [17] ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เหล่านี้รวมถึงหมู่คาร์บอกซิลิก และหมู่ไฮดรอกซิลมีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของผงถ่านคาร์บอน จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าเส้นสเปกตรัมของผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ก่อน และหลังการดูดซับสีย้อมมีลักษณะทางเคมีคล้ายกัน แต่ตำแหน่งเลขคลื่นของผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่หลังการดูดซับสีย้อมเลื่อนออกจากตำแหน่งเดิม (Shifted) โดยตำแหน่งเลขคลื่น 3779 ต่อเซนติเมตร เคลื่อนไปที่ตำแหน่งเลขคลื่นลดลงที่ 3777 ต่อเซนติเมตร และตำแหน่งเลขคลื่น 1720-1664 และ 1583 ต่อเซนติเมตร เคลื่อนไปที่ตำแหน่งเลขคลื่นเพิ่มขึ้นที่ 1724-1670 และ 1591 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ การเคลื่อนของตำแหน่งเลขคลื่นเกิดเนื่องจากการดูดซับโมเลกุลของสีย้อมบนพื้นผิวของผงถ่านคาร์บอนสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jawad และคณะ [16],[18]

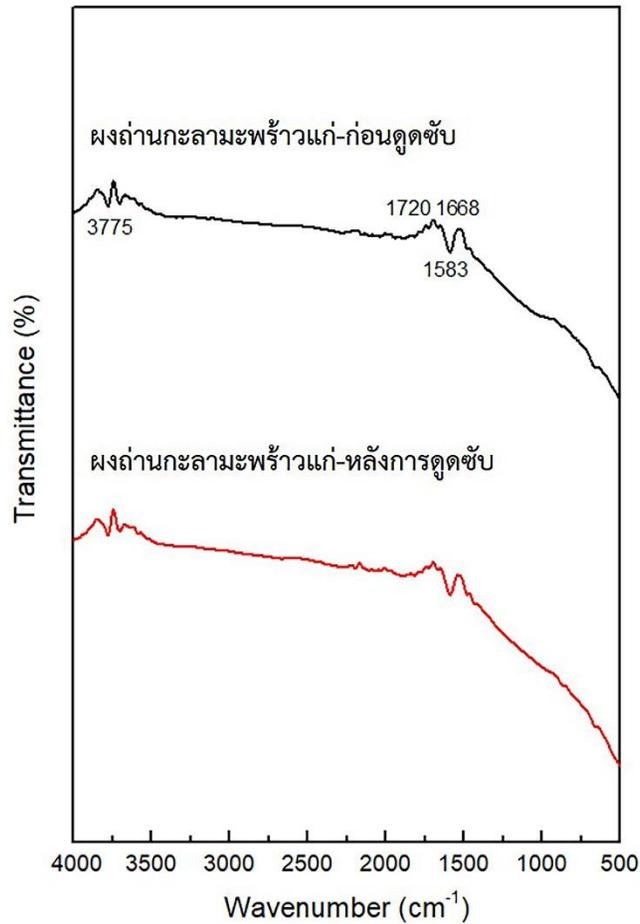


(ก)



(ข)

รูปที่ 6. ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของผงถ่านคาร์บอน (ก) อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสีที่ยอมที่เมื่อเวลาในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) ร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับสียอมแต่ละเวลาที่ใช้ในการดูดซับ 0-30 นาที



รูปที่ 7. รูปแบบหมู่ฟังก์ชันและพันธะทางเคมีของผงด่างคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ ก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยผงด่างคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่เปรียบเทียบกับผงด่างกัมมันต์เชิงพาณิชย์ในรูปแบบ pseudo-first-order reaction ด้วยสมการของ Lagergren ดังแสดงในสมการที่ (1) [19]-[21]

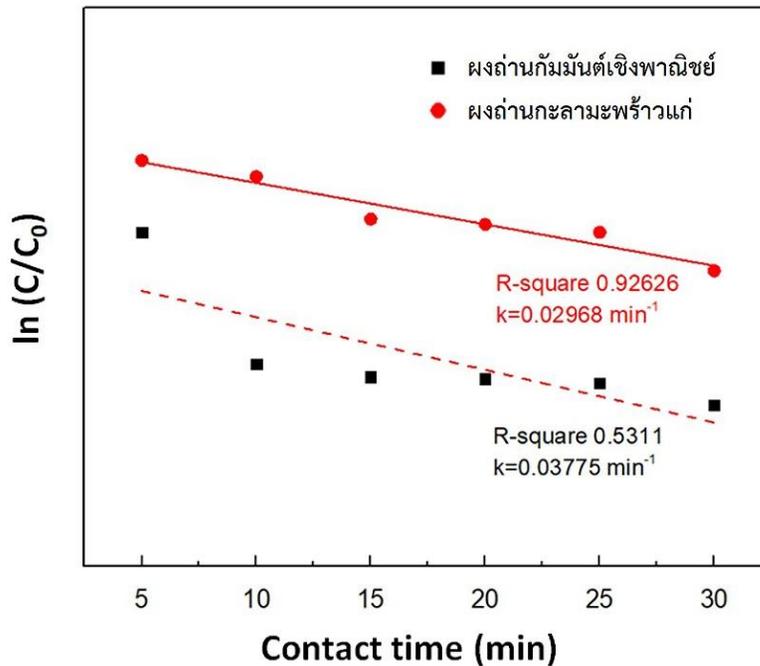
$$\ln(C_t / C_0) = -kt \quad (1)$$

โดยที่ k คือ อัตราการลดลงของสีย้อมต่อหน่วยเวลา (Rate constant) ในรูปแบบ pseudo-first-order

C_t คือ ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูในเวลา t

C_0 คือ ความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น

t คือ เวลา



รูปที่ 8. ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C/C_0)$ กับเวลาในการดูดซับตั้งแต่ 0-30 นาที

จากการคำนวณค่าความชันจากสมการเส้นตรง (k) โดยการทำให้ Linear fit แสดงในรูปที่ 8 พบว่าค่า k ระหว่างตัวดูดซับจากผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ กับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ มีค่า 0.02968 min^{-1} และ 0.03775 min^{-1} ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงอัตราการลดลงของความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูต่อหน่วยเวลาที่ใกล้เคียงกัน แสดงถึงประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ดี แม้ผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีย้อมในสภาวะปกติได้ประสิทธิภาพดีกว่าผงถ่านจากกะลามะพร้าวแก่ เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนแบบเมโซพอร์ของถ่านกัมมันต์ที่มีในปริมาณมากส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูที่ดี และรวดเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในด้านของการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า งานวิจัยนี้นับเป็นการกำจัดกะลามะพร้าวเหลือทิ้งในชุมชน อีกทั้งยกระดับวัสดุเหลือทิ้งที่ต้นทุนต่ำในชุมชนจังหวัดฉะเชิงเทราประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด นอกจากนี้ยังสามารถต่อยอดและพัฒนาการเผากะลามะพร้าวแก่ให้เป็นถ่านกัมมันต์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารปนเปื้อนอื่น นอกจากสีย้อม ตัวอย่างเช่นโลหะหนัก [22] และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [23] เป็นต้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติของผงถ่านคาร์บอนที่ผลิตจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ในเตาเผาผลิตถ่านแบบถังขนาด 200 ลิตร ชนิดแนวตั้ง ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่มีลักษณะทาง

พื้นผิวภายนอกเรียบ สังเกตรูพรุนเชิงพื้นผิวได้อย่างชัดเจน และมีการกระจายตัวของรูพรุนเชิงพื้นผิวสม่ำเสมอขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 4.22 ± 0.19 ไมโครเมตร มีสารเจือปนน้อยเมื่อเทียบกับผงถ่านจากเปลือก และกษลมะพร้าวอ่อน และมีลักษณะโครงสร้างคาร์บอนเช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ เหมาะที่จะนำมาทดสอบเป็นตัวดูดซับสี้อมที่ปนเปื้อนในน้ำได้ ผลการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสี้อมเมทิลีนบลูในสภาวะปกติ พบว่าถ่านคาร์บอนจากกษลมะพร้าวแก้วมีประสิทธิภาพการดูดซับสี้อมใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ มีร้อยละความแตกต่างของการประสิทธิภาพการดูดซับสี้อมเพียง 2.70 ที่เวลาในการดูดซับ 15 นาที อัตราการลดลงของความเข้มข้นของสี้อมเมทิลีนบลูต่อหน่วยเวลามีค่าใกล้เคียงกัน 0.02968 min^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ 0.03775 min^{-1}

จากการศึกษาพบว่าถ่านคาร์บอนจากกษลมะพร้าวแก้วที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเพียงขั้นตอนเดียวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสี้อมเมทิลีนบลูได้เทียบเท่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ อีกทั้งยังระดับวัสดุเหลือทิ้งที่ต้นทุนต่ำในชุมชนจังหวัดฉะเชิงเทราประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากทุนวิจัยขับเคลื่อนงานวิจัยเชิงพื้นที่ (FRMU) : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปีงบประมาณ 2565 มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประยุกต์ (บางคล้า) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทำวิจัย และที่สำคัญขอขอบคุณ คุณยอดหญิง พรชัยสิทธิ์ สวนมะพร้าวน้ำหอม โคโค่ควบอย ต.บางตลาด อ.คลองเขื่อน จ.ฉะเชิงเทรา สำหรับความร่วมมือและการอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ที่สนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Yang, J. and Qiu, K. 2010. Preparation of activated carbons from walnut shells via vacuum chemical activation and their application for methylene blue removal. *Chemical Engineering Journal*, 165(1), 209-217, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.019>.
- [2] Bergna, D., Varila, T., Romar, H. and Lassi, U. 2018. Comparison of the properties of activated carbons produced in one-stage and two-stage processes. *Journal of carbon research*, 4(3), 1-10, <https://doi.org/10.3390/c4030041>.
- [3] De Souza, C.C. et al. 2022. Activated carbon of Coriandrum sativum for adsorption of methylene blue: Equilibrium and kinetic modeling. *Cleaner Materials*, 3, 100052, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100052>.
- [4] Sujiono, E.H., Zabrian, D., Zharvan, V. and Humairah, N.A. 2022. Fabrication and characterization of coconut shell activated carbon using variation chemical activation for wastewater treatment application. *Results in Chemistry*, 4, 100291, <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100291>.

- [5] Dungani, R., Munawar, S.S., Karliati, T., Malik, J. and Aditiawati, P. 2022. Study of Characterization of activated carbon from coconut shells on various particle scales as filler agent in composite materials. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 50(4), 256-271, <https://doi.org/10.5658/WOOD.2022.50.4.256>.
- [6] เจนจิรา ภูริรักษ์พิติกกร, กิตติยา ปลื้มใจ, วรินดา เฟื่องชูนุช และ แผลมทอง ชื่นชม. 2022. การเพิ่มประสิทธิภาพ การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนเมโซพอร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่เตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันแบบหม้อเดียว. *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 11(11), 45-56, <https://doi.org/10.60136/bas.v11.2022.129>. [Jenjira Phuriragpitikhon, Kittiya Pluamjai, Warinda Fuangchoonuch, Laemthong Chuenchom. 2022. Enhancing adsorption efficiency of methylene blue from water using cassava rhizome-derived mesoporous activated carbons prepared via one-pot hydrothermal carbonization. *Bulletin of Applied Sciences, Natural Resources and Environment*, 1(11), 45-56, <https://doi.org/10.60136/bas.v11.2022.129>. (in Thai)]
- [7] สำนักงานเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา. 2566. ข้อมูลพื้นฐานของจังหวัดฉะเชิงเทรา. แหล่งข้อมูล : <https://www.opsmoac.go.th/chachoengsao-home>. ค้นเมื่อวันที่ 18 ตุลาคม 2566.
- [8] Ramutshatsha-Makhwedzha, D., Mavhungu, A., Moropeng, M.L. and Mbaya, R. 2022. Activated carbon derived from waste orange and lemon peels for the adsorption of methyl orange and methylene blue dyes from wastewater. *Heliyon*, 8(8), 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09930>.
- [9] Taer, E. et al. 2018. Activated carbon electrode made from coconut husk waste for supercapacitor application. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(12), 12072-12084, <https://doi.org/10.20964/2018.12.19>.
- [10] Mopoung, S. 2008. Surface image of charcoal and activated charcoal from banana peel. *Journal of Microscopy Society of Thailand*, 22, 15-19.
- [11] Husin, H., Abubakar, A., Ramadhani, S., Sijabat, C.F.B. and Hasfita, F. 2018. Coconut husk ash as heterogenous catalyst for biodiesel production from cerbera manghas seed oil. *MATEC web of conferences*, 197, 09008, <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819709008>.
- [12] Satheesh, M., Pugazhivadivu, M., Prabu, B., Gunasegaran, V. and Manikandan, A. 2019. Synthesis and characterization of coconut shell ash. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(7), 4123-4128, <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16299>.

- [13] Wang, J. and Guo, X. 2020. Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous materials*, 390, 122156, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>.
- [14] Xie, Z., Guan, W., Ji, F., Song, Z. and Zhao, Y. 2014. Production of biologically activated carbon from orange peel and landfill leachate subsequent treatment technology. *Journal of chemistry*, 91912, 1-9, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/491912>.
- [15] Abbas, M. and Trari, M. 2020. Removal of methylene blue in aqueous solution by economic adsorbent derived from apricot stone activated carbon. *Fibers and Polymers*, 21(4), 810-820, <http://dx.doi.org/10.1007/s12221-020-8630-8>.
- [16] Jawad, A.H. et al. 2017. Microwave-assisted preparation of mesoporous-activated carbon from coconut (*Cocos nucifera*) leaf by H_3PO_4 activation for methylene blue adsorption. *Chemical Engineering Communications*, 204(10), 1143-1156, <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1347565>.
- [17] Tan, I.A.W., Ahmad, A.L. and Hameed, B.H. 2008. Adsorption of basic dye using activated carbon prepared from oil palm shell: batch and fixed bed studies. *Desalination*, 225(1-3), 13-28, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.005>.
- [18] Jawad, A.H., Sauodi, M.H., Mastuli, M.S., Aouda, M.A. and Radzun, K.A. 2018. Pomegranate peels collected from fresh juice shop as a renewable precursor for high surface area activated carbon with potential application for methylene blue adsorption. *Desalination and Water Treatment*, 124(4), 287-296, <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22725>.
- [19] Junlabhut, P., Wattanawikkam, C., Mekprasart, W. and Pecharapa, W. 2018. Effect of Metal (Mn, Co, Zn, Ni) Doping on Structural, Optical and Photocatalytic Properties of TiO_2 Nanoparticles Prepared by Sonochemical Method. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(10), 7302-7309, <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15717>.
- [20] Ohno, T., Tokieda, K., Higashida, S. and Matsumura, M. 2003. Synergism between rutile and anatase TiO_2 particles in photocatalytic oxidation of naphthalene. *Applied Catalysis A: General*, 244(2), 383-391, [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(02\)00610-5](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(02)00610-5).
- [21] Liao, Y. et al. 2012. Controllable synthesis of brookite/anatase/rutile TiO_2 nanocomposites and single-crystalline rutile nanorods array. *Journal of Materials Chemistry*, 22(16), 7937-7944.
- [22] Sultana, M., Rownok, M.H., Sabrin, M., Rahaman, M.H. and Alam, S. N. 2022. A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. *Cleaner engineering and technology*, 6, 1-14,

<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100382>.

- [23] Shafeeyan, M.S., Daud, W.M.A.W., Houshmand, A. and Shamiri, A. 2010. A review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide adsorption. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(2), 143-151,
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.07.006>.

การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเมตาฮิวริสติก สำหรับปัญหาที่มีเงื่อนไข
ข้อจำกัดทางทรัพยากร
Comparison of Metaheuristic Methods for Solving Constrained
Problems

ศุภลักษณ์ ใจเรือง¹ ชัชพล เกษวิริยะกิจ² ลักขณา ฤกษ์เกษม^{3*} และ ภาสุระ อังกุลานนท์⁴

Supalux Jairueng¹ Chatchaphon Ketviriyakit² Lakkana Ruekksaem^{3*} and Pasura Aungkulanon⁴

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพฯ ประเทศไทย

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ จ.อุตรดิตถ์ ประเทศไทย

³สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี ประเทศไทย

⁴ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ ประเทศไทย

¹Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, Thailand

²Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit, Thailand

³Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology,
Thammasat University, Pathum Thani, Thailand

⁴Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 16 มิถุนายน 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 6 กันยายน 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 6 กันยายน 2567

Received: 16 June 2024, Revised: 6 September 2024, Accepted: 6 September 2024

บทคัดย่อ

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดและวิธีเมตาฮิวริสติก นับเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่ไม่มีข้อจำกัดและมีข้อจำกัดทางทรัพยากร วิธีเมตาฮิวริสติกเป็นกระบวนการค้นหาแบบวนซ้ำ ซึ่งดำเนินการสำรวจและใช้ประโยชน์จากคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดอย่างมีประสิทธิภาพ โดยวิธีเมตาฮิวริสติกจะค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและทดสอบประสิทธิภาพของวิธีเมตาฮิวริสติก 3 วิธีการ ได้แก่ วิธีผสมเกสรของดอกไม้ วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์ และวิธีไรเตอร์ ในการแก้ปัญหาที่มีเงื่อนไขและไม่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางทรัพยากร การประเมินประสิทธิภาพของวิธีการต่าง ๆ ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เวลาในการประมวลผล และค่าอัตราส่วนเอสต่อเอ็น ผลจากการทดลองพบว่า วิธีไรเตอร์มีความสามารถที่ดีกว่าวิธีการเมตาฮิวริสติกทั้งสองวิธีอย่างชัดเจน ในด้านของความแม่นยำและคุณภาพของผลลัพธ์ รวมไปถึงการใช้จำนวนการค้นหาคำตอบที่น้อยกว่าในการนำไปสู่การผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ในงานวิจัยฉบับนี้ วิธีไรเตอร์สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ดีกว่าแต่ให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงกว่า นอกจากนี้วิธีไรเตอร์ยังเป็นวิธีที่ง่ายต่อ

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: lakkana@mathstat.sci.tu.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.263709>

การนำไปประยุกต์ใช้และไม่ต้องการการปรับค่าพารามิเตอร์ของวิธีการ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีผสมเกสรของดอกไม้และวิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์ที่ต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสม

คำสำคัญ : วิธีเมตาฮิวริสติก วิธีผสมเกสรของดอกไม้ วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์ วิธีไรเดอร์

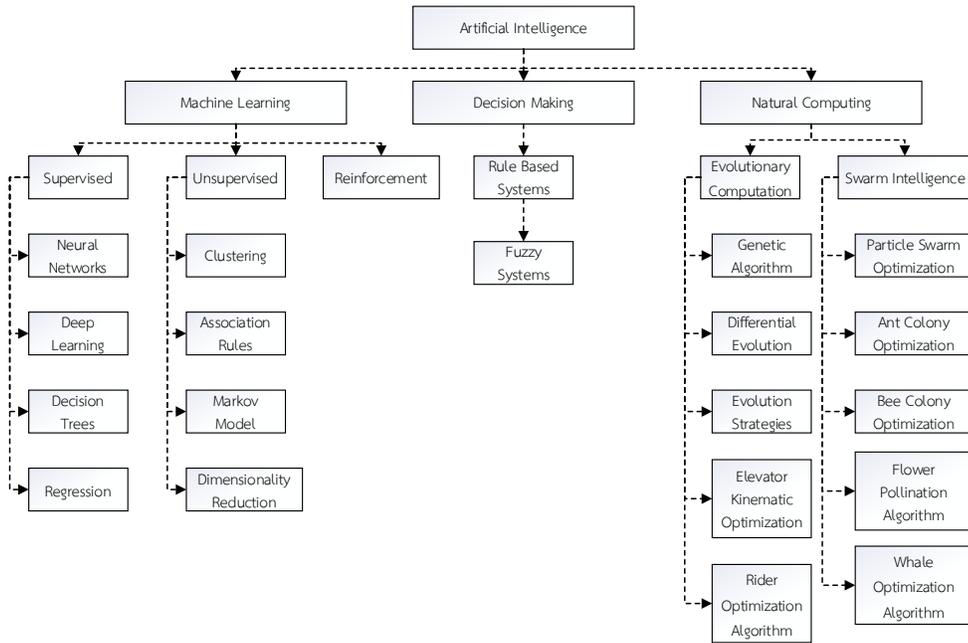
Abstract

Optimization algorithms and metaheuristic algorithms are effective techniques for solving unconstrained and constrained engineering problems. Metaheuristic algorithms are iterative search processes that efficiently explore the solution space. These methods effectively and efficiently search for solutions that are close to the optimal solution. The purpose of this research is to examine the efficiency of three algorithms: Flower Pollination Algorithm (FPA), Elevator Kinematic Optimization (EKO), and Rider Optimization Algorithm (ROA) in solving unconstrained and constrained problems. To compare the efficiency of these algorithms, we use the average, standard deviation, processing time, and signal-to-noise ratio. The experimental results demonstrate that ROA significantly outperforms the other two metaheuristic methods in terms of precision and quality of results, as well as requiring fewer searches to achieve the best solution. In this paper, the ROA can find better optimal solutions, but it gives higher standard deviation values. Additionally, ROA is easier to apply and does not require parameter tuning, while the FPA and EKO methods need parameter tuning for optimal performance.

Keywords: Metaheuristic algorithm, Flower pollination algorithm, Elevator kinematic optimization, Rider optimization algorithm

1. บทนำ

ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของวิทยาการคอมพิวเตอร์ที่ต้องการพัฒนาเครื่องจักรกล หรือการออกแบบการทำงานของโปรแกรมต่าง ๆ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ หรือหุ่นยนต์ ให้มีความสามารถทางด้านความคิด การตัดสินใจ การพัฒนาคำตอบด้วยตนเอง และเลียนแบบพฤติกรรมที่คล้ายกับมนุษย์มากที่สุด เพื่อการแก้ปัญหาหรือหาเหตุผลจากข้อมูล การนำข้อมูลหรือองค์ความรู้ที่มีอยู่แล้วนำมาวิเคราะห์ และแปลความหมายให้ได้ผลสรุปหรือผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากขึ้น [1] จากรูปที่ 1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการคำนวณธรรมชาติ (Natural computing) แผนภาพแบ่ง AI ออกเป็นสามสาขาหลัก ได้แก่ การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) การตัดสินใจ (Decision making) และกลุ่มของการคำนวณธรรมชาติ



รูปที่ 1. วิธีการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัญญาประดิษฐ์

เมื่อปี ค.ศ. 2023 Kaveh และ Mesgari [2] ได้กล่าวว่า กลุ่มของการคำนวณเป็นสาขาของ AI ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอัลกอริทึมจากแนวคิดและแรงบันดาลใจจากธรรมชาติในการพัฒนาเทคนิคการแก้ปัญหาแบบใหม่ โดยการใช้คอมพิวเตอร์สังเคราะห์ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติการคำนวณธรรมชาติหรือเรียกว่า วิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic method) สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ อันประกอบด้วย 1) กลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary computation) ยกตัวอย่างเช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [3] และ วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) [4] และ 2) กลุ่มการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ที่ได้รับแรงบันดาลใจจากชีวภาพ (Bio-inspired computation) หรือเรียกว่า ความฉลาดแบบกลุ่ม (Swarm intelligence) ประกอบด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [5] และ วิธีระบบอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization: ACO) [6] เป็นต้น

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization methods) จึงมีบทบาทสำคัญในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีปัจจัย และตัวแปรที่มีความซับซ้อน นักวิจัยหลายท่านได้เสนอแนวคิดการแก้ไขปัญหามาแบบฮิวริสติก (Heuristic algorithms) ซึ่งเดิมถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาเฉพาะเรื่อง แต่ต่อมาได้รับการพัฒนาเป็นวิธีการแก้ไขปัญหามาแบบเมตาฮิวริสติกที่มีความไม่จำเพาะเจาะจงกับปัญหา ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ได้กว้างขวางขึ้น โดยแนวคิดวิธีเมตาฮิวริสติกในปัจจุบันมักได้รับแรงบันดาลใจจากธรรมชาติรอบตัว มีพื้นฐานมาจากวิชาฟิสิกส์ ชีววิทยา และสังคมศาสตร์ ในปี ค.ศ. 2008 Hansen และคณะ [7] ได้รวบรวมงานวิจัยและการศึกษาเกี่ยวกับวิธีเมตาฮิวริสติก ในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา มี

วิธีการหลากหลายรูปแบบถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อระบบปัญหาและระบบการจัดการต่าง ๆ โดยใช้คุณลักษณะที่เกิดจากทฤษฎีมาทำการแก้ไข สรุปได้ดังนี้

1. ความเรียบง่ายและความเข้าใจได้ง่าย (Simplicity) วิธีเมตาฮิวริสติกที่ดีควรอยู่บนหลักการที่เข้าใจได้โดยง่าย และเปิดกว้างต่อการประยุกต์ใช้ในปัญหาต่าง ๆ
2. ความสอดคล้องกับหลักการ (Coherence) โดยแต่ละขั้นตอนของวิธีเมตาฮิวริสติกควรดำเนินการตามทฤษฎีพื้นฐานของวิธีเมตาฮิวริสติกนั้น ๆ
3. ประสิทธิภาพ (Efficiency) วิธีเมตาฮิวริสติกที่ดีต้องสามารถจัดหาคำตอบที่มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด ครอบคลุมตัวแปรทั้งหมดของปัญหา และสามารถแก้ไขปัญหานั้นได้หลากหลาย
4. ประสิทธิภาพ (Effectiveness) วิธีเมตาฮิวริสติกต้องจัดหาคำตอบที่ดีและใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด ในระยะเวลาที่เหมาะสม
5. ความแข็งแกร่ง (Robustness) นอกจากประสิทธิภาพและประสิทธิผลแล้ว วิธีเมตาฮิวริสติกที่ดีต้องให้คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาในทุกกรณีที่เกิดขึ้น เช่น ไม่ปรับค่าบางอย่างแล้วให้คำตอบที่ด้อยลง เป็นต้น

ในบทความวิจัยฉบับนี้ คณะผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวิธีเมตาฮิวริสติก ประกอบด้วย วิธีผสมเกสรของดอกไม้ (Flower Pollination Algorithm: FPA) [8] วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์ (Elevator Kinematic Optimization: EKO) [9] และวิธีการไรเดอร์ (Rider Optimization Algorithm: ROA) [10] ทั้ง 3 วิธี เป็นวิธีการใหม่ ซึ่งได้รับความนิยมในการนำมาแก้ไขปัญหในการพัฒนาคำตอบ ซึ่งปัจจุบันมีนักวิจัยหลากหลายท่านนำมาใช้ในการแก้ปัญห แต่ทั้ง 3 วิธีที่เลือกมานี้ยังไม่มีการวิจัยท่านใดนำมาเปรียบเทียบสมรรถนะกัน ในปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางทรัพยากร ในบทความวิจัยฉบับนี้ จากที่กล่าวมาการเปรียบเทียบจะทำการเปรียบเทียบ สมรรถนะผ่านสมการทางคณิตศาสตร์หลาย ๆ ประเภทซึ่งประกอบไปด้วยสิ่งรบกวน ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นตัวแทนของปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน พร้อมทั้งทดสอบสมรรถนะผ่านปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางวิศวกรรมเพื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีในการพัฒนาและหาคำตอบ

2. วิธีการทางเมตาฮิวริสติก

วิธีเมตาฮิวริสติก เป็นวิธีการประมาณหาคำตอบที่เหมาะสมซึ่งประสบความสำเร็จอย่างสูงในการค้นหาคำตอบในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วในการประมวลผลสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อน โดยวิธีการเหล่านี้มักถูกนำมาใช้ในการหาคำตอบภายใต้การสุ่มค่าเริ่มต้น (Random number) เพื่อให้เกิดการค้นหาคำตอบและการวิเคราะห์พื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible solution area) ให้กว้างที่สุดภายใต้เงื่อนไขปัจจุบัน ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีเหล่านี้อาจไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด แต่จะเป็นกลุ่มของคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด โดยกระบวนการทำงานจะดำเนินการวนซ้ำ และหยุดทำงานเมื่อถึงเงื่อนไขหรือพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ ซึ่งแต่ละวิธีมีรูปแบบในการค้นหาคำตอบที่แตกต่างกันออกไปเป็นลักษณะเฉพาะตัว [11] ทำให้คำตอบที่ได้แตกต่างจากวิธีการหาคำตอบแบบแม่นยำ (Exact methods) อันได้แก่ วิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex method) วิธีซิมเพล็กซ์ปรับปรุง (Modified simplex method) และวิธีแตกกิ่งและกำหนดขอบเขต (Branch and bound method) เป็นต้น เมตาฮิวริสติกที่เป็นที่นิยมและแพร่หลายมีหลากหลายวิธี อาทิ วิธีหาคำตอบแบบจำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing: SA) [12]

วิธีค้นหาแบบทาบูลี่ (Tabu Search: TS) วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network: NN) วิธีเชิงพันธุกรรม [13] วิธีระบบอณานิคมมด วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง [14] วิธีกลุ่มอนุภาค วิธีผสมเกสรของดอกไม้ วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์ วิธีการไรเดอร์ และวิธีการอื่น ๆ อีกมากมาย ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาต่างๆทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมในหลากหลายด้าน ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาการวางแผนการผลิต ปัญหาการจัดเส้นทางรถยนต์ และปัญหาการออกแบบทางวิศวกรรม เป็นต้น

2.1 วิธีการผสมเกสรดอกไม้

ในปี ค.ศ.2014 Yang [14] ได้ศึกษากระบวนการผสมเกสรดอกไม้ในธรรมชาติและการเลียนแบบการหาคำตอบที่เหมาะสมกับฟังก์ชันเป้าหมาย โดยแบ่งกระบวนการผสมเกสรออกเป็น การผสมเกสรดอกไม้ในต้นเดียวกัน (Self-Pollination) คือ การผสมเกสรภายในดอกเดียวกัน (Autogamy) หรือผสมเกสรคนละดอกแต่อยู่ในต้นเดียวกัน (Geitonogamy) และการผสมเกสรดอกไม้ข้ามต้นกัน (Cross-Pollination) คือ การผสมเกสรข้ามดอกไม้โดยอาศัยตัวนำเกสร (Pollinator) เพื่อไปสู่การผสมอีกดอกหนึ่ง ซึ่งตัวนำเกสรอาจจะเป็นสิ่งมีชีวิต (Biotic pollination) เช่น แมลง นก ผีเสื้อ หรือสิ่งไม่มีชีวิต (Abiotic pollination) เช่น ลมและน้ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากดอกไม้ที่อยู่คนละต้นอยู่บริเวณใกล้เคียงกันก็อาจจะไม่จำเป็นต้องมีตัวนำเกสรก็ได้ เรียกว่าการผสมเกสรเฉพาะที่ (Local pollination) และเรียกการผสมเกสรดอกไม้แบบต้องอาศัยตัวนำว่า การผสมเกสรแบบวงกว้าง (Global pollination) สมการทางคณิตศาสตร์ของการผสมเกสรดอกไม้จากดอกหนึ่งไปสู่อีกดอกหนึ่ง สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \gamma L(\lambda)(g_* - x_i^{(t)}) \quad (1)$$

- โดยที่ $x_i^{(t+1)}$ คือ ผลตอบสนองของตัวแปร x_i ที่รอบการทำงานของ t
- g_* คือ ผลตอบสนองที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน
- γ คือ ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อขนาดที่ใช้ควบคุมการเดินทาง
- $L(\lambda)$ คือ ค่าพารามิเตอร์ของการเดินทางในรูปแบบการบินแบบเลวี โดยที่ $L > 0$ สามารถประมาณค่าได้ดังสมการที่ (2)

$$L \approx \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin \frac{\pi \lambda}{2}}{\pi} \frac{1}{s^{(1+\lambda)}}, (s > s_0 > 0) \quad (2)$$

- โดยที่ $\Gamma(\lambda)$ คือ ค่าฟังก์ชันแกมมามาตรฐาน (Standard gamma function)
- ค่า s คือ ขนาดขั้นการค้นหา (Step size)

การแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian distribution) ของ u และ v แสดงดังสมการที่ (3)

$$s = \frac{u}{|v|^{1/\lambda}} \quad (3)$$

โดยที่ $u \approx N(0, \sigma^2)$ มาจากค่าเฉลี่ยรูปแบบของการแจกแจงแบบเกาส์อยู่ระหว่าง 0 ถึง ค่าความแปรปรวนของ σ^2 และค่า $v \approx N(0, 1)$ เมื่อ N คือการแจกแจงแบบปกติ สำหรับค่า σ^2 สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$\sigma^2 = \left[\frac{\Gamma(1+\lambda)}{\lambda\Gamma[(1+\lambda)/2]} \cdot \frac{\sin(\pi\lambda/2)}{2^{(\lambda-1)/2}} \right]^{1/\lambda} \quad (4)$$

นอกจากมีการผสมเกสรดอกไม้ภายในแล้ว ยังมีกระบวนการการผสมเกสรภายนอกอีกด้วยซึ่งสามารถแสดงผ่านได้จากรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (5)

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \varepsilon(x_j^{(t)} - x_k^{(t)}) \quad (5)$$

โดยที่ $x_j^{(t)}$ และ $x_k^{(t)}$ คือ ค่าเกสรจากดอกไม้ที่มีความแตกต่างกันทั้งสองดอก และใช้หลักการสร้างผลเฉลี่ยโดยการสุ่มแบบเอกรูปเมื่อ ε คือการสุ่มแบบเอกรูป ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง [0,1]

ขั้นตอนวิธีของการผสมเกสรดอกไม้ (FPA) อาศัยกฎพื้นฐานดังต่อไปนี้ [15]

กฎข้อที่ 1 การผสมเกสรดอกไม้แบบข้ามดอกจะต้องพึ่งพาตัวนำพาแบบสิ่งมีชีวิตวิธีการเดินทางของตัวนำพาสิ่งมีชีวิต จะใช้วิธีการเดินทางด้วยการบินแบบเลวี่ดังสมการที่ (2)

กฎข้อที่ 2 การผสมเกสรดอกไม้ในต้นเดียวกันจะต้องอาศัยตัวนำพาแบบสิ่งไม่มีชีวิต

กฎข้อที่ 3 ตัวนำพาการผสมเกสรดอกไม้แบบข้ามดอก สามารถพัฒนาดอกไม้ให้มีความคงตัวที่สมบูรณ์กันกับความน่าจะเป็นในการขยายพันธุ์ที่เป็นสัดส่วนใกล้เคียงกับดอกไม้ทั้งสองที่เกี่ยวข้องกัน

กฎข้อที่ 4 การผสมเกสรดอกไม้ในต้นเดียวกัน (การผสมเกสรเฉพาะที่) และการผสมเกสรดอกไม้แบบข้ามต้น (การผสมเกสรแบบวงกว้าง) อาจถูกกำหนดด้วยค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยน ในทางปฏิบัติดอกไม้ที่อยู่ติดกันหรืออยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกันมักมีแนวโน้มในการผสมเกสรแบบเฉพาะที่ ความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยนจะมีผลไปทางการผสมดอกไม้ในต้นเดียวกันเล็กน้อย

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์สำหรับการประยุกต์ใช้งานทั่วไป กำหนดให้ n คือจำนวนเกสรดอกไม้ p คือค่าความน่าจะเป็นในการสับเปลี่ยนระหว่างการผสมเกสรวงกว้าง และ λ คือ การผสมเกสรเฉพาะที่ โดยขั้นตอนวิธีของ FPA สามารถหลุดรอดจากการติดกับดักเฉพาะที่ (Local Trap) และค้นหาผลเฉลยวงกว้างได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

2.2 วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์

วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่อยู่ในกลุ่มของเมตาฮิวริสติก เมื่อปี ค.ศ.2017 Aungkulanon และคณะ [16] เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของลิฟท์ที่ใช้สมการการเคลื่อนที่ของลิฟท์ โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ของลิฟท์ที่สั้นที่สุด ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในการใช้ลิฟท์มากที่สุด ซึ่งเปรียบเสมือนการค้นหาคำตอบของปัญหาที่ต้องการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเช่นกัน [17] วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์ เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ปัญหาระบุตัวแปรที่สำคัญอันประกอบด้วย ตัวแปรตัดสินใจ (The probability of a rejection command: PRC และ The probability of choosing a floor: PCF)

ขนาดความเร็ว (v) ขนาดความเร่ง (a) ขนาดของความจำของลิฟท์ (EM) ความน่าจะเป็น (P1 และ P2) ขอบเขตของค่าปัจจัย (x) และจำนวนรอบในการค้นหา (Iteration) หลังจากนั้นจะสร้างผลตอบแทนเริ่มต้นและดำเนินการในระบบ เพื่อค้นหาค่าตอบที่ให้ค่าผลตอบแทนที่ดีที่สุด (y) พร้อมกับค่าปัจจัย (x) ที่ส่งผลให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยเช่นกัน โดยวิธีการทำงานเป็นดังนี้

1. การกำหนดค่าของตัวพารามิเตอร์ของระบบ ได้แก่ ตัวแปรปรับระดับ (PRC และ PCF) ขนาดของความจำของลิฟท์ (EM)
2. การสุ่มตัวเลขเริ่มต้นจากขอบเขตของค่าปัจจัย (x) แล้วนำมาแทนค่าปัจจัย x ในสมการวัตถุประสงค์ ตามลำดับ จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ (Yield: Y) ของสมการเพื่อเป็นค่าตั้งต้นตามขนาดของความจำของลิฟท์ (EM)
3. จัดเรียงลำดับผลตอบแทนจากดีที่สุดไปจนถึงแย่ที่สุด โดยดูจากค่า Y
4. คำนวณโปรแกรมตามข้อมูลที่กำหนดในค่าตัวแปร เช่น ขนาดของความจำของลิฟท์ (EM) มีค่าเท่ากับ 10 ขนาดความเร็ว (v) มีค่าเท่ากับ 2.5 ขนาดความเร่ง (a) มีค่าเท่ากับ 4 ความน่าจะเป็น (P1 และ P2) มีค่าเท่ากับ 0.33 และ 0.66 ตามลำดับ จำนวนรอบที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 15 เป็นต้น
5. คำนวณค่าที่ได้จากระบบใหม่เปรียบเทียบกับค่าที่จัดเก็บ ไว้ในขนาดของความจำโดยการแทนค่าปัจจัย x ลงในสมการวัตถุประสงค์ ตามลำดับ จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าผลลัพธ์ของสมการเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าของผลตอบแทน
6. จัดลำดับผลตอบแทนจากค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดไปแย่ที่สุด หลังจากนั้นทำการกำจัดผลตอบแทนที่แย่ที่สุดนั้นออกไปจากขนาดของความจำของลิฟท์ (EM) เพื่อปรับระดับและจำนวนของขนาดของความจำของลิฟท์ (EM) ให้มีขนาดเท่าเดิม
7. นำวิธีปรับปรุงจากสมการการเคลื่อนที่ของลิฟท์ทั้ง 3 แบบมาทำการปรับปรุงคำตอบตามเงื่อนไข โดยสร้างเลขสุ่ม R1 มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 ซึ่งการปรับปรุงคำตอบประกอบด้วย
 - 1) การเคลื่อนที่แบบที่ 1 กรณีที่ความน่าจะเป็น R1 อยู่ระหว่าง 0.66 - 1.00 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$S_2 = \left(\frac{1}{3a}\right) \left(\frac{V_{max}^3}{V_1} - V_1^2\right) + S_1 \quad (6)$$

$$New\ position\ X_w = Current\ position\ X_w + Rand() \times (2S_2 + (X_b - X_g)) \quad (7)$$

โดยที่ $V_1 = 0.6 * V_{max}$ และ $Rand()$ คือ ค่าความน่าจะเป็นมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1

- 2) การเคลื่อนที่แบบที่ 2 กรณีที่ความน่าจะเป็น R1 อยู่ระหว่าง 0.33 - 0.66 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (8) - (10)

$$V_2 = [V_1^3 + 3aV_1(\frac{S_T}{2} - S_1)]^{1/3} \quad (8)$$

$$S_2 = \left(\frac{1}{3a}\right) \left(\frac{V_2^3}{V_1} - V_1^2\right) + S_1 \quad (9)$$

$$New\ position\ X_w = Current\ position\ X_w + Rand() \times (2S_2) \quad (10)$$

3) การเคลื่อนที่แบบที่ 3 กรณีที่ความน่าจะเป็น R1 อยู่ระหว่าง 0 - 0.33 สามารถเขียนได้
 ดังสมการที่ (11) และ (12)

$$S_1 = \frac{v_1^2}{2a} \quad (11)$$

$$\text{New position } X_w = \text{Current position } X_w + \text{Rand}() \times (2S_1) \quad (12)$$

โดยที่ X_w คือ ค่าที่น้อยที่สุดในความจำของลิฟท์ (EM)

X_g คือ ค่าที่ดีที่สุดในความจำของลิฟท์ (EM)

X_b คือ ค่าที่ดีที่สุดในรอบการค้นหานั้น ๆ

8. แทนค่าปัจจัย (x) ลงในสมการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) จากนั้นนำมาคำนวณหา
 ค่าผลลัพธ์

9. จัดลำดับผลตอบสนองจากค่าผลตอบสนองที่ดีที่สุดไปน้อยที่สุด หลังจากนั้นทำการกำจัดผลตอบ
 สอนงที่แย่ที่สุดออกไปจากขนาดของความจำของลิฟท์ (EM) เพื่อปรับระดับและจำนวนของขนาดของ
 ความจำของลิฟท์ (EM) ให้มีขนาดเท่าเดิม

10. เปรียบเทียบค่าต่อไป จนครบตามจำนวนรอบที่ใช้ในการทดลอง

2.3 วิธีไรเตอร์

วิธีไรเตอร์เป็นอัลกอริทึมการค้นหาวิวัฒนาการที่ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมของกลุ่มผู้
 ขับขี่รถวิบากที่แข่งขันกันเพื่อไปถึงเป้าหมาย โดยมีขั้นตอนในการพัฒนาและปรับปรุงคำตอบ เริ่มต้นจาก
 วิธี ROA ได้จัดกลุ่มของการพัฒนาและปรับปรุงคำตอบไว้ทั้งหมด 4 กลุ่ม ประกอบด้วย 1) กลุ่ม Bypass
 Riders เป็นกลุ่มผู้นำในการหลบหลีกเส้นทาง 2) กลุ่ม Followers เป็นกลุ่มผู้ตามหลังผู้นำ 3) กลุ่ม Over-
 Takers เป็นกลุ่มผู้ไล่ตามจะมองหาจังหวะที่เหมาะสมในการแซงผู้นำ โดยพิจารณาตำแหน่งของผู้นำ และ
 4) กลุ่ม Attackers เป็นกลุ่มที่ใช้ความเร็วในการเบี่ยงทางนำหน้ากลุ่มตั้งแต่เริ่มแรก เพื่อสร้างช่องว่างและ
 ควบคุมจังหวะการแข่งขัน ซึ่งวิธีการ ROA จะกำหนดให้ผู้ขับขี่มอเตอร์ไซด์ในแต่ละกลุ่มมีกลยุทธ์ในการ
 พัฒนาคำตอบและหน้าที่ในแต่ละกลุ่มที่แตกต่างกัน [18]-[19] ซึ่งขั้นตอนประกอบด้วย

1. สร้างคำตอบเริ่มต้น

$$A_t = \{A_t(l, m)\}; 1 \leq l \leq R; 1 \leq m \leq Q \quad (13)$$

โดยที่ A_t คือ ค่าของคำตอบเริ่มต้น

R คือ จำนวนของผู้ขับขี่ทั้งหมด

$A_t(l, m)$ หมายถึง ผู้ขับขี่ลำดับที่ l ในช่วงเวลา t ของตัวแปร m

m คือ จำนวนของตัวแปร x_i ในสมการเงื่อนไขและสมการวัตถุประสงค์

Q คือ จำนวนตัวแปร x_i ทั้งหมด ดังแสดงในสมการที่ (13)

$$R = P + L + T + K \quad (14)$$

โดยที่ P คือ จำนวนของ bypass rider (คน)
 L คือ จำนวนของ follower rider (คน)
 T คือ จำนวนของ over-taker rider (คน)
 K คือ จำนวนของ attacker rider (คน)
 R คือ จำนวนของผู้ขับขี่ทั้งหมด ดังแสดงในสมการที่ (14)

ซึ่ง Binu และ Kariyappa [10] ได้แนะนำให้ใช้การแบ่งจำนวนของแต่ละกลุ่มตามสมการที่ (15)

$$P = L = T = K = R/4 \quad (15)$$

2. ค่ามุมบังคับเลี้ยว (Steering angle: S) ของผู้ขับขี่ ลำดับที่ i^{th} ในช่วงเวลา t ดังสมการที่ (16)

$$S_t = \{S_t^{i,j}\} \quad 1 \leq i \leq R; 1 \leq j \leq Q \quad (16)$$

โดยที่ $\{S_t^{i,j}\}$ คือ มุมบังคับเลี้ยวของผู้ขับขี่ ลำดับที่ i^{th} มุมเริ่มต้นสามารถกำหนดได้จากสมการที่ (17)

$$S_{i,j} = \begin{cases} \theta_i & \text{if } j = 1 \\ S_{i,j} + \varphi & \text{if } j \neq 1 \text{ and } S_{i,j-1} + \varphi \leq 360 \\ S_{i,j-1} + \varphi \leq 360 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

โดยที่ $\theta_i = i * \frac{360^\circ}{R}$ และ $\varphi = \frac{360}{Q}$

R คือ จำนวนของผู้ขับขี่ทั้งหมด

φ คือ มุมประสาน (Coordinate angles)

θ_i คือ ตำแหน่งของมุมประสานของผู้ขับขี่ ลำดับที่ i^{th}

3. ระบบเกียร์ (Gear) อัตรการเร่ง (Accelerator) และอัตรการเบรค (Brake) สามารถหาได้จากสมการที่ (18) - (20)

$$G = \{G_i\}; \text{ where } 1 < i < R \quad (18)$$

$$A = \{A_i\}; \text{ where } 1 < i < R \quad (19)$$

$$B = \{B_i\}; \text{ where } 1 < i < R \quad (20)$$

โดยที่ G_i คือ ระบบเกียร์ของผู้ขับขี่ลำดับที่ i^{th} มีค่าอยู่ระหว่าง $[0,1,2,3,4]$

A_i คือ อัตราการเร่งของผู้ขับขี่ลำดับที่ i^{th} มีค่าอยู่ระหว่าง $[0,1]$

B_i คือ อัตราการเบรกของผู้ขับขี่ลำดับที่ i^{th} มีค่าอยู่ระหว่าง $[0,1]$

4. ความเร็วสูงสุด (Maximum speed) ของผู้ขับขี่ลำดับที่ i^{th} ซึ่ง X_{max}^i คือระยะทางที่มากที่สุด แสดงได้ดังสมการที่ (21)

$$X_{max}^i = \frac{M_D^i - M_E^i}{T_{off}} \quad (21)$$

โดยที่ M_D^i คือ ค่าความเร็วสูงสุดของผู้ขับขี่ลำดับที่ i^{th}

M_E^i คือ ความเร็วต่ำสุด

T_{off} คือ ค่าเวลาที่มากที่สุดที่ผู้ขับขี่ถึงเป้าหมาย (จำนวนรอบการค้นหาทั้งหมด)

5. อัตราความเร็วของเกียร์ (Gear speed limit) คำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์ ได้ดังสมการที่ (22)

$$X_E^i = \frac{M_{max}^i}{|G|} \quad (22)$$

โดยที่ X_{max}^i คือ ความเร็วสูงสุดของผู้ขับขี่ลำดับที่ i^{th}

$|G|$ คือ จำนวนของเกียร์ ซึ่งกำหนดเป็นค่าคงที่

6. อัตราความสำเร็จ (Success rate) สมการทางคณิตศาสตร์ แสดงได้ดังสมการที่ (23)

$$S_r = \frac{1}{\|X_i - P_t\|} \quad (23)$$

โดยที่ X_i คือ ตำแหน่งของผู้ขับขี่ลำดับที่ i^{th}

P_t คือ เป้าหมายหรือค่าที่ดีที่สุดของวัตถุประสงค์

7. กลุ่ม Bypass rider มีค่าเท่ากับจำนวน P จากสมการที่ (24) ในการปรับปรุงคำตอบ

$$A_{t+1}^B(l, m) = \delta[A_t(d, m) * \beta(m) + A_t(\xi, m) * [1 - \beta(m)]] \quad (24)$$

โดยที่ (l, m) คือลำดับของผู้ขับขี่ลำดับที่ l^{th} ในกลุ่มของกลุ่ม bypass rider ในช่วงเวลาที่ $t + 1$ กับตัวแปร m

ค่าของ δ และ β คือ เลขสุ่มมีค่าอยู่ระหว่าง $[0,1]$ และค่าของ d และ ξ มีค่าอยู่ระหว่าง $[0,R]$ โดยที่ R จำนวนของผู้ขับขี่ทั้งหมด

8. กลุ่ม Followers จากสมการที่ (14) มีค่าเท่ากับ L สมาชิกในกลุ่มนี้ ใช้สมการที่ (25) ในการปรับปรุงคำตอบ

$$A_{t+1}^F(l, k) = A^E(E, k) + \cos[(T_{l,k}^t * A^E(E, k) * d_l^t] \quad (25)$$

โดยที่ (l, k) คือ ลำดับของผู้ขับขี่ลำดับที่ l^{th} ในกลุ่มของกลุ่ม Followers ในช่วงเวลาที่ $t + 1$ กับ ตัวแปร k

- k คือ จำนวนของตัวแปร x_i ในสมการเงื่อนไขและสมการวัตถุประสงค์
- A^E คือ ตำแหน่งของ bypass rider ลำดับที่ E^{th} กับตัวแปร k
- $T_{l,k}^t$ คือ มุมบังคับเลี้ยว l^{th} ของผู้ขับขี่ลำดับที่ k^{th}
- d_l^t คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของของผู้ขับขี่ลำดับที่ l^{th}
- v_l^t คือ ความเร็วของผู้ขับขี่ลำดับที่ l^{th}
- T_{off} คือ จำนวนรอบการค้นหาทั้งหมด ดังสมการที่ (26)

$$d_l^t = v_l^t * \left(\frac{1}{T_{off}}\right) \quad (26)$$

9. กลุ่ม Over-Taker เป็นการเคลื่อนที่โดยการอ้างอิงจากผู้ขับขี่เอง มีจำนวนผู้ขับขี่ เท่ากับ T จากสมการที่ (14) โดยการเคลื่อนที่แบบที่ 1 คำนวณได้ดังสมการที่ (27)

$$A_{t+1}^O(l, k) = A_t(l, k) + [D_l^I(l) * A^E(E, k)] \quad (27)$$

โดยที่ $A_{t+1}^O(l, k)$ คือ ค่าของคำตอบของผู้ขับขี่ l ลำดับที่ k^{th} ในกลุ่ม Over-taker

A^E คือ ตำแหน่งของ bypass rider ลำดับที่ E^{th} กับตัวแปร k

k คือ ลำดับของตัวแปร (x_i)

$D_l^I(l)$ คือ ทิศทางของผู้ขับขี่ ลำดับที่ l^{th} ซึ่ง $D_l^I(l)$ สามารถคำนวณจากสมการที่

(28)

$$D_l^I(l) = \left[\frac{2}{1 - \log(S_l^R(l))} \right] - 1 \quad (28)$$

โดยที่ $S_l^R(l)$ คือ ค่าของอัตราความสำเร็จของผู้ขับขี่ l

10. กลุ่ม Attackers เป็นกลุ่มผู้ไล่ตามจะมองหาจังหวะที่เหมาะสมในการแซงผู้นำ จะใช้ความเร็วที่มากที่สุดในการเคลื่อนที่ ดังสมการที่ (29)

$$A_{t+1}^A(l, k) = A^E(E, m) + [\cos(T_{i,m}^t) * A^E(E, m)] + d_t^i \quad (29)$$

โดยที่ $A_{t+1}^A(l, k)$ คือ ค่าของคำตอบของผู้ซัดที่ l ลำดับที่ k^{th} ในกลุ่ม Attackers
 $A^E(E, m)$ คือ ตำแหน่งของผู้นำหรือค่าที่ดีที่สุด
 $T_{i,m}^t$ คือ ค่ามุมบังคับเลี้ยว i^{th} ของผู้ซัดที่ลำดับที่ m

ระบบการปรับปรุงคำตอบจะทำต่อไปจนครบรอบการค้นหาที่กำหนด จึงหยุดการประมวลผลเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการทั้ง 3 วิธี ซึ่งประกอบด้วย วิธีผสมเกรสของดอกไม้ วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์ และวิธีโรเตอร์ คณะผู้วิจัยได้ใช้ปัญหา 2 ประเภท คือ ปัญหาที่มีเงื่อนไขและไม่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางทรัพยากรมาใช้ในการทดสอบ ซึ่งได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละวิธีการในการค้นหาคำตอบ

3. ปัญหาที่มีเงื่อนไขและไม่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางทรัพยากร

3.1 ปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางทรัพยากร (Unconstrained Problem: UP)

การแทนระบบการผลิตด้วยสมการที่ไม่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางทรัพยากร ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเลือกใช้ 8 สมการ โดยวิเคราะห์หาค่าผลตอบแทนที่สูงที่สุด (Maximization) โดยมีลักษณะกายภาพที่สำคัญประกอบด้วยสมการที่มีค่าที่สูงที่สุดเพียงจุดเดียว สมการที่มีค่าที่สูงที่สุดอยู่ ณ บริเวณขอบของพื้นที่ของสมการ สมการที่มีจุดที่สูงที่สุดหลายยอด และสมการแบบผสมผสาน โดยมีขอบเขตของปัจจัยระหว่าง $[-10, 10]$ ดังแสดงในสมการที่ (30) – (38) เพื่อเป็นการสร้างความแตกต่างในการทดลอง และเป็นการจำลองระบบการผลิตในหลายๆ รูปแบบโดยอยู่ภายในขอบเขตจำนวนปัจจัยเพียง 2 ปัจจัย [20] สมการที่ใช้ในการหาค่าผลตอบแทนที่สูงที่สุดประกอบด้วย

1. สมการพื้นผิวบรานิน (Branin Surface: UP1)

$$f(x) = -5 \log_{10} \left[\left(x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2} x_1^2 + \frac{5}{\pi} x_1 - 6 \right)^2 + \left(10 - \frac{5}{4\pi} \cos(x_1) \right) + 10 \right] \quad (30)$$

2. สมการพื้นผิวคาเมลแบค (Camelback Surface: UP2)

$$f(x) = 10 - \log_{10} \left[x_1^2 \left(4 - 2.1x_1^2 + \frac{1}{3}x_1^4 \right) + x_1x_2 + 4x_2^2(x_2^2 + 1) \right] \quad (31)$$

3. สมการพื้นผิวโกลด์สไตน์-ไพรส์ (Goldstein-Price Surface: UP3)

$$f(x) = 10 + \log_{10} \{ [1 + (1 + x_1 + x_2)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)] * [30 + (2x_1 - 3x_2)^2(18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)] \} \quad (32)$$

4. สมการพื้นผิวพาราโบลา (Parabolic Surface: UP4)

$$f(x) = 12 - \sum_{j=1}^k [(-x_j)^2 / 100] \quad (33)$$

5. สมการพื้นผิวราสทริจิน (Rastrigin Surface: UP5)

$$f(x) = 80 - [20 + \sum_{i=1}^n x_i^2 - 10(\sum_{i=1}^n \cos 2\pi x_i)] \quad (34)$$

6. สมการพื้นผิวโรเซนบร็อก (Rosenbrock Surface: UP6)

$$f(x) = 70 \left[\left(\left(20 - \left((-x_1/a_1)^2 + \sum_{j=2}^k [(x_j/a_j) - (x_1/a_1)^2]^2 \right) \right) + 150 \right) / 170 \right] + 10 \quad (35)$$

7. สมการพื้นผิวเชคเกิล (Shekel Surface: UP7)

$$f(x) = 100 \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i + \sum_{j=1}^k (x_j - a_{ij})^2} \quad (36)$$

8. สมการพื้นผิวสไตบลินสกี (Styblinski Surface: UP8)

$$f(x) = 275 - \left[\left(\frac{(x_1^4 - 16x_1^2 + 5x_1)}{2} \right) + \left(\frac{(x_2^4 - 16x_2^2 + 5x_2)}{2} \right) + \sum_{i=3}^5 (x_i - 1)^2 \right] \quad (37)$$

3.2 ปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางวิศวกรรม (Engineering Problems: EP)

1. ปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางวิศวกรรมที่ 1 (EP1)

นำเสนอโดย Pansare และ Kavade [21] ได้ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความหยาบของผิวในการกลึงเหล็กความสัมพัทธ์ระหว่างพารามิเตอร์การตัดและความหยาบผิวโดยใช้การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการความหยาบของผิวน้อยที่สุด ได้ตั้งสมการที่ (38) - (39)

$$\text{Minimize } R_a = f(A, B, C) \quad (38)$$

$$R_a = 8.11 - 0.0217 \cdot A - 25.9 \cdot B - 6.37 \cdot C + 0.0563 \cdot AC + 19.4 \cdot BC \quad (39)$$

โดยที่ค่า A หมายถึง ความเร็วเชิงเส้นของพื้นผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับใบมีดตัดในระหว่างกระบวนการกลึง มีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที (m/min) มีค่าอยู่ระหว่าง $150 \leq A \leq 250$ (m/min)

ค่า B หมายถึง ระยะทางที่ชิ้นงานจะเคลื่อนที่ผ่านในแนวระนาบต่อหนึ่งรอบของการหมุนในกระบวนการกลึง โดยมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อรอบหมุน (mm/rev) มีค่าอยู่ระหว่าง $0.1 \leq B \leq 0.2$ (mm/rev)

ค่า C หมายถึง ระยะทางในแนวตั้งที่ใบมีดตัดจะลึกเข้าไปในชิ้นงานในระหว่างกระบวนการกลึง โดยมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) มีค่าอยู่ระหว่าง $0.5 \leq C \leq 1.5$ (mm)

2. ปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางวิศวกรรมที่ 2 (EP2)

Shivakoti และคณะ [22] ได้ทำการทดลองกลึงชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยทำการออกแบบการทดลองโดยกำหนด อัตราป้อน (Feed rate) เป็นค่า A ความเร็วรอบเพลาสปินเดิล (Spindle speed) เป็นค่า B และความเร็วตัด (Cutting speed) เป็นค่า C พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกลึงมีผลกระทบต่ออัตราการเพิ่มอัตราการขจัดเนื้องาน (Material Removal Rate: MRR) ที่มากที่สุด สมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการคำนวณ MRR ได้ดังสมการที่ (40) - (44)

$$\text{Maximize } MRR = f(A, B, C) \quad (40)$$

$$MRR = 1.42 - 1.83 \cdot A - 0.9 \cdot B + 10 \cdot C + 103 \cdot AB - 112 \cdot AC + 0.000014 \cdot BC \quad (41)$$

โดยที่

$$0.62 \leq A \leq 0.98 \text{ (mm/rev)} \quad (42)$$

$$40 \leq B \leq 1,000 \text{ (rpm)} \quad (43)$$

$$3.5 \leq C \leq 95.5 \text{ (m/min)} \quad (44)$$

3. ปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางวิศวกรรมที่ 3 (EP3)

เป็นปัญหาการออกแบบสปริงที่มีสมการเป้าหมายที่ต้องการแรงที่น้อยที่สุด (Minimizing the weight of a tension/compression spring) โดยวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (45) และเงื่อนไขข้อจำกัดดังสมการที่ (46) - (52)

$$f(x) = (x_3 + 2)x_2x_1^2 \quad (45)$$

เงื่อนไขข้อจำกัดทางทรัพยากร

$$g_1 = 1 - \frac{x_2^3x_3}{71,785x_1^4} \leq 0 \quad (46)$$

$$g_2 = 4x_2^2 - \frac{x_1x_2}{12,566(x_2x_1^3 - x_1^4)} + \frac{1}{5,108x_1^2} - 1 \leq 0 \quad (47)$$

$$g_3 = 1 - \frac{140.45x_1}{x_2^2x_3} \leq 0 \quad (48)$$

$$g_4 = \frac{x_2 + x_1}{1.5 - 1} \leq 0 \quad (49)$$

$$0.05 \leq x_1 \leq 2.00 \quad (50)$$

$$0.25 \leq x_2 \leq 1.30 \quad (51)$$

$$2.00 \leq x_3 \leq 15.00 \quad (52)$$

4. ปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางวิศวกรรมที่ 4 (EP4)

ตัวแบบปัญหาตัวแบบปัญหาในการกลึงของเอ็มเมอร์ [23] มีวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนที่ต่ำที่สุดของการกลึงชิ้นงาน โดยมีสมการเป้าหมายดังสมการที่ (53) และวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (54) - (58)

$$\text{Min. Cost} = 1.25V^{-1}f^{-1} + 1.8 \times 10^{-8}V^3f^{0.16} + 0.2 \quad (53)$$

โดยมีสมการข้อจำกัดดังนี้:

$$1. \text{ ความเรียบของพื้นผิว } SF \leq 100 \mu \text{ inch} \quad (54)$$

$$\text{โดยที่ } SF \leq 1.36 \times 10^8 V^{-1.52} f^{1.004} \quad (55)$$

$$2. \text{ อัตราการป้อนชิ้นงาน } F \leq 0.01 \text{ inch/rev} \quad (56)$$

$$3. \text{ กำลังในการตัด } HP \leq 2.0 \text{ hp} \quad (57)$$

$$\text{โดยที่ } HP = 3.58V^{0.91}f^{0.78} \quad (58)$$

5. ปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางวิศวกรรมที่ 5 (EP5)

ตัวแบบปัญหาในการกลึงของเอ็มเมอร์และโครโมดีฮาโท [23] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนที่ต่ำที่สุดของการกลึงชิ้นงาน โดยมีสมการเป้าหมายและวัตถุประสงค์ดัง สมการที่ (59) - (62)

$$\text{Min. Cost} = 1.2566V^{-1}f^{-1} + 1.77 \times 10^{-8}V^3f^{0.16} + 0.2 \quad (59)$$

โดยมีสมการข้อจำกัดดังนี้

$$1. \text{ ความเรียบของพื้นผิว } SF \leq 50 \mu \text{ in} \quad (60)$$

$$\text{โดยที่ } SF \leq 204.62 \times 10^6 V^{-1.52} f^{1.004} D^{0.25} \quad (61)$$

$$2. \text{ อัตราการป้อนชิ้นงาน } F \leq 0.1 \text{ in/rev} \quad (62)$$

$$3. \text{ กำลังในการตัด } HP \leq 4.0 \text{ hp} \quad (63)$$

$$\text{โดยที่ } HP = 2.39V^{0.91}f^{0.78}d^{0.75} \quad (64)$$

4. สรุปผลและการอภิปรายผล

ผลของงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบกับโมเดลของปัญหาที่มีจำนวนปัจจัยอิสระ 2 ปัจจัย และการนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหามีเงื่อนไขข้อจำกัดทางทรัพยากร นำวิธีการต่าง ๆ ที่ได้มาสรุปเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อย โดยพิจารณาจากค่าของผลลัพธ์จาก 3 วิธีการ คือ ค่าเฉลี่ย (Average) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: Std. Dev.) จำแนกตามชนิดของปัญหาทั้งในกรณีการหาค่าที่สูงที่สุด (Maximization: Max) และการหาค่าที่ต่ำที่สุด (Minimization: Min) เวลาในการทดลอง (Time: t) และค่าอัตราส่วนเอสต่อเอ็น (S/N Ratio) สมการค่าอัตราส่วนเอสต่อเอ็น แสดงในตารางที่ 1 ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะผ่านการจำลองแก้ปัญห โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ VISUAL C# 2017 โดยทำการทดลองทั้งหมด 15 ครั้ง เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละวิธีพารามิเตอร์

(Parameters) ที่ใช้ในการทดลองของวิธีผสมเกสรของดอกไม้ ประกอบด้วย $n = 20$, $p = 0.8$ และ $\lambda = 1.5$ วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์ประกอบด้วย ค่า $EM = 20$ ค่า $a = 2$ ค่า $V_{max} = 2.5$ ค่า $THI = 20$ และ ค่า $PRC = 0.95$ และวิธีโรเตอร์ประกอบด้วย จำนวนคนขับ (R) = 20 ค่า gear G มีค่าเท่ากับ 5 ค่า accelerator A และ ค่า brake B มีค่าเป็นเลขสุ่มอยู่ระหว่าง $[0, 1]$ จำนวนวนซ้ำ (Iteration) ทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากับ 2000 รอบ ทำซ้ำ (Replication) 15 ครั้ง

ตารางที่ 1. วิธีการและสูตรคำนวณการเปรียบเทียบ S/N ratio

Methods	S/N ratio formulas	Optimization
Larger is better	$S/N = -10 \cdot \log(\sum(1/Y^2)/n)$	Maximization
Smaller is better	$S/N = -10 \cdot \log(\sum(Y^2)/n)$	Minimization

ตารางที่ 2. การเปรียบเทียบผลตอบสนองของ วิธี FPA วิธี EKO และวิธี ROA สำหรับสิ่งรบกวนมีค่าเท่ากับ 0

ปัญหา	ตัวชี้วัด	FPA	เวลา (วินาที)	EKO	เวลา (วินาที)	ROA	เวลา (วินาที)
UP1	Average	5.38	661.08	5.40	660.04	5.40	661.05
	Std. Dev.	0.07	2.65	0.00	0.08	0.00	2.66
	Max	5.40	667.66	5.40	660.31	5.40	667.66
	Min	5.12	660.00	5.40	659.98	5.40	659.98
	S/N ratio	14.61	-	14.65	-	14.65	-
UP2	Average	13.23	660.35	13.56	660.23	13.16	660.24
	Std. Dev.	0.68	0.59	0.77	0.57	0.75	0.57
	Max	14.76	662.10	14.98	662.10	14.76	662.10
	Min	12.64	660.00	12.64	659.98	12.40	659.98
	S/N ratio	22.42	-	22.61	-	22.36	-
UP3	Average	9.50	660.36	9.49	660.15	9.51	660.15
	Std. Dev.	0.02	0.61	0.02	0.59	0.02	0.59
	Max	9.52	662.05	9.52	662.05	9.52	662.05
	Min	9.46	660.00	9.46	659.35	9.46	659.35
	S/N ratio	19.55	-	19.55	-	19.56	-
UP4	Average	12.00	660.22	12.00	660.04	12.00	660.04
	Std. Dev.	0.00	0.52	0.00	0.22	0.00	0.22
	Max	12.00	661.90	12.00	660.73	12.00	660.73
	Min	12.00	659.60	12.00	659.60	12.00	659.60
	S/N ratio	21.58	-	21.58	-	21.58	-

ตารางที่ 2. (ต่อ) การเปรียบเทียบผลตอบสนองของ วิธี FPA วิธี EKO และ วิธี ROA สำหรับสิ่งรบกวนมีค่าเท่ากับ 0

ปัญหา	ตัวชี้วัด	FPA	เวลา (วินาที)	EKO	เวลา (วินาที)	ROA	เวลา (วินาที)
UP5	Average	99.99	660.38	99.95	660.26	99.90	660.01
	Std. Dev.	0.01	0.81	0.07	0.59	0.14	0.03
	Max	100.00	662.40	100.00	661.67	100.00	660.07
	Min	99.97	659.54	99.77	659.54	99.53	659.98
	S/N ratio	40.00	-	40.00	-	39.99	-
UP6	Average	80.00	660.20	80.00	660.08	80.00	660.00
	Std. Dev.	0.00	0.42	0.00	0.18	0.00	0.20
	Max	80.00	661.59	80.00	660.69	80.00	660.20
	Min	80.00	660.00	80.00	659.98	80.00	659.30
	S/N ratio	38.06	-	38.06	-	38.06	-
UP7	Average	18.98	660.25	18.98	660.24	18.98	659.99
	Std. Dev.	0.00	0.39	0.00	0.40	0.00	0.02
	Max	18.98	661.23	18.98	661.23	18.98	660.05
	Min	18.97	659.99	18.98	659.98	18.98	659.98
	S/N ratio	25.57	-	25.57	-	25.57	-
UP8	Average	353.33	660.37	353.32	660.04	353.33	660.04
	Std. Dev.	0.00	0.60	0.01	0.07	0.00	0.22
	Max	353.33	661.75	353.33	660.21	353.33	660.72
	Min	353.33	660.04	353.28	659.98	353.32	659.61
	S/N ratio	50.96	-	50.96	-	50.96	-

ตารางที่ 3. การเปรียบเทียบผลตอบสนองของ วิธี FPA วิธี EKO และวิธี ROA สำหรับสิ่งรบกวนมีค่าเท่ากับ 1

ปัญหา	ตัวชี้วัด	FPA	เวลา (วินาที)	EKO	เวลา (วินาที)	ROA	เวลา (วินาที)
UP1	Average	4.33	660.10	4.45	660.07	4.71	660.09
	Std. Dev.	0.42	0.13	0.46	0.12	0.53	0.13
	Max	5.37	660.40	5.38	660.40	5.40	660.40
	Min	4.01	660.00	4.01	660.00	4.01	660.00
	S/N ratio	12.67	-	12.88	-	13.34	-
UP2	Average	9.66	661.27	9.70	661.22	10.38	661.19
	Std. Dev.	0.73	3.36	0.82	3.37	1.16	3.39
	Max	12.24	672.70	12.64	672.70	12.68	672.70
	Min	9.03	660.00	9.04	659.98	9.42	659.38
	S/N ratio	19.65	-	19.67	-	20.22	-

ตารางที่ 3. (ต่อ) การเปรียบเทียบผลตอบสนองของ วิธี FPA วิธี EKO และวิธี ROA สำหรับสิ่งรบกวนมีค่าเท่ากับ 1

ปัญหา	ตัวชี้วัด	FPA	เวลา (วินาที)	EKO	เวลา (วินาที)	ROA	เวลา (วินาที)
UP3	Average	8.99	662.01	9.14	660.06	9.15	660.20
	Std. Dev.	0.39	4.72	0.25	0.25	0.30	0.13
	Max	9.50	674.90	9.50	660.53	9.50	660.53
	Min	8.35	660.07	8.54	659.35	8.67	659.98
	S/N ratio	19.06	-	19.21	-	19.22	-
UP4	Average	11.90	660.23	11.91	660.10	11.91	660.20
	Std. Dev.	0.11	0.53	0.01	0.17	0.03	0.49
	Max	11.99	661.90	11.92	660.47	12.00	661.90
	Min	11.52	659.60	11.90	660.00	11.86	659.98
	S/N ratio	21.51	-	21.52	-	21.52	-
UP5	Average	99.20	661.38	99.22	661.13	99.17	661.31
	Std. Dev.	1.49	3.73	1.44	3.72	1.11	3.75
	Max	99.93	674.57	99.93	674.57	99.93	674.57
	Min	95.28	660.00	95.48	659.98	96.28	659.98
	S/N ratio	39.93	-	39.93	-	39.93	-
UP6	Average	79.88	660.88	79.89	660.20	79.89	660.87
	Std. Dev.	0.11	1.84	0.11	0.66	0.12	1.84
	Max	79.94	665.89	79.94	662.58	79.99	665.89
	Min	79.51	660.00	79.51	659.98	79.51	659.98
	S/N ratio	38.05	-	38.05	-	38.05	-
UP7	Average	18.86	660.04	18.96	660.01	18.82	660.03
	Std. Dev.	0.25	0.03	0.03	0.02	0.24	0.04
	Max	18.98	660.11	18.98	660.05	18.98	660.11
	Min	18.05	660.00	18.85	659.98	18.05	659.98
	S/N ratio	25.51	-	25.56	-	25.49	-
UP8	Average	353.12	660.06	353.32	660.04	352.98	660.01
	Std. Dev.	0.36	0.09	0.01	0.08	0.40	0.13
	Max	353.33	660.30	353.33	660.30	353.33	660.21
	Min	352.20	660.00	353.30	659.98	352.20	659.61
	S/N ratio	50.96	-	50.96	-	50.95	-

จากผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลตัวอย่างและค่าอัตราส่วนเอสต่อเอ็น ผ่านทั้ง 8 สมการพื้นผิวตอบสนอง ทั้งในกรณีสมการที่มีค่าที่สูงที่สุดเพียงจุดเดียว สมการที่มีจุดที่สูงที่สุดหลายจุด สมการที่มีค่าที่สูงที่สุดอยู่ ณ บริเวณขอบของพื้นที่ของสมการ พบว่า ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดที่ได้ภายใต้สิ่งรบกวนที่มีการแจกแจงปกติ (Normal distribution) ที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0 ในตารางที่ 2 และมีค่าเท่ากับ 1 ในตารางที่ 3 มีแนวโน้มของค่าตอบ

ที่เหมือนการในแต่ละสมการมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งในส่วนของค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เวลาในการทดลองและค่าอัตราส่วนเอสต่อเอ็น โดยสมการพื้นผิวคาเมลแบค วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์สามารถหาค่าได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น แต่ในส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิธีผสมเกรสของดอกไม้ สามารถค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยกว่าวิธีการอื่น แต่พิจารณาโดยรวมวิธีไรเตอร์ให้ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าอัตราส่วนเอสต่อเอ็น ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการทั้ง 2 วิธี เมื่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเพิ่มขึ้นในตารางที่ 3 พบว่า ค่าเฉลี่ยมีแนวโน้มที่ลดลง และส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเพิ่มขึ้นในแต่ละวิธี เพราะการรบกวนระบบการค้นหาคำตอบของแต่ละวิธี โดยใส่ค่าการแจกแจงปกติ ที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1 เข้าไปในระบบ ทำให้คำตอบมีค่าที่ไม่ตรงกับความเป็นจริง ซึ่งแต่ละวิธีสามารถรักษาเสถียรภาพในการค้นหาคำตอบที่ดีโดยพิจารณาโดยรวม วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าวิธีการอื่น แต่วิธีไรเตอร์ให้ค่าเฉลี่ยและค่าอัตราส่วนเอสต่อเอ็นที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการทั้ง 2 วิธี

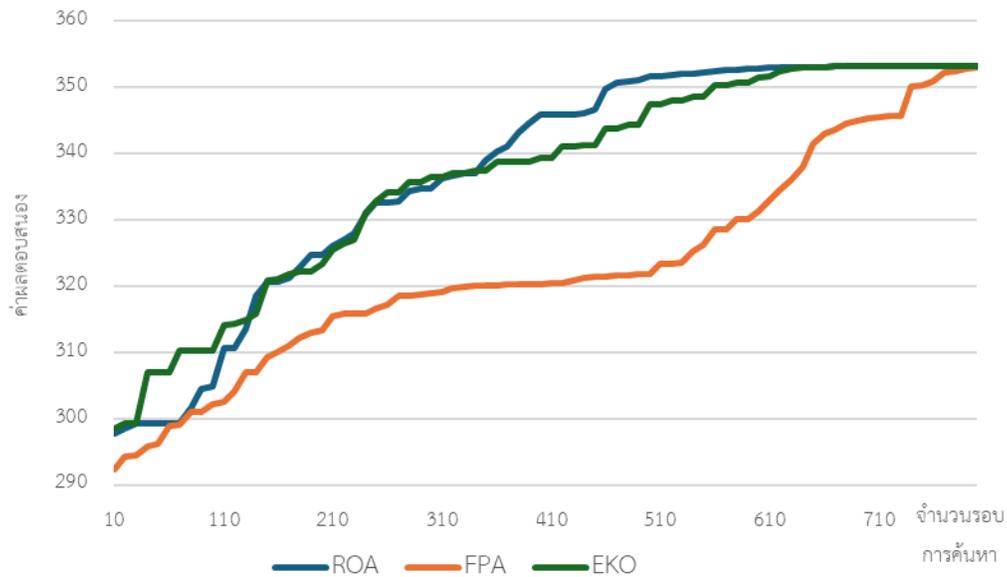
ตารางที่ 4. การเปรียบเทียบผลตอบสนองของ วิธี FPA วิธี EKO และวิธี ROA สำหรับปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางวิศวกรรม

Model	ตัวชี้วัด	FPA	time	EKO	time	ROA	time
EP1	Average	1.50	759.34	1.50	762.41	1.50	763.81
	Std. Dev.	0.00	13.00	0.00	8.30	0.00	12.50
	Max	1.50	779.97	1.50	774.87	1.50	777.95
	Min	1.49	741.83	1.49	749.97	1.49	741.68
	S/N ratio	-3.50	-	-3.50	-	-3.52	-
EP2	Average	3.79	760.94	3.59	760.48	3.55	761.14
	Std. Dev.	0.17	12.18	0.11	13.38	0.08	11.63
	Max	4.05	778.68	3.88	779.32	3.80	778.95
	Min	3.56	739.97	3.50	739.69	3.50	741.84
	S/N ratio	-11.56	-	-11.10	-	-10.99	-
EP3	Average	3300.90	1391.73	3370.85	1417.52	3258.88	1337.59
	Std. Dev.	98.25	136.72	3.65	55.96	159.74	136.59
	Max	3374.68	1540.47	3376.62	1568.18	3365.66	1585.33
	Min	3031.69	1218.52	3361.27	1272.14	2814.06	1238.39
	S/N ratio	-70.36	-	-70.55	-	-70.23	-
EP4	Average	7.11	904.06	7.01	895.76	7.12	900.85
	Std. Dev.	0.27	6.00	0.23	24.83	0.31	3.12
	Max	7.74	919.19	7.59	919.19	7.63	907.55
	Min	6.81	895.48	6.61	810.19	6.48	896.23
	S/N ratio	-17.03	-	-16.90	-	-17.03	-

ตารางที่ 4. (ต่อ) การเปรียบเทียบผลตอบสนองของ วิธี FPA วิธี EKO และวิธี ROA สำหรับปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางวิศวกรรม

Model	ตัวชี้วัด	FPA	time	EKO	time	ROA	time
EP5	Average	1.66	1153.58	1.68	1106.68	1.62	1030.08
	Std. Dev.	0.03	124.09	0.06	100.47	0.03	25.04
	Max	1.70	1412.95	1.80	1424.68	1.69	1094.23
	Min	1.60	1043.02	1.60	1001.39	1.59	1010.08
	S/N ratio	-4.38	-	-4.51	-	-4.19	-

ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลตัวอย่าง ค่ามากที่สุด ค่าน้อยที่สุด และค่า S/N ratio จากทั้ง 3 วิธี ในตารางที่ 4 พบว่าปัญหาที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางวิศวกรรมที่ 1- 5 วิธีโรเตอร์นั้น มีความสามารถในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมากที่สุด และใช้เวลาในการค้นหาค่าตอบอยู่ในระดับกลาง



รูปที่ 2. การลู่เข้าหาค่าตอบของ วิธี FPA วิธี EKO และวิธี ROA สำหรับปัญหา UP8

นอกจากนั้นการประเมินและทดสอบประสิทธิภาพของวิธีเมตาฮิวริสติก 3 วิธีการ วิธีโรเตอร์มีระบบการปรับปรุงค่าตอบให้ผลตอบสนองที่ดีมากกว่าวิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์ และวิธีผสมเกสรของดอกไม้ เพราะมีการแบ่งกลุ่มการพัฒนาค่าตอบเป็น 4 กลุ่ม กลุ่ม Bypass Riders กลุ่ม Followers กลุ่ม Over-Takers และกลุ่ม Attackers ซึ่งทำให้โอกาสในการพัฒนาค่าตอบมีมากกว่าวิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์ที่มีการแบ่งรูปแบบการพัฒนาค่าตอบ 3 รูปแบบ และวิธีผสมเกสรของดอกไม้ที่พัฒนาค่าตอบ โดยใช้หลักการของการผสมเกสรเฉพาะที่ และการผสมเกสรแบบวงกว้าง ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบในการพัฒนาค่าตอบของวิธีโร

เดอร์ จากรูปที่ 2 แสดงรูปการลู่เข้าหาคำตอบของทั้ง 3 วิธี สำหรับปัญหาสมการพหุนามดีกรีสาม พบว่าวิธีโรเตอร์สามารถลู่เข้าหาคำตอบได้รวดเร็วกว่าวิธีการอื่น เพราะมีการพัฒนาคำตอบในหลากหลายสมการและหลากหลายรูปแบบ จึงเป็นข้อดีของวิธีการโรเตอร์ ในงานวิจัยของ Mahdavi และคณะ [24] พบว่าค่าพารามิเตอร์ของแต่ละวิธีการมีผลต่อการปรับปรุงคำตอบอย่างมาก ดังนั้นการปรับค่าพารามิเตอร์ในบางปัญหาหรือในบางระบบ วิธีการเคลื่อนที่ของลิฟท์และวิธีผสมเกสรของดอกไม้ อาจสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมกว่าวิธีโรเตอร์ก็เป็นได้ สำหรับงานวิจัยในอนาคตทางคณะผู้วิจัยขอแนะนำให้ทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละวิธีโดยใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการทั้ง 3 วิธี กับปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น ปัญหาการจัดตารางการผลิต ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง ปัญหาการออกแบบทางวิศวกรรม และปัญหาการวางแผนการผลิตรวม [25] รวมถึงวิธีการผสมผสาน (Hybridization) กับวิธีการอื่นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของวิธีการทางเมตาฮิวริสติกให้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ปีงบประมาณ 2565

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Hao, J.K. and Solnon, C. 2020. Metaheuristics and artificial intelligence. In *A Guided Tour of Artificial Intelligence Research*. Springer, Berlin, 27–52.
- [2] Kaveh, M. and Mesgari, M.S. 2023. Application of metaheuristic algorithms for training neural networks and deep learning architectures: a comprehensive review. *Neural Processing Letters*, 55, 4519–4622, <https://doi.org/10.1007/s11063-022-11055-6>.
- [3] Pavai, G. and Geetha, T.V. 2019. New crossover operators using dominance and co-dominance principles for faster convergence of genetic algorithms. *Soft Computing*, 23, 3661–3686, <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3016-1>.
- [4] Storn, R. and Price, K. 1997. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359.
- [5] Kennedy, J. and Eberhart, R. 1995. Particle Swarm Optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948.
- [6] Dorigo, M., Maniezzo, V. and Coloni, A. 1996. Ant system: optimisation by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B*, 26, 29–41, <http://doi.org/10.1109/3477.484436>.
- [7] Hansen, P., Mladenović, N. and Moreno Pérez, J.A. 2008. Variable neighbourhood search. *Metaheuristic procedures for training neural networks methods and applications*, 319–360, <https://doi.org/10.1007/s10288-008-0089-1>.

- [8] Yang, X.S. 2012. Flower pollination algorithm for global optimization. *lecture notes in computer science*, 7445, 240-249.
- [9] Luangpaiboon, P., Aungkulanon, P., Ruekksaem, L. and Montemanni, R. 2022. An elevator kinematics optimization algorithm based on a large neighborhood search for optimizing simulated industrial problems. Proceedings of the 2022 9th International Conference on Industrial Engineering and Applications (Europe) (ICIEA-2022-Europe). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 92–97.
- [10] Binu, D. and Kariyappa, B.S. 2019. RideNN: A new rider optimization algorithm-based neural network for fault diagnosis in analog circuits. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(1), 2–26, <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2836058>.
- [11] Glover, F. and Kochenberger, G.A. 2003. Handbook of metaheuristics. Springer New York, New York.
- [12] Bandyopadhyay, D. 2008. A simulated annealing-based multi objective optimization algorithm: AMOSA. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(3), 269-283, <https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.900837>.
- [13] Cvijovic, D. and Klinowski, J. 1995. Taboo search: an approach to the multiple minima problem. *Science*, 267, 664-666, <https://doi.org/10.1126/science.267.5198.664>.
- [14] Yang, X.S. 2014. Nature Inspired Optimisation Algorithm. Elsevier Inc., London.
- [15] Kumpanya, D. 2018. Parameter identification of DC motor model by flower pollination algorithm. *RMUTSB ACADEMIC JOURNAL*, 6(2), 207-219.
- [16] Aungkulanon, P., Luangpaiboon, P. and Montemanni, R. 2018. An elevator kinematics optimisation method for aggregate production planning based on fuzzy MOLP model. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 7(4), 422-427, <https://doi.org/10.18178/ijmerr.7.4.422-427>.
- [17] Luangpaiboon, P. and Juttijudata, S. 2023. Adaptive elevator kinematics optimization based dual response algorithm for determining proper levels in plaster milling process parameters. *Scientific Reports*, 13, 8855, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35119-2>.
- [18] Wang, G., Yuan, Y. and Guo, W. 2019. An improved rider optimization algorithm for solving engineering optimization problems. *IEEE Access*, 7, 80570–80576, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923468>.
- [19] Kumar, R., Rohitash, K. and Banyal. 2021. Rider Optimization Algorithm (ROA): An optimization solution for engineering problem. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 12(12), 3197-3201, <https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i12.7994>.
- [20] Chai-Ead, N., Aungkulanon, P. and Luangpaiboon, P. 2012. Nature-Inspired Algorithms of Bees, Firefly and Bat for Noisy Non-Linear Optimisation Problems. *IAENG Transactions on Engineering Technologies*, 7, 62-77.

- [21] Pansare, V.B. and Kavade, M.V. 2012. Optimization of cutting parameters in multipass turning operation using ant colony algorithm. *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*, 2(4), 955-960, https://doi.org/10.1142/9789814390019_0005.
- [22] Shivakoti, I., Diyaley, S., Kibria, G. and Pradhan, B.B. 2012. Analysis of Material Removal Rate using Genetic Algorithm Approach. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(5), 1-6.
- [23] Khan, Z., Prasad, L.B. and Singh, T. 1997. Machine Condition Optimisation by Genetic Algorithms and Simulated. *Computers & Operations Research*, 24(7), 647-657, [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(96\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(96)00077-9).
- [24] Mahdavi, M., Fesanghary, M. and Damangir, E. 2007. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*. 188(2), 1567-1579, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.11.033>.
- [25] Ruekkasaem, L. and Aungkulanon, P. 2020. Comparison of forecasting methods for Aggregate Production Planning in Cleanroom Apparel Factory. *Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology)*, 15(1), 86-100.

มอนต์มอริลโลไนต์-อัลจิเนตเจลสำหรับ
การดูดซับและการคายการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51
Montmorillonite-Alginate Gel for
Basic Red 51 Adsorption and Desorption

ดวงดาว พันอัน¹ ปภาวรินทร์ เรืองฤทธิ์¹ ศักดิ์สิทธิ์ ชื่นชมณาจาด² และ ดวงรัตน์ ทองคำ^{1*}

Duongdaw Pun-on¹ Papawarin Ruangrit¹ Saksit Chuenchomnakjad² and Duangrat Thongkum^{1*}

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก ประเทศไทย

²สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก
จ.พิษณุโลก ประเทศไทย

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

²Program of Industrial Education and Technology, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 12 ตุลาคม 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 25 กันยายน 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 27 กันยายน 2567

Received: 12 October 2023, Revised: 25 September 2024, Accepted: 27 September 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์เม็ดโซเดียมอัลจิเนตเจลที่ผสมด้วยแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์จำนวน 6 สูตร เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51 โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณของเม็ดเจล เวลาในการดูดซับ ค่าพีเอชเริ่มต้น และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ติดตามความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิคยูวี-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี พบว่าสูตรที่ 6 กำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 97.05 จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมฟรุนดลิช จากนั้นใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมมอนต์มอริลโลไนต์สูตรที่ 6 ก่อนและหลังการดูดซับ นอกจากนี้จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับแก๊สไนโตรเจนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller และเทลเลอร์ พบไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับเป็นแบบที่ IV รูพรุนส่วนใหญ่มีขนาดกลาง และจากการศึกษาการคายการดูดซับของเม็ดเจล พบว่าสูตรที่ 3 คายการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51 ได้ร้อยละ 36.75 โดยใช้สารละลายน้ำกับเอทานอล (70:30) และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น

คำสำคัญ : การดูดซับ การคายการดูดซับ เบสิคเรด 51 มอนต์มอริลโลไนต์ อัลจิเนต

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: duangratth@nu.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.260894>

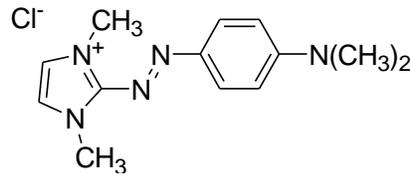
Abstract

This research focused on the synthesis of the 6 formulas of sodium alginate gel bead mixed with montmorillonite clay mineral to be used for Basic red 51 dye adsorption. The influencing factors for the adsorption were studied such as the gel bead dosage, adsorption time, initial pH, and initial concentration of dye. The concentrations of residual dye in solution were followed up by UV-vis spectroscopy. The removal efficiency of formula 6 was 97.05%. The adsorption kinetic was best fitted to pseudo-second-order reaction and the adsorption isotherm confirmed Freundlich. Then Fourier transform infrared spectroscopy technique was used to characterize the functional group of formula 6 of sodium alginate gel bead modified with montmorillonite before and after adsorption. Moreover, the adsorption-desorption isotherms of N₂ gas were studied by Brunauer, Emmett and Teller technique, can be classified to type IV, indicates some degree of mesoporosity. From the desorption studies, it was found that the desorption of Basic red 51 dye from formula 3 gel beads was 36.75% using water and ethanol solution (70:30) and concentrated hydrochloric acid.

Keyword: Adsorption, Desorption, Basic red 51, Montmorillonite, Alginate

1. บทนำ

สีย้อมเบสิคเรด 51 (Basic red 51 หรือ 2-[2-[4-(Dimethylamino)phenyl]diazenyl]-1,3-dimethyl-1H-imidazolium chloride หรือ BR51) จัดเป็นสีย้อมสังเคราะห์ที่มีหมู่เอโซอะโรมาติกภายในโครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 1 ละลายน้ำได้ดี นิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในแชมพู ครีมนวด หรือผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผม มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงละเอียดสีม่วงอมน้ำเงิน เมื่อละลายน้ำให้สีแดงสดหรือสีแดงทับทิม [1] และจากข้อมูลการชี้บ่งอันตราย (Hazard identification) ได้มีรายงานเกี่ยวกับความเป็นพิษ โดยเป็นสารที่ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและดวงตาอย่างรุนแรง เป็นพิษร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และส่งผลกระทบต่อยาวนาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมชนิดนี้ก่อนทิ้ง ซึ่งปัจจุบันมีวิธีการบำบัดน้ำทั้งหลายวิธี ได้แก่ แบบชีวภาพ การสลายตัวด้วยแสง การดูดซับ ฯลฯ โดยการดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง เรียบง่าย ต้นทุนต่ำ มีความรวดเร็ว และสามารถแยกตัวดูดซับออกจากสารละลายได้ง่าย [2]



รูปที่ 1. โครงสร้างของสีย้อมเบสิคเรด 51

แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์เป็นวัสดุดูดซับชนิดหนึ่งที่ยิมนำมาใช้ในการดูดซับสีย้อมชนิดประจุบวก เนื่องจากมีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี มีพื้นที่ผิวสูง ไม่เป็นพิษ ไม่ก่อภูมิแพ้ มีราคาถูก โดยโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่น และแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น มีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิว มีไอออนประจุบวกแทรกระหว่างชั้นได้ และมีช่องว่างระหว่างชั้นจากการที่มีแรงกระทำระหว่างชั้นแบบอ่อน ๆ ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปแทรกได้ ส่งผลให้เกิดการบวมตัว [3]-[4] ตัวดูดซับอีกชนิดที่จะกล่าวถึง คือ อัลจินเนต (Alginate) ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ นิยมใช้เป็นวัสดุดูดซับเนื่องจากมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โครงสร้างประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดประจุลบที่ได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล สามารถรวมตัวอยู่ในรูปไฮโดรเจล (Hydrogel) มีลักษณะเป็นโครงข่ายสามมิติโดยการเชื่อมขวางแบบไอออนกับไอออนของโลหะ เช่น Ca^{2+} เป็นวัสดุดูดซับที่มีน้ำหนักเบา โครงสร้างมีความยืดหยุ่นสูง ทนความร้อน และสามารถกักเก็บของเหลวได้ดี โดยจากงานวิจัยของ Edathil และคณะ [5] ได้สังเคราะห์วัสดุดูดซับในรูปไฮโดรเจลที่มีแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้ ในปี ค.ศ. 2020 Tao และคณะ [6] ได้มีการสังเคราะห์เม็ด GO-MT/SA ใช้ในการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่ามีปริมาณการดูดซับ 150.66 mg/g และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 98.2 และในปีเดียวกัน Zhang และคณะ [7] มีการศึกษาเกี่ยวกับ $Fe_3O_4@HCO/SA$ ที่ใช้ในการดูดซับ Sb(III) มีปริมาณการดูดซับที่ 5-60 mg/g และค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดที่ 80-96 และในปี ค.ศ. 2021 Zhang และคณะ [8] ได้ใช้เม็ด MXene/SA ดูดซับเมทิลีนบลู พบว่ามีปริมาณการดูดซับอยู่ที่ 92.17 mg/g และค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 81.36 แต่ยังไม่พบงานวิจัยที่ใช้วัสดุดูดซับชนิดนี้ดูดซับสีย้อม BR51 หรือสีย้อมในกลุ่มผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผม

การนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ซ้ำเป็นการใช้ทรัพยากรให้คุ้มค่า เพราะการใช้ครั้งเดียวทำให้เกิดขยะมากเกินจำเป็น และสูญเสียทรัพยากรในการผลิตวัสดุเหล่านี้ซ้ำเพื่อใช้เพิ่มเติมอีกด้วย วิธีการคายการดูดซับจึงเป็นการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับที่เริ่มหมดสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย ประหยัดเวลาและลดต้นทุน โดย Fang และคณะ [9] ได้ศึกษาการคายการดูดซับของเมทิลีนบลูบนเซลลูโลสของกากหัวผักกาดฝรั่ง/ไซเตียมอัลจินเนต/เหล็กไฮดรอกไซด์คอมโพสิตไฮโดรเจล (C/SA/Fe) และ Bayram และคณะ [10] ได้ศึกษาการนำแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate) กลับมาใช้ใหม่ โดยล้างด้วยเอทานอล พบว่าสามารถนำมาดูดซับเบสิคเรด 13 (Basic red 13) ได้ 3 ครั้ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสีย้อมเบสิคเรด 51 ที่ทำให้เกิดมลพิษทางน้ำโดยใช้วิธีการดูดซับและศึกษาวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำ โดยผสมผงแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์กับไซเตียมอัลจินเนตแล้วนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการที่ง่ายให้เป็นเม็ดเจล เพื่อความสะดวกในการใช้งานและการเก็บ

กลับมาใช้ซ้ำ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ พิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี วัดพื้นที่ผิวจำเพาะ และความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค BET surface area (Surface area and porosity analyzer: BET) และติดตามความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis Spectrophotometer)

2. วิธีการทดลอง

การสังเคราะห์เม็ดโซเดียมอัลจิเนต การพิสูจน์เอกลักษณ์ การศึกษาการดูดซับและการคายการดูดซับ มีวิธีการดังนี้

2.1 สารเคมี

1. โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate: SA) MW = 216.12 g/mol จาก Nerdy Gummy
2. มอนต์มอริลโลไนต์ K-10 (Montmorillonite K-10: MT) จาก Sigma-Aldrich
3. สีย้อม Basic Red 51 (BR51) MW = 279.77 g/mol จาก MySkinRecipes/Cosmetic Ingredient
4. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride: CaCl₂) MW = 147.02 g/mol จาก LOBA CHEMIE PVT. LTD.
5. ไฮโดรคลอริก (Hydrochloric: HCl) 37% MW = 36.50 g/mol AR grade จาก CARLO ERBA Reagents
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide: NaOH) MW = 40.00 g/mol จาก Ajax Finechem Pty. Ltd.

2.2 การสังเคราะห์เม็ดโซเดียมอัลจิเนตและแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

เตรียมสารละลาย SA ผสมแร่ดินเหนียว MT โดยชั่ง SA และแร่ดินเหนียว MT ในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 ละลายในน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง 50 mL คนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายที่ได้บรรจุในกระบอกฉีดยา (Syringe) ขนาด 1 mL แล้วหยดลงในสารละลาย CaCl₂ (3% wt) โดยคนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองแบบสุญญากาศ แล้วล้างเม็ดด้วยน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง ซับให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของเม็ด สูตรที่ 1-6 ด้วยเวอร์เนีย (Vernier caliper) ขนาด 150x0.02 mm

ตารางที่ 1. อัตราส่วนของโซเดียมอัลจิเนตและมอนต์มอริลโลไนต์ สูตรที่ 1-6

สูตร	SA (g)	MT (g)
1 (SA-M1)	1.00	0.00
2 (SA-M2)	1.00	0.10
3 (SA-M3)	1.00	0.20
4 (SA-M4)	1.00	0.40
5 (SA-M5)	1.00	1.00
6 (SA-M6)	1.00	2.00

2.3 การศึกษาการดูดซับของเม็ดโซเดียมอัลจินเตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์สูตร 1-6

2.3.1 การศึกษาปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการดูดซับเบสิคเรด 51

เตรียมสารละลายสี้อมเบสิคเรด 51 ในน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูงให้มีความเข้มข้น 100 ppm แล้วเจือจางให้มีความเข้มข้น 7 ppm หลังจากนั้นเปิดสารละลายสี้อม 25 mL ใส่ลงในภาชนะจำนวน 6 ขวด นำเม็ดโซเดียมอัลจินเตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ สูตร 1-6 สูตรละ 25 เม็ด ใส่ลงในสารละลายสี้อม เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 rpm ทำซ้ำ 3 ครั้ง วัดความเข้มข้นของสี้อมที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ($\lambda_{\max}=524$ nm) นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาปริมาณการดูดซับ (q_t) และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสี้อม (Percentage of removal efficiency: %R) ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$q_t = \frac{(C_i - C_t)V}{M} \quad (1)$$

$$\%R = \frac{C_i - C_t}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

q_t คือ ปริมาณของสี้อมที่ดูดซับ ณ เวลา t (mg/g)

C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อมในสารละลาย (mg/L)

C_t คือ ความเข้มข้น ณ เวลา t ของสี้อมในสารละลาย (mg/L)

V คือ ปริมาตรของสารละลายสี้อม (L)

M คือ มวลของตัวดูดซับ (g)

ต่อจากนั้นนำสูตรที่ดีที่สุดมาศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ โดยทุกปัจจัยจะใช้เม็ด SA-M6 สารละลายสี้อมความเข้มข้น 7 ppm (ยกเว้นปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้น) 25 mL เขย่าที่ 150 rpm เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ยกเว้นปัจจัยด้านเวลา) ดังนี้

ปัจจัยด้านปริมาณของเม็ดโซเดียมอัลจินเตผสมมอนต์มอริลโลไนต์ ใช้เม็ด SA-M6 จำนวน 5, 15, 25, 35 และ 45 เม็ด ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการดูดซับสี้อมที่เวลา 0, 1, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ปัจจัยของค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ นำสารละลายสี้อมมาทำการปรับค่า pH ด้วย NaOH 0.1 M และ HCl 0.1 M ให้มีค่า pH เริ่มต้น 1, 3, 6, 9 และ 12 ปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี้อมใช้ความเข้มข้น 3, 5, 7, 10 และ 12 ppm แล้วปรับค่า pH ให้เป็น 12 ทุกปัจจัยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำสารละลายสี้อมหลังจากทำการดูดซับด้วยเม็ด SA-M6 ทุกครั้งไปวัดความเข้มข้นของสี้อมที่เหลืออยู่ในสารละลาย

2.3.2 จลนศาสตร์การดูดซับ

นำผลการทดลองจากการดูดซับสีย้อมที่เวลา 1, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มาสร้างกราฟเส้นตรงตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order) ดังสมการที่ (3) และกราฟเส้นตรงตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order) ดังสมการที่ (4)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k_1}{2.303}\right)t \quad (3)$$

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

เมื่อ

q_e คือ ปริมาณในการดูดซับสีย้อม ณ เวลาสมดุล (mg/g)

q_t คือ ปริมาณในการดูดซับสีย้อม ณ เวลาใด ๆ (mg/g)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (min^{-1})

k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม (min^{-1})

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อม (min)

2.3.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

นำผลการทดลองจากปัจจัยด้านความเข้มข้นในการดูดซับของเม็ด SA-M6 หลังการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 3, 5, 7, 10 และ 12 ppm มาสร้างกราฟ Nonlinear ของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ตามสมการที่ (5) และกราฟ Nonlinear ของฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ตามสมการที่ (6)

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (5)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (6)$$

เมื่อ

q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (mg/g)

q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)

K_L คือ ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (L/mg)

K_F คือ ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช ($(\text{mg/g})/(\text{mg/L})^{1/n}$)

C_e คือ ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (mg/L)

n คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิช

2.4 การศึกษาโครงสร้างก่อนและหลังการดูดซับของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมมอนต์มอริลโลไนต์

2.4.1 ศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เตรียมโซเดียมอัลจิเนต สีย้อมเบสึครเรต 51 แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ เม็ดเจลก่อนและหลังการดูดซับสีย้อมเบสึครเรต 51 และเม็ดเจลก่อนและหลังการคายการดูดซับสีย้อมเบสึครเรต 51 อย่างละประมาณ 0.3 g โดยที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดแห้ง นำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล ในช่วงเลขคลื่น 4000-400 cm^{-1}

2.4.2 ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุน

นำเม็ดเจลก่อนและหลังการดูดซับสีย้อมเบสึครเรต 51 และเม็ดเจลหลังการคายการดูดซับสีย้อมที่แห้งและมีขนาดไม่เกิน 5 mm น้ำหนักประมาณ 0.3-0.5 g ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนเฉลี่ยด้วยแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่องเซอร์เฟสแอนาไลเซอร์ที่อุณหภูมิ 77 K ด้วยวิธี t-plot และวิธี Barrett-Joyner-Halenda (BJH)

2.5 การศึกษาการคายการดูดซับของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์สูตร 1-6

การศึกษาการคายการดูดซับของเม็ดเจล เริ่มจากนำเม็ดเจลมาดูดซับสีย้อมเบสึครเรต 51 โดยเตรียมเม็ดเจลสูตรที่ 1-6 สูตรละ 25 เม็ด ดูดซับสารละลายสีย้อมเบสึครเรต 51 ความเข้มข้น 7 ppm นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 130 rpm เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดเจลที่ดูดซับสีย้อมเบสึครเรต 51 เรียบร้อยแล้วไปทำการคายการดูดซับ ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการคายการดูดซับ ได้แก่ สูตรของสารละลายที่ใช้ในการคายการดูดซับ ปริมาณที่เหมาะสมของเม็ดเจล และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ดังนี้ นำเม็ดเจลที่ได้ทำการดูดซับสีย้อมเบสึครเรต 51 ความเข้มข้น 7 ppm จำนวน 25 เม็ด มาศึกษาการคายการดูดซับในสารละลายกรด HCl pH 2 สารละลาย 0.1 M HCl: เอทานอล 80% (1:1) และสารละลาย น้ำ:เอทานอล (70:30) + HCl เข้มข้น 5.00 mL เขย่าด้วยความเร็วรอบ 130 rpm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง นำสภาวะที่เหมาะสมมาทำการทดลองต่อโดยใช้เม็ดเจล จำนวน 5, 15, 25, 35 และ 45 เม็ด โดยใช้เวลาในการคายการดูดซับที่ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง และทดลองโดยดูดซับสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 4, 5, 6, 7 และ 8 ppm

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ลักษณะของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

การสังเคราะห์เม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ จำนวน 6 สูตร พบว่าแต่ละสูตรให้เม็ดเจลที่กลม สีและขนาดของเม็ดเมื่อแห้งแล้วแตกต่างกัน ดังนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณของแร่ดินเหนียวในแต่ละสูตรทำให้สีและขนาดของเม็ดใหญ่ขึ้นจาก 1.20 mm ไปจนถึง 1.80 mm และมีสีเหลืองเข้มมากขึ้นตามลำดับ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ลักษณะของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมมอนต์มอริลโลไนต์สูตร 1-6

สูตร	1 (SA)	2 (SA-M2)	3 (SA-M3)	4 (SA-M4)	5 (SA-M5)	6 (SA-M6)
สี	เหลืองใส	เหลือง	เหลืองขุ่น	เหลืองเข้ม	เหลืองเทา	เหลืองเทา
ขนาด (mm)	1.20	1.27	1.36	1.44	1.65	1.80
MT (g)	0.00	0.10	0.20	0.40	1.00	2.00
ลักษณะ						

3.2 การดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51

3.2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51

เม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ สูตร 1-6 เมื่อดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51 ความเข้มข้น 7 ppm ที่เวลา 6 ชั่วโมง เม็ดเจลที่ได้จะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีชมพูไปจนถึงสีแดงที่มีความเข้มสีแตกต่างกัน นอกจากนี้สีของสารละลายจะจางลงและมีความใสเพิ่มมากขึ้นเรียงตามลำดับจากสูตร 1-6 ดังรูปที่ 2 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงพบว่ามีความเข้มข้นของสีย้อมของแต่ละสูตรเหลืออยู่ที่ 6.61, 4.22, 3.56, 2.79, 1.52 และ 0.75 ppm ตามลำดับ โดยสูตรที่ 6 มีปริมาณการดูดซับ 2.20 mg/g และมีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดอยู่ที่ 87.98 ± 0.47 เนื่องจากมีแร่ดินเหนียวเป็นตัวช่วยทำให้การดูดซับเกิดได้มากขึ้น เพราะโครงสร้างของแร่ดินเหนียวมีรูพรุนและพื้นผิวที่มีสภาพขั้วเป็นประจุลบจึงเกิดอันตรกิริยากับสีย้อมที่มีสภาพขั้วเป็นบวกได้ดี ต่อจากนั้นศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับโดยใช้โซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์สูตรที่ 6 สารละลายสีย้อมความเข้มข้น 7 ppm (ยกเว้นปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้น) 25 mL เขย่า 150 rpm เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ยกเว้นปัจจัยด้านเวลา)



รูปที่ 2. สีของสารละลายและสีของเม็ดเจล สูตร 1-6 จำนวน 25 เม็ด เมื่อดูดซับสีย้อมความเข้มข้น 7 ppm

1) ปัจจัยด้านปริมาณของเม็ดโซเดียมอัลจินเตผสมมอนต์มอริลโลไนต์

จากการศึกษาปริมาณของเม็ดเจลจำนวน 5, 15, 25, 35 และ 45 พบว่าเม็ดเจลจำนวน 45 เม็ด ทำให้สารละลายใสมากที่สุด เมื่อวัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ดังรูปที่ 3(ก) พบว่ามีปริมาณการดูดซับ 1.32 mg/g และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมากที่สุด 94.72 ± 0.06 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของเม็ดเจลเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนสำหรับการดูดซับสีย้อมให้มากขึ้น

2) ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

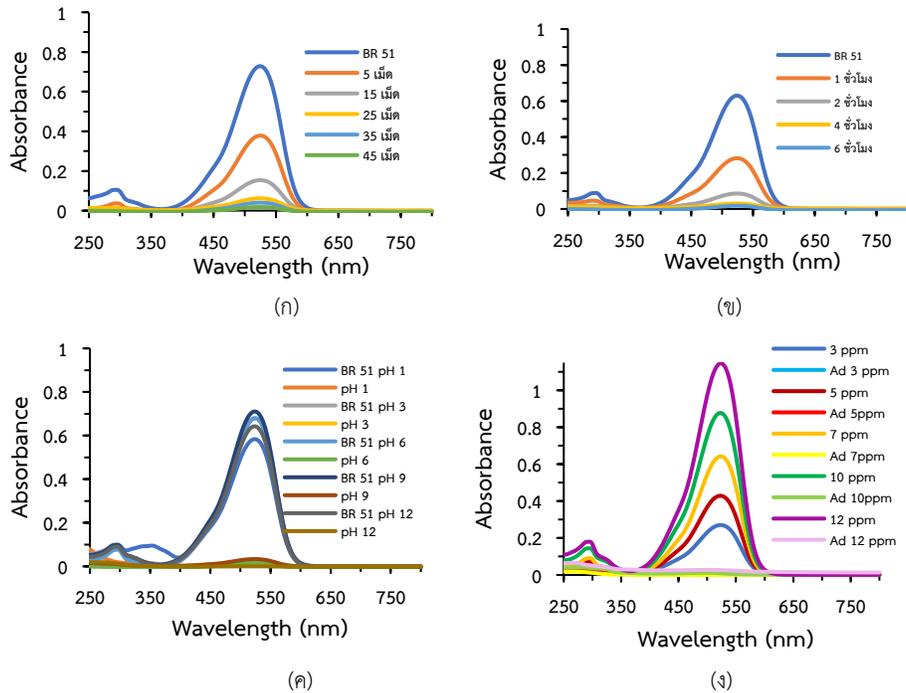
จากการกำหนดเวลาในการดูดซับ 0, 1, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าที่เวลา 6 ชั่วโมง สารละลายมีความใสมากที่สุด จากนั้นวัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ดังรูปที่ 3(ข) มีปริมาณการดูดซับและร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่มีค่ามากที่สุดที่ 1.32 mg/g และ 94.72 ± 0.06 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้เวลาในการดูดซับสีย้อมนานขึ้นจะทำให้เม็ดเจลมีเวลาในการดูดซับสีย้อมในสารละลายให้เข้าไปในรูพรุนได้มากยิ่งขึ้น

3) ปัจจัยของค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมในการดูดซับ

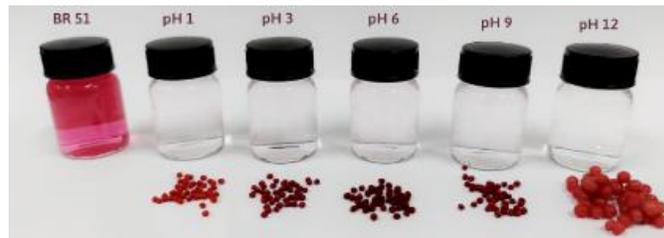
จากการกำหนดค่า pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเป็น 1, 3, 6, 9 และ 12 พบว่าที่ค่า pH 12 มีความเข้มข้นของสีย้อมเหลือน้อยที่สุด ดังรูปที่ 4 มีปริมาณการดูดซับและร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดที่ 1.26 mg/g และ 97.06 ± 0.10 ตามลำดับ สีของสารละลายมีความใสใกล้เคียงกัน แต่ที่ pH 12 ขนาดเม็ดเจลมีการบวมตัวจากก่อนดูดซับที่มีขนาดประมาณ 1.72 mm หลังจากดูดซับแล้วเม็ดมีขนาดใหญ่ขึ้นประมาณ 4.46 mm และแตกออกจากกัน ดังรูปที่ 3(ค) อาจเกิดจากไฮดรอกไซด์ไอออนไปตั้งไอออน Ca^{2+} ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของอัลจินเตเกิดเป็น Ca(OH)_2 ทำให้เม็ดเจลบางส่วนบวมตัวเสียสภาพและแตกออกได้ ในขณะที่ pH 1, 3, 6 และ 9 ไม่พบการบวมตัวของเม็ดเจล โดยพบว่าที่ทุก pH มีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 90 ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้ pH ในช่วง 1-9 ในการดูดซับสีย้อมชนิดนี้ได้

4) ปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 51

จากการกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมที่ 3, 5, 7, 10 และ 12 ppm เมื่อวัดความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลาย พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 7 ppm เหลือความเข้มข้นน้อยสุด ที่ 0.180 ppm ดังรูปที่ 3(ง) สีของสารละลายมีความใสใกล้เคียงกัน มีปริมาณการดูดซับและร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมอยู่ที่ 1.21 mg/g และ 97.06 ± 0.10 ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นมากกว่า 7 ppm เมื่อมีเม็ดเจลจำนวน 45 เม็ด จะไม่สามารถดูดซับสีย้อมได้ทั้งหมดจึงเหลือสีย้อมอยู่ในสารละลาย



รูปที่ 3. สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ก) ปัจจัยด้านปริมาณของเมทิลแอลกอฮอล์ (ข) ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ค) ปัจจัยของค่า pH และ (ง) ปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม
หมายเหตุ การวัดการดูดกลืนแสงจะทำการวัดสารละลายของสีย้อม BR51 ก่อนการดูดซับทุกครั้ง



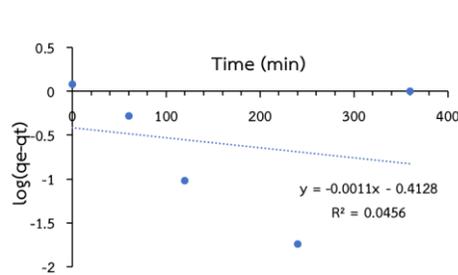
รูปที่ 4. สีของสารละลายและสีของเม็ดเจล สูตร 6 ที่ pH 1, 3, 6, 9 และ 12

3.2.2 จลนศาสตร์การดูดซับ

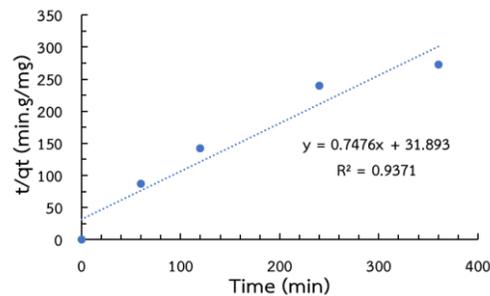
เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาปัจจัยด้านเวลาในการดูดซับมาสร้างกราฟเส้นตรงตามสมการปฏิกิริยาการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมและสมการปฏิกิริยาการดูดซับอันดับสองเทียมตามสมการที่ (3) และ (4) พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) และ q_e แสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 5

ตารางที่ 3. ค่าตัวแปรของสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและสองเทียม

ตัวแปร	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม	ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม
R^2	0.0456	0.9371
k_1, k_2 (min^{-1})	2.3030	0.0561
q_e experiment (mg/g)	1.3170	1.3170
q_e calculate (mg/g)	0.3860	1.3380



(ก)



(ข)

รูปที่ 5. จลนศาสตร์การดูดซับของ (ก) สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และ (ข) สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังนั้นเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปจนเริ่มเข้าสู่สมดุล การดูดซับสีย้อมเบสเคเรต 51 ของเม็ดเจลสูตรที่ 6 เป็นการดูดซับด้วยแรงทางเคมี โดยโมเลกุลของสีย้อมใช้ตำแหน่ง N^+ ในวง Imidazole เกิดอันตรกิริยากับตำแหน่ง $-COO^-$ ของโซเดียมอัลจิเนต และประจุบวกของสีย้อมนี้ยังสามารถเกิดแรงดึงดูดกับพื้นผิวที่เป็นลบของแรดดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

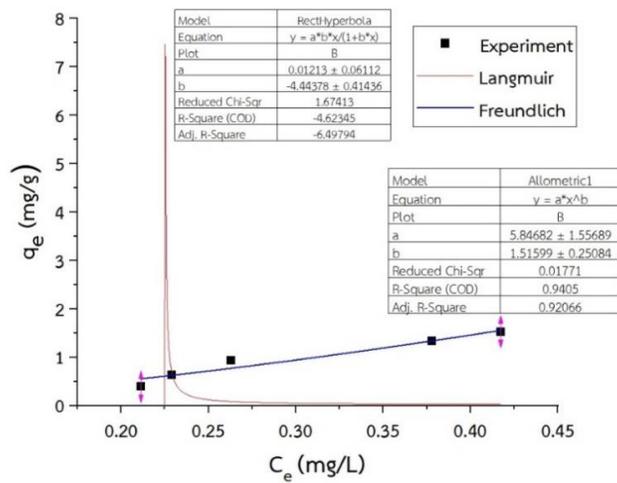
3.2.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ใช้กับการดูดซับแบบชั้นเดียวบนผิวตัวดูดซับ และไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชเหมาะสำหรับการดูดซับแบบหลายชั้น สามารถใช้ได้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับของสารประเภทอินทรีย์และสารอนินทรีย์บนตัวดูดซับหลายประเภท เมื่อนำปัจจัยความเข้มข้นในการดูดซับมาสร้างกราฟ Nonlinear ตามสมการที่ (5) และ (6) โดยใช้โปรแกรม OriginLab Origin 2024 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 6

ดังนั้นในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่าแลงเมียร์ แสดงว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer)

ตารางที่ 4. ค่าตัวแปรไอโซเทอมของแลงเมียร์และไอโซเทอมของฟรุนดลิช

ตัวแปร	ไอโซเทอมของแลงเมียร์	ไอโซเทอมของฟรุนดลิช
R^2	-4.6234	0.9405
K_L, K_F	-4.4438	5.8470
q_m, n	0.0121	0.6596



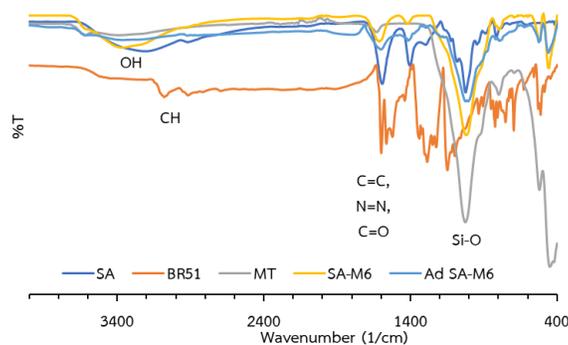
รูปที่ 6. ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

3.3 โครงสร้างของเม็ทโซเดียมอัลจินเตผสมมอนตมอริลโลไนต์ก่อนและหลังการดูดซับ

3.3.1 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของ SA, BR51, MT และ SA-M6 ในช่วงเลขคลื่น 4000-400 cm^{-1} ดังรูปที่ 7 พบว่า MT เกิดการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำ (Hydroxyl group: -OH) หมู่ซิลิโคนออกไซด์ (Silicon oxide: Si-O) ที่เลขคลื่นประมาณ 3624 และ 1028 cm^{-1} และเกิดการสั่นแบบงอหมู่ Si-O-Al และ Si-O-Si ที่เลขคลื่นประมาณ 521 และ 450 cm^{-1} ส่วนสเปกตรัมของ SA พบการสั่นแบบยืดหดของหมู่ -OH ของน้ำ หมู่ C-H และหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group: -COO) แบบไม่สมมาตรกับแบบสมมาตรที่เลขคลื่น 3240, 2919, 1591 และ 1403 cm^{-1} ตามลำดับ สำหรับสเปกตรัม BR51 พบแถบการสั่นแบบยืดจากวงอะโรมาติก C-H ที่เลขคลื่น 3081 cm^{-1} , C=C ที่เลขคลื่น 1599 cm^{-1} หมู่อะโซ (azo group: N=N) ที่เลขคลื่น 1564 cm^{-1} และ C-N ที่เลขคลื่น 1268 cm^{-1} เมื่อทำการผสมแร่ดินเหนียวมอนตมอริลโลไนต์ด้วย SA สูตรที่ 6 หรือ SA-M6 จะปรากฏหมู่ฟังก์ชันที่มาจาก MT และ SA ดังนี้ การสั่นแบบยืดหดของหมู่ -OH ที่มี การเลื่อนตำแหน่งไปที่ 3331 และ 3367 cm^{-1} เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ -COO⁻ ของ SA กับหมู่ -OH บนผิวของ MT หมู่ C-H ที่เลขคลื่น 2924 และ 2919 cm^{-1} และ -COO⁻ แบบไม่สมมาตรกับแบบสมมาตรที่เลขคลื่น 1594, 1418 cm^{-1} นอกจากนี้ยังพบการเลื่อนตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน Si-O ไปยังเลขคลื่น 1019 cm^{-1} เนื่องจากถูกรบกวนพื้นผิวจากการผสมด้วย SA

เมื่อเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันก่อนดูดซับ (SA-M6) และหลังดูดซับสีย้อม (Ad SA-M6) พบว่าหลังการดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันจากโมเลกุลสีย้อมเพิ่มเข้ามา ดังนี้ หมู่ C-H ที่เลขคลื่น 2920 cm^{-1} หมู่ N=N ที่เลขคลื่น 1418 cm^{-1} และหมู่ C-N ที่เลขคลื่น 1293 cm^{-1} นอกจากนี้ยังพบแถบการสั่นแบบยืดหดของหมู่ -OH (มีความเข้มลดลง) หมู่ -COO⁻ แบบไม่สมมาตรกับแบบสมมาตร และหมู่ Si-O ที่มีการเลื่อนตำแหน่งอย่างชัดเจนจากการเกิดอันตรกิริยากับ N⁺ ของสีย้อมกับพื้นผิวที่เป็นลบของแร่ดินเหนียวที่เลขคลื่น 3379, 1601 และ 1007 cm^{-1} ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าในโครงสร้างของเมดโซเดียมอัลจินตผสมมอนต์มอริลโลไนต์หลังดูดซับมีการแทรกตัวของโมเลกุลสีย้อม BR51 เข้าไปในรูพรุนจริง ส่วนผลจากการคายการดูดซับ BR51 ของ SA-M3 3 พบว่ายังคงปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันจากโมเลกุลสีย้อมแสดงให้เห็นว่ายังไม่สามารถขจัดสีย้อมออกจาก ตัวดูดซับได้ทั้งหมด

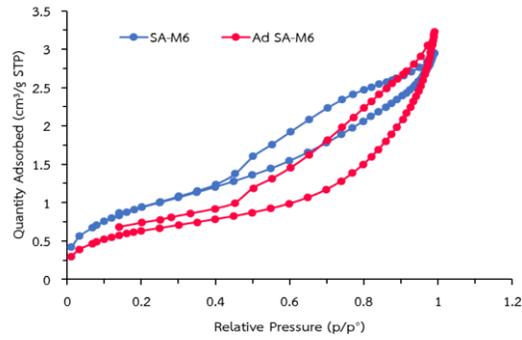


รูปที่ 7. สเปกตรัม FT-IR ของ SA, BR51, MT, SA-M6 และ Ad SA-M6

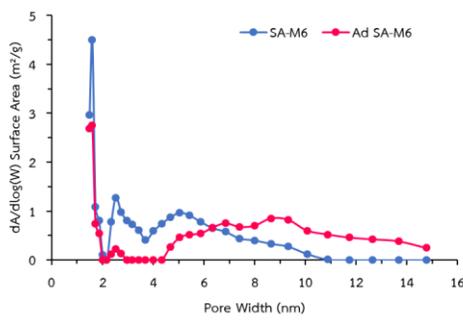
3.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายการดูดซับแก๊ส N₂ (N₂ Adsorption-Desorption Isotherm)

การวิเคราะห์ไอโซเทอมของเมดเจลสูตรที่ 6 ก่อนการดูดซับ (SA-M6) และหลังการดูดซับสีย้อม (Ad-SA-M6) พบว่ามีลักษณะคล้ายกัน คือ มีลูบฮิสเตอร์เรซิส (Hysteresis loop) แสดงถึงการดูดซับทางกายภาพประเภท IV ตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) เป็นวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลของแก๊ส N₂ ที่ถูกดูดซับมาก เป็นการดูดซับแบบสองชั้น ในช่วงแรกกราฟมีจุดเปลี่ยนโค้งแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกเสร็จสมบูรณ์ โดยความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 8(ก) โดย SA-M6 มีพื้นที่ผิว (Surface area) $3.9501\text{--}3.5245\text{ m}^2/\text{g}$ และ Ad-SA-M6 มีค่าเท่ากับ $2.3902\text{--}2.3484\text{ m}^2/\text{g}$ การมีพื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากแก๊ส N₂ ถูกดูดซับได้น้อยลงจากการมีโมเลกุลสีย้อมดูดซับอยู่ก่อนแล้ว จากการวิเคราะห์รูพรุนด้วยวิธี t-plot แสดงให้เห็นว่า SA-M6 และ Ad-SA-M6 มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size) ในช่วง 1-15 nm มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) ขนาด 0.7405 และ 0.7883 nm ตามลำดับ ดังรูปที่ 8(ข) เมื่อวิเคราะห์รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) และขนาดใหญ่ (Macropore) ด้วยวิธี BJH แสดงให้เห็นว่า SA-

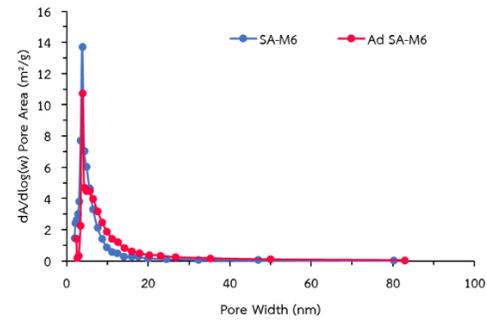
M6 และ Ad-SA-M6 ส่วนใหญ่มีรูพรุนขนาด Mesopores โดยมีขนาด 6.1882 และ 10.8273 nm ตามลำดับ ดังรูปที่ 8(ค) และตารางที่ 5



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8. การศึกษา (ก) ไอโซเทอมการดูดซับ-การคายการดูดซับของ SA-M6 และ Ad SA-M6 (ข) การวิเคราะห์ขนาดกับชนิดของรูพรุน micropore-mesopore ด้วยวิธี t-plot (ค) การวิเคราะห์ขนาดกับชนิดของรูพรุน mesopore ด้วยวิธี BJH

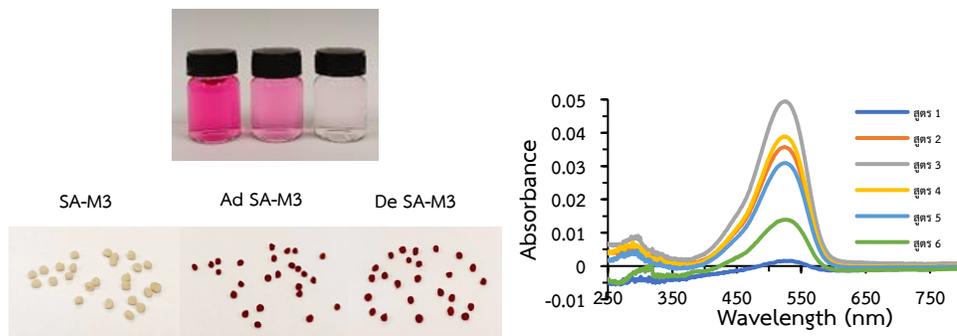
ตารางที่ 5. ผลจากการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง BET ด้วยวิธี t-plot และวิธี BJH

ตัวอย่าง	t-plot		BJH	
	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ขนาดรูพรุน (nm)	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ขนาดรูพรุน (nm)
SA-M6	3.9501	0.7405	3.5245	6.1882
Ad SA-M6	2.3902	0.7883	2.3484	10.8273

3.4 การคายการดูดซับสีของเม็ดเคลือบ 51

1) ปัจจัยด้านการคายการดูดซับของเม็ดเคลือบสูตรที่ 1-6

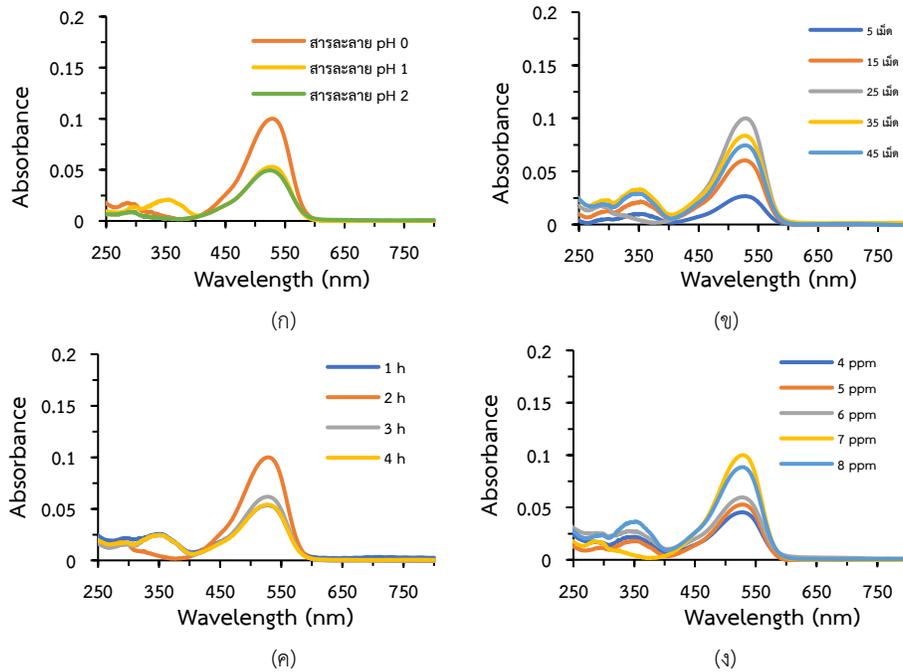
การคายการดูดซับสีของเม็ดเคลือบ 51 ที่ความเข้มข้น 7 ppm ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH 2 พบว่าสีของเม็ดเคลือบจางลงจากเดิมเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 9 เมื่อนำสารละลายที่ได้จากการคายการดูดซับไปวัดการดูดกลืนแสง พบว่าเม็ดเคลือบสูตรที่ 1-6 มีค่าความเข้มข้นของสีที่คายการดูดซับเท่ากับ 0.183, 0.492, 0.615, 0.517, 0.419 และ 0.294 ppm ตามลำดับ โดยโมเลกุลสีจะหลุดออกจากเม็ดเคลือบสูตรที่ 4-6 ได้น้อยกว่าสูตรที่ 3 เนื่องจากเป็นสูตรที่มี MT ในปริมาณมากกว่าทำให้โมเลกุลสีซึมเข้าไปในรูพรุนเป็นจำนวนมาก สีจึงหลุดออกมาได้น้อย ส่วนเม็ดเคลือบสูตรที่ 1 และ 2 ที่คายการดูดซับออกมาได้น้อย เพราะมีปริมาณ MT น้อยจึงทำให้สามารถดูดซับสีได้ในปริมาณที่น้อยเช่นกัน



รูปที่ 9. สีของเม็ดเคลือบสูตรที่ 3 และสีของสารละลายเบสสูตร 51 ก่อนดูดซับ (SA-M3) หลังการดูดซับ (Ad SA-M3) และหลังคายการดูดซับ (De SA-M3) ด้วยสารละลายกรด HCl pH 2 และสเปกตรัมของสารละลายที่คายการดูดซับ

2) ปัจจัยด้านสูตรของสารละลายที่ใช้ในการคายการดูดซับ

จากการศึกษาสูตรของสารละลายที่ใช้ในการคายการดูดซับเมื่อนำเม็ดเคลือบที่ดูดซับสีที่มีความเข้มข้น 7 ppm มาทำการคายการดูดซับด้วยสารละลายทั้ง 3 สูตร ได้แก่ สารละลายกรด HCl pH 2 สารละลาย 0.1 M HCl: เอทานอล 80% (1:1) (สารละลาย pH 1) และสารละลาย น้ำ:เอทานอล (70:30) + HCl เข้มข้น (สารละลาย pH 0) พบความเข้มข้นของสีที่คายการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.615, 0.649 และ 1.04 ppm ตามลำดับ ดังรูปที่ 10(ก) แสดงให้เห็นได้ว่าการใช้กรด HCl ปริมาณมากทำให้เม็ดเคลือบเติมโปรตอน ส่งผลให้สีที่มีประจุบวกหลุดออกมาได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fang และคณะ [9] ที่ได้รายงานว่า ภายใต้สภาวะกรด pH < 2.0 หมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลบนตัวดูดซับจะถูกเติมโปรตอน ทำให้มีแรงทางไฟฟ้าสถิตยระหว่างประจุลบของตัวดูดซับกับ H⁺ ของสารละลายที่ใช้ในการคายการดูดซับ



รูปที่ 10. สเปกตรัมการคายการดูดซับ (ก) สูตรของสารละลายที่ใช้ล้าง (ข) ปริมาณของเม็ดเจล (ค) เวลาที่ใช้ในการคายการดูดซับ และ (ง) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

3) ปัจจัยด้านปริมาณของเม็ดเจล

เมื่อนำเม็ดเจลสูตรที่ 3 จำนวน 5, 15, 25, 35 และ 45 เม็ด ทำการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 7 ppm แล้วคายการดูดซับด้วยสารละลาย น้ำ:เอทานอล (70:30) + HCl เมื่อนำสารละลายที่ได้จากการคายการดูดซับไปวัดการดูดกลืนแสง พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมมีค่าเท่ากับ 0.408, 0.725, 1.04, 0.917 และ 0.848 ppm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเม็ดเจลจำนวน 25 เม็ด สามารถคายการดูดซับสีย้อมได้มากที่สุด แสดงดังรูปที่ 10(ข)

4) ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการคายการดูดซับ

เมื่อนำเม็ดเจลสูตรที่ 3 จำนวน 25 เม็ด ดูดซับสารละลายสีย้อมแล้วทำการคายการดูดซับด้วย น้ำ:เอทานอล (70:30) + HCl เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 h พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมที่คายการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.655, 1.036, 0.724 และ 0.653 ppm เวลาในการคายการดูดซับ 2 h เป็นเวลาเหมาะสมต่อการคายการดูดซับ แสดงดังรูปที่ 10(ค)

5) ปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

จากการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม โดยนำเม็ดเจลสูตรที่ 3 มาดูดซับด้วยสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้น 4, 5, 6, 7 และ 8 ppm แล้วทำการคายการดูดซับด้วย น้ำ:เอทานอล (70:30) + HCl เป็นเวลา 2 h พบความเข้มข้นของสีย้อมที่คายการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.588, 0.648, 0.698,

1.036 และ 0.959 ppm โดยความเข้มข้นเริ่มต้น 7 ppm มีปริมาณการคายการดูดซับออกมามากที่สุด แสดงดังรูปที่ 10(ง)

4. สรุปผลการทดลอง

สามารถสังเคราะห์เม็ดโซเดียมอัลจินเตผสมมอนต์มอริลโลไนต์ได้ทั้งหมด 6 สูตร พบว่าสูตรที่ 6 มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากที่สุด และมีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ 97.05 เมื่อใช้เม็ดเจลจำนวน 45 เม็ด เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 51 มีความเข้มข้นเริ่มต้น 7 ppm และค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง pH 1-9 จะให้เม็ดเจลที่เสถียรและมีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 90 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับพบว่าปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช การวิเคราะห์ขนาดของรูพรุนของเม็ดโซเดียมอัลจินเตทั้งก่อนและหลังการดูดซับ พบว่ามีรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2 nm อยู่เล็กน้อย โดยส่วนใหญ่มีรูพรุนขนาดกลางเป็นหลัก และจากการศึกษาการคายการดูดซับสีย้อมของสูตรที่ 3 พบว่าคายการดูดซับได้ร้อยละ 36.75 โดยสารละลายน้ำกับเอทานอลอัตราส่วน 70:30 ขณะมีกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดในการทำให้เกิดการคายการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51 นอกจากนี้หากนำเม็ดเจลไปดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51 ควรหลีกเลี่ยงตัวกลางที่เป็นเบสแก่ (pH 12) เพราะจะทำให้เม็ดเจลแตกเสียสภาพไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนค่าวิเคราะห์และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Myskinrecipes. 2566. Basic red 51 (Basic dyes), แหล่งข้อมูล: <https://www.myskinrecipes.com/shop/th/basic-dyes/8112-basic-red-51.html> ค้นเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2566.
- [2] Corrêa, G.T., Carlos de Souza, J., Silva, J.P., Pividori, M.I. and Zanoni, M.V.B. 2020. Determination of temporary dye basic red 51 in commercial hair dye, river water and wastewater from hairdressing salon using graphite-epoxy composite electrode modified with magnetic nanoparticles. *Microchemical Journal*, 159, 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105485>.
- [3] Peng, S. et al. 2019. Polyhydroxyl gemini surfactant-modified montmorillonite for efficient removal of methyl orange. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 578, 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123602>.
- [4] Minisy, I.M., Salahuddin, N.A. and Ayad, M.M. 2021. Adsorption of methylene blue onto chitosan–montmorillonite/polyaniline nanocomposite. *Applied Clay Science*, 203, 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.105993>.

- [5] Edathil, A.A., Pal, P. and Banat, F. 2018. Alginate clay hybrid composite adsorbents for the reclamation of industrial lean methyl-diethanolamine solutions. *Applied Clay Science*, 156, 213-223, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.02.015>.
- [6] Tao, E., Ma, D., Yang, S. and Hao, X. 2020. Graphene oxide-montmorillonite/sodium alginate aerogel beads for selective adsorption of methylene blue in wastewater. *Journal of Alloys and Compounds*, 832, 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154833>.
- [7] Zhang, J., Deng, R., Ren, B., Yaseen, M. and Hursthouse, A. 2020. Enhancing the removal of Sb (III) from water: A Fe₃O₄@HCO composite adsorbent caged in sodium alginate microbeads. *Processes*, 44(8), 1-12, <https://doi.org/10.3390/pr8010044>.
- [8] Zhang, Z., Xu, J. and Yang, X. 2021. MXene/sodium alginate gel beads for adsorption of methylene blue. *Materials Chemistry and Physics*, 260, 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124123>.
- [9] Fang, Y., Liu, Q. and Zhu, S. 2021. Selective biosorption mechanism of methylene blue by a novel and reusable sugar beet pulp cellulose/sodium alginate/iron hydroxide composite hydrogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 188, 993-1002, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.192>.
- [10] Bayram, T., Bucak, S. and Ozturk, D. 2020. BR13 dye removal using sodium dodecyl sulfate modified montmorillonite: Equilibrium, thermodynamic, kinetic and reusability studies. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 158, 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108186>.

การจัดกลุ่มพฤติกรรมการเปิดรับข้อมูลข่าวสารความต้องการรัฐสวัสดิการ
ของผู้สูงอายุในประเทศไทย
Clustering Information Exposure Behavior the Welfare State Needs
Among Older Adults in Thailand

อานิสรา ราศรี* วุฒิชัย เชยชม ปวีณมสุดา ฉิมพาลี และ ณัชชา กุลจิราธนโชติ
Amisa Rasri* Wuttichai Choeichom Paweesuda Chimpalee and Natcha Kunjiratanachot
สาขาวิชาวิทยาการวิเคราะห์ข้อมูลและคณิตศาสตร์ประกันภัย คณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา จ.ชลบุรี ประเทศไทย
Department of Data Analytics and Actuarial Science, Faculty of Science at Sriracha,
Kasetsart University, Sriracha Campus, Chonburi, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 1 ธันวาคม 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 27 กันยายน 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 27 กันยายน 2567
Received: 1 December 2023, Revised: 27 September 2024, Accepted: 27 September 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการจัดกลุ่มข้อมูลการเปิดรับข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการของผู้สูงอายุในประเทศไทย โดยใช้ขั้นตอนวิธีเคมีน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการบริโภคสื่อของผู้สูงอายุ โดยใช้ข้อมูลจากสำนักพัฒนา นโยบายและแผนการประชาสัมพันธ์ของกรมประชาสัมพันธ์ ซึ่งเริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่วันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 ถึง 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 จำนวน 1,314 คน โดยพิจารณาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมจากวิธี Elbow ซึ่งผลของการวิเคราะห์การจัดกลุ่มจากการสำรวจพฤติกรรมดังกล่าวของกลุ่มผู้สูงอายุได้จำนวนกลุ่มที่เหมาะสม คือ จำนวน 3 กลุ่ม และ 4 กลุ่ม ตามลำดับ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำผลวิเคราะห์มาใช้เป็นแนวทาง ในการแนะนำการประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการสำหรับผู้สูงอายุในประเทศไทย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ในการประชาสัมพันธ์มากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : การจัดกลุ่ม การเปิดรับข้อมูลข่าวสาร รัฐสวัสดิการ ขั้นตอนวิธีเคมีน วิธี Elbow

Abstract

This research has organized data on exposure to welfare state information among senior citizens in Thailand. The K-means algorithm was used to study the media consumption behavior of the seniors. Data derived from the Public Relations Policy and

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: amisa.r@ku.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.261416>

Planning Development Office of the Public Relations Department, covering the period from February 6, 2023 to February 24, 2023 and involving 1,314 participants. The optimal number of clusters was determined through the application of the Elbow method. The results of the clustering analysis, based on the survey of the elderly behavior, led to the identification of three and four distinct groups, respectively. Furthermore, the researchers used the analysis results to recommend publicizing welfare news for the older adults in Thailand, aiming to further enhance the efficiency of public relations.

Keywords: Clustering, Information exposure, Welfare state, K-means algorithm, Elbow method

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมา

รัฐสวัสดิการ (Welfare state) หมายถึง รัฐบาลหรือสังคมที่มีบทบาทความรับผิดชอบต่อชีวิตความเป็นอยู่ของประชาชนในด้านต่าง ๆ เช่น การตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชนในด้านการศึกษา สุขภาพ อนามัย เศรษฐกิจ และความมั่นคงทางสังคม [1] แต่สำหรับประเทศไทยนั้นยังมีรัฐสวัสดิการที่ยังไม่ถ่วงหน้า เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยกำลังก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ ประกอบกับนโยบายรัฐหลายนโยบายได้นำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้ในการบริหารงาน ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาการรับข้อมูลข่าวสารที่ไม่ทั่วถึงและนำไปสู่การเสียสิทธิของประชากรในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านสาธารณสุขเกี่ยวกับการใช้สิทธิในระบบหลักประกันสุขภาพ ด้านที่อยู่อาศัยเกี่ยวกับการช่วยเหลือที่พักอาศัย อาหาร และเครื่องนุ่งห่ม เป็นต้น ดังนั้นหากทราบถึงพฤติกรรมในการเปิดรับข้อมูลข่าวสารของประชากรเหล่านี้ อาจช่วยให้การประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการทำได้เหมาะสมและสามารถเข้าถึงทุกคนได้อย่างถ่วงหน้า

หนึ่งในวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมต่าง ๆ ของข้อมูลรวมไปถึงพฤติกรรมผู้บริโภคของประชากร คือ วิธีการจัดกลุ่ม (Clustering) ซึ่งการจัดกลุ่มเป็นวิธีที่ใช้แบ่งข้อมูล โดยข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันจะมีคุณลักษณะที่คล้ายกันกว่าข้อมูลที่อยู่ต่างกลุ่มกัน การจัดกลุ่มเป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) จัดอยู่ในประเภทของการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised learning) ซึ่งการจัดกลุ่มมีหลายวิธี เช่น การจัดกลุ่มด้วยวิธีเคมีน (K-means clustering) การจัดกลุ่มข้อมูลตามความหนาแน่นของพื้นที่ (Density-based clustering) และการจัดกลุ่มตามลำดับชั้น (Hierarchical clustering) [2] ซึ่งขั้นตอนวิธีเคมีนเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการจัดกลุ่มข้อมูล แต่ยังมีข้อจำกัดในการกำหนดจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นจึงมีการศึกษาการวิเคราะห์จำนวนกลุ่มที่เหมาะสมหลากหลายวิธี และหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมคือวิธี Elbow (Elbow method) เนื่องจากทำความเข้าใจง่าย ใช้งานง่าย มีประสิทธิภาพ ประหยัดเวลา และปรับใช้ได้หลากหลาย

งานวิจัยนี้จึงทำการจัดกลุ่มข้อมูลการเปิดรับข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการของผู้สูงอายุในประเทศไทยจำนวน 1,314 คน จาก 77 จังหวัด โดยใช้วิธี Elbow ในการกำหนดจำนวนกลุ่มที่เหมาะสม และใช้ขั้นตอนวิธีเคมีน (K-means algorithm) ในการจัดกลุ่มเพื่อศึกษาพฤติกรรมในการเปิดรับข้อมูลข่าวสารของผู้สูงอายุ

ซึ่งการจัดกลุ่มจากการสำรวจพฤติกรรมดังกล่าวจะช่วยให้เกิดการพัฒนาด้านการประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2018 Syakur และคณะ [3] เสนอวิธีการวิเคราะห์ลูกค้ำจำนวน 500 คนในประเทศอินโดนีเซีย โดยใช้การผสมผสานระหว่างเทคนิคการแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยขั้นตอนวิธีเคมีนร่วมกับวิธี Elbow เพื่อหาจำนวนกลุ่มลูกค้ำที่ดีที่สุด ผลการศึกษาพบว่าวิธีที่นำเสนอมีความแม่นยำกว่าการแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยขั้นตอนวิธีเคมีนเพียงอย่างเดียว และยังแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการแบ่งกลุ่มข้อมูลสามารถช่วยในการวิเคราะห์ลูกค้ำ เข้าใจพฤติกรรมลูกค้ำ และกำหนดกลยุทธ์ที่เหมาะสมกับลูกค้ำแต่ละกลุ่ม ส่งผลต่อธุรกิจและช่วยเพิ่มยอดขาย จากนั้นในปีเดียวกัน ทิพยา ถินสูงเนิน และคณะ [4] ได้นำเสนอการตรวจสอบความเหมาะสมของการจัดกลุ่มข้อมูลอนุกรมเวลา โดยใช้เทคนิคพื้นฐานที่นิยมใช้ในการพิจารณาจำนวนที่เหมาะสมสำหรับการจัดกลุ่ม ได้แก่ วิธีซิลลูเอ็ต (Silhouette method) และค่าผลรวมความผิดพลาดหรือวิธี Elbow ร่วมกับการแทนอนุกรมเวลา และใช้ข้อมูลสังเคราะห์กับข้อมูลจริงจำนวนทั้งหมด 3 ชุดข้อมูล เปรียบเทียบวิธีการวัดความคล้ายคลึง 6 วิธี และจัดกลุ่มด้วยเทคนิคแบบลำดับขั้นและแบบแบ่งแยก ผลการวิจัยพบว่าวิธีที่นำเสนอใช้ตรวจสอบจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมซึ่งให้ผลสอดคล้องกันทั้งวิธีซิลลูเอ็ตและวิธี Elbow

ในปี ค.ศ. 2020 Cui [5] ได้อธิบายเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีเคมีนซึ่งนิยมใช้ในการแบ่งกลุ่มข้อมูลในด้านการเงิน เนื่องจากเป็นขั้นตอนวิธีที่เรียบง่ายและใช้งานง่าย แต่ก็มีข้อจำกัดในการกำหนดจำนวนกลุ่มและจุดศูนย์กลางเริ่มต้น ในบทความนี้จึงแนะนำแนวคิดของขั้นตอนวิธีเคมีนพร้อมเสนอการใช้วิธี Elbow เพื่อหาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งช่วยให้การแบ่งกลุ่มข้อมูลมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ต่อมาในปี ค.ศ. 2021 Duarte-Duarte และคณะ [6] ได้เสนอวิธีการระบุเส้นทางการท่องเที่ยวที่รวมจุดที่น่าสนใจและสำคัญที่สุดในภูมิภาคของประเทศโคลัมเบีย ซึ่งกำหนดเกณฑ์จากลักษณะความคล้ายกันระหว่างสถานที่ โดยใช้เทคนิคการจัดกลุ่มที่อาศัยปัจจัย 8 ประการ ได้แก่ 1) ธรรมชาติ 2) วัฒนธรรม 3) สถานบริการที่ให้บริการนักท่องเที่ยว 4) โครงสร้างพื้นฐาน 5) สิ่งอำนวยความสะดวก 6) การบริการเข้าถึงประชาชน 7) ทูมนุชย์และนักท่องเที่ยว และ 8) ความปลอดภัย ผลการวิจัยพบว่าสามารถแบ่งกลุ่มท่องเที่ยวออกเป็น 3 กลุ่ม และเสนอตัวอย่างเส้นทางการท่องเที่ยว 2 เส้นทาง

ในปี ค.ศ. 2022 ณรรุณคุณ วิรุฬห์ศรี และคณะ [7] ได้นำเสนอการวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มลูกค้ำของบริษัทผู้ผลิตอาหารสัตว์เลี้ยงแห่งหนึ่ง โดยใช้ข้อมูลการซื้อขายสินค้าอาหารสัตว์เลี้ยงซึ่งมีจำนวนลูกค้ำทั้งหมด 588 ราย และใช้ปัจจัยทั้งหมด 15 ปัจจัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ขั้นตอนวิธีเคมีนในการวิเคราะห์การจัดกลุ่ม และใช้วิธี Elbow ในการตรวจสอบหาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมซึ่งได้จำนวน 8 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มลูกค้ำทั่วไปคินสินค้าน้อย กลุ่มลูกค้ำทั่วไปใจไม่นิ่ง กลุ่มลูกค้ำहांไกล กลุ่มลูกค้ำขยันคิน กลุ่มลูกค้ำซื้อง่ายขายคล่อง กลุ่มลูกค้ำกระเป่าหนัก กลุ่มลูกค้ำที่มีแนวโน้มควรรักษาไว้ และกลุ่มลูกค้ำชาจร การแบ่งกลุ่มด้วยเทคนิคนี้ทำให้ได้ประสิทธิภาพดีที่สุด และในปีเดียวกัน วุฒิชชาติ สุนทรสมย์ [8] ได้นำเสนอการวิเคราะห์การจัดกลุ่มนักท่องเที่ยวด้วยภาพลักษณ์ และศึกษาความตั้งใจกลับมาเที่ยวซ้ำ โดยใช้วิจัยเชิงสำรวจนักท่องเที่ยวชาวไทยที่เดินทางมาท่องเที่ยวจังหวัดชลบุรี จำนวน 400 คน ใช้แบบสอบถามเก็บรวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนาและสถิติอ้างอิง ได้แก่ การวิเคราะห์ปัจจัยและจำแนกกลุ่มที่

ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มพบว่าสามารถจำแนกนักท่องเที่ยวได้เป็น 4 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มนักท่องเที่ยวที่สนใจสังคมและวัฒนธรรม 2) กลุ่มนักท่องเที่ยวที่สนใจความเป็นธรรมชาติแต่ไม่ชอบที่จะเข้าร่วมกิจกรรมเพื่อการพักผ่อนหย่อนใจ 3) กลุ่มนักท่องเที่ยวที่สนใจสังคมและวัฒนธรรมและชอบเข้าร่วมกิจกรรมเพื่อการพักผ่อนหย่อนใจ และ 4) กลุ่มนักท่องเที่ยวที่สนใจความเป็นธรรมชาติของแหล่งท่องเที่ยวและชอบภูมิอากาศ โดยกลุ่มนักท่องเที่ยวที่สนใจด้านสังคมและวัฒนธรรมและชอบเข้าร่วมกิจกรรมเพื่อการพักผ่อนหย่อนใจเป็นกลุ่มที่มีโอกาสกลับมาเที่ยวซ้ำมากที่สุด

ในปี ค.ศ. 2023 เจนจิรา สุกใส และนิภาพร ชนะมาร [9] ได้นำเสนอการจัดกลุ่มข้อมูลเศรษฐกิจครัวเรือนด้วยการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเคมีน โดยใช้ข้อมูลจากเศรษฐกิจครัวเรือนจากฐานข้อมูลตำบลและฐานข้อมูลขนาดใหญ่สำหรับการพัฒนาท้องถิ่น ได้ข้อมูลทดลองจำนวน 1,751 ระเบียบ 16 ปัจจัย โดยใช้ขั้นตอนวิธีเคมีนผ่านโปรแกรม RapidMiner ผลการวิจัยพบว่าได้ครัวเรือนที่เหมาะสมดังนี้ ครัวเรือนที่อยู่ในระดับเศรษฐกิจน้อยจำนวน 304 ครัวเรือน ครัวเรือนที่อยู่ในระดับเศรษฐกิจปานกลางจำนวน 544 ครัวเรือน และครัวเรือนที่อยู่ระดับเศรษฐกิจสูงจำนวน 903 ครัวเรือน จากผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาและส่งเสริมอาชีพเพื่อยกระดับรายได้ของครัวเรือนในแต่ละกลุ่มได้

2. วิธีการทดลอง

วิจัยฉบับนี้ได้จัดกลุ่มพฤติกรรมการเปิดรับข้อมูลข่าวสารความต้องการรัฐสวัสดิการของกลุ่มผู้สูงอายุในประเทศไทย ซึ่งมีขั้นตอนวิธีดำเนินงานโดยเริ่มจากการศึกษาข้อมูล การเตรียมข้อมูล และการจัดกลุ่มข้อมูล

2.1 การศึกษาข้อมูล

การวิจัยในครั้งนี้ได้นำข้อมูลจากสำนักพัฒนานโยบายและแผนการประชาสัมพันธ์ของกรมประชาสัมพันธ์ [10] โดยเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 6 - 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 ซึ่งเป็นข้อมูลจากแบบสอบถามเกี่ยวกับพฤติกรรมการเปิดรับข้อมูลข่าวสารทั่วไปและข่าวสารรัฐสวัสดิการของกลุ่มผู้สูงอายุที่มีสัญชาติไทยอายุ 60 ปีบริบูรณ์ขึ้นไป และไม่เป็นกลุ่มทุพพลภาพ จำนวน 1,314 คน และมีแบบสอบถามทั้งหมด 32 ข้อ โดยมีความหมายของแต่ละตัวแปร (ข้อคำถาม) ดังตารางที่ 1

2.2 การเตรียมข้อมูล

ก่อนที่จะทำการจัดกลุ่มข้อมูล ต้องเตรียมข้อมูลก่อนเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ซึ่งการเตรียมข้อมูลมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดประเภทของตัวแปรทั้งหมดในข้อมูลดังต่อไปนี้

ตัวแปรที่เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพทั้งหมด 11 ตัวแปร สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่ 1 กำหนดเป็น Binominal ได้แก่ Gender, Q6, Q9 และ Q10

ประเภทที่ 2 กำหนดเป็น Polynomial ได้แก่ Occupation, Q1, Q5, Q7, Q8, Q11 และ Q12

ตารางที่ 1. ความหมายของแต่ละตัวแปร

ตัวแปร	ความหมาย	ตัวแปร	ความหมาย
1. Gender	เพศ	10. Q6	ข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านที่อยู่อาศัยที่ต้องการ
2. Education	การศึกษา	11. Q7	ข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านสาธารณสุขที่ต้องการ
3. Occupation	อาชีพ	12. Q8	ข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านการศึกษาที่ต้องการ
4. Salary	รายได้	13. Q9	ข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านรายได้/ความมั่นคงทางการเงินที่ต้องการ
5. Q1	ท่านรับรู้ข่าวสารทั่วไปจากสื่อใดมากที่สุด	14. Q10	ข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านการจ้างงาน
6. Q2	ความถี่ในการเปิดรับข้อมูลข่าวสารต่อสัปดาห์	15. Q11	ข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านการบริการสังคม/โครงสร้างพื้นฐาน/ด้านยุติธรรม
7. Q3	ระยะเวลาที่ท่านเปิดรับสื่อในแต่ละครั้ง	16. Q12	ช่องทางที่ต้องการในการรับข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการ
8. Q4	ช่วงเวลาที่ท่านเปิดรับสื่อมากที่สุด	17-32.	ระดับความต้องการในการรับข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการในแต่ละรูปแบบทั้ง 16 รูปแบบตามลำดับ*
9. Q5	ส่วนใหญ่ท่านเปิดรับสื่อเพราะอะไร	Q13_1 – Q13_16	

หมายเหตุ * 1) ข่าว 2) สกู๊ป/รายงานพิเศษ 3) รายการ 4) สารคดี 5) สปอต 6) เพลง 7) อินโฟกราฟิก 8) โปสต์ 9) สตอรี่ โฟสต์ 10) คลิปวิดีโอ 11) ถ่ายทอดสด/ไลฟ์ 12) ดิจิตอล 13) แชนแนล 14) SMS 15) การพูดแบบตัวต่อตัว 16) หอกระจายข่าว

ตัวแปรที่เป็นข้อมูลเชิงปริมาณมีทั้งหมด 21 ตัวแปร ได้แก่ Salary, Q2, Q3, Q4, Q13_1 ถึง Q13_16 จะกำหนดประเภทของข้อมูลเป็น Integer และได้กำหนดให้ตัวแปร Education ซึ่งเป็นข้อมูลระดับการศึกษาที่เรียงจากระดับต่ำไประดับสูงเป็น Integer ด้วยเช่นกัน เนื่องจากในการจัดกลุ่มข้อมูลเมื่อต้องการให้ตัวแปร Education มีผลกับการจัดกลุ่มข้อมูล จึงจำเป็นต้องกำหนดให้ตัวแปร Education เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ เพื่อให้มุมมองการวิเคราะห์พฤติกรรมของกลุ่มสามารถวิเคราะห์ ถึงระดับการศึกษาของแต่ละกลุ่มได้

ขั้นตอนที่ 2 เลือกตัวแปรเชิงปริมาณทั้งหมด 21 ตัวแปร เพื่อนำมาใช้ในการจัดกลุ่ม เนื่องจากการจัดกลุ่มด้วยขั้นตอนวิธีเคมีน ตัวแปรที่ใช้พิจารณาจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ

ขั้นตอนที่ 3 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการจัดกลุ่มมีช่วงข้อมูลของแต่ละตัวแปรแตกต่างกัน จึงทำการแปลงข้อมูลเพื่อให้ค่าของแต่ละข้อมูลเป็นค่ามาตรฐานเดียวกัน โดยใช้ค่ามาตรฐาน (Standard score) ดังสมการที่ (1)

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (1)$$

โดยที่ z_i คือ ค่ามาตรฐานของค่าสังเกตที่ i
 x_i คือ ค่าสังเกตที่ i
 \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ย
 s คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.3 การจัดกลุ่มข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ทำการจัดกลุ่มข้อมูลของผู้สูงอายุโดยหาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมด้วยวิธี Elbow และทำการจัดกลุ่มด้วยขั้นตอนวิธีเคมีน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ [11]

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่า k หรือจำนวนกลุ่มที่ต้องการจัดกลุ่ม ซึ่งผู้วิจัยใช้วิธี Elbow ในการหาจำนวนกลุ่ม โดยวิธี Elbow คือ วิธีการหาผลรวมของค่าคลาดเคลื่อนระหว่างจุดข้อมูลกับจุดเซนทรอยด์ (Within Cluster Sum of Squares: WCSS) เมื่อค่าผลรวมของระยะทางระหว่างจุดข้อมูลกับจุดเซนทรอยด์ (Centriod) ลดน้อยลง ความชันเส้นโค้งจะเริ่มเรียบและเกิดเป็นมุมที่มีลักษณะคล้ายข้อศอก [12] การหาค่า WCSS เริ่มจากหาระยะทางระหว่างจุดเซนทรอยด์กับจุดข้อมูลทั้งหมดในกลุ่มนั้น ๆ โดยใช้สูตรการหาระยะทางแบบยูคลิด ดังต่อไปนี้

กำหนดให้เซนทรอยด์ของกลุ่มที่ j คือ $c_j = (c_{j_1}, c_{j_2}, \dots, c_{j_n})$ และจุดข้อมูลในกลุ่มที่ j คือ $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ ซึ่งเป็นปริภูมิ n มิติ จะได้ว่าระยะทางแบบยูคลิดของเซนทรอยด์ c_j และจุด p ดังสมการที่ (2)

$$d(c_j, p) = \sqrt{(c_{j_1} - p_1)^2 + (c_{j_2} - p_2)^2 + \dots + (c_{j_n} - p_n)^2} \quad (2)$$

จากนั้นหาค่า WCSS ดังสมการที่ (3)

กำหนดให้มีจำนวนกลุ่ม m กลุ่ม ($k = m$)

$$WCSS = \sum_{p \in G_1} [d(c_1, p)]^2 + \sum_{p \in G_2} [d(c_2, p)]^2 + \dots + \sum_{p \in G_m} [d(c_m, p)]^2 \quad (3)$$

โดยที่ G_j คือ เซตของข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มที่ j เมื่อ $j \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$

c_j คือ จุดเซนทรอยด์ของกลุ่มที่ j เมื่อ $j \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดจุดศูนย์กลางเริ่มต้นหรือจุดเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่ม โดยกำหนดจำนวนจุดตามจำนวนกลุ่มที่ต้องการจัด

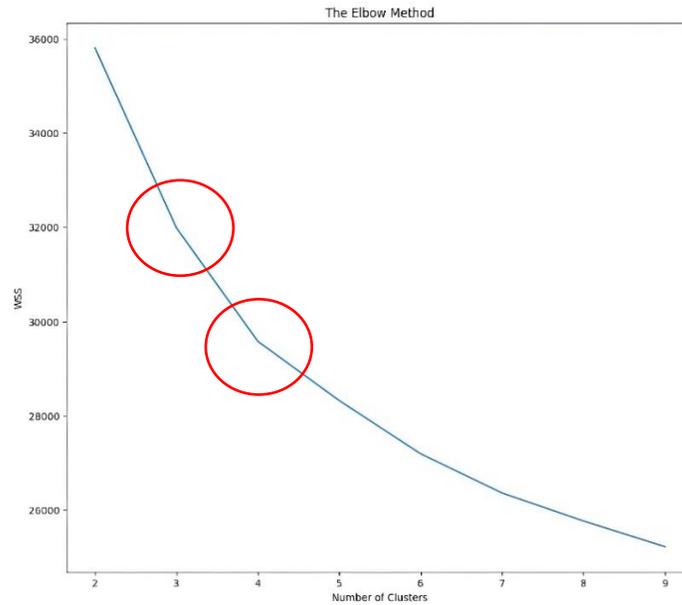
ขั้นตอนที่ 3 คำนวณระยะทางระหว่างจุดเซนทรอยด์กับจุดข้อมูลทุกจุด โดยใช้สูตรการหาระยะทางแบบยูคลิดดังสมการที่ (2)

ขั้นตอนที่ 4 จัดกลุ่มจุดข้อมูลให้อยู่กลุ่มเดียวกับจุดเซนทรอยด์ที่ใกล้ที่สุด

ขั้นตอนที่ 5 หาค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มเพื่อให้เป็นจุดเซนทรอยด์ใหม่ ทำขั้นตอนที่ 3 และ 4 ซ้ำจนกว่าจุดเซนทรอยด์ใหม่ที่ได้จะไม่เปลี่ยนแปลง

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการหาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมโดยใช้วิธี Elbow ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 1

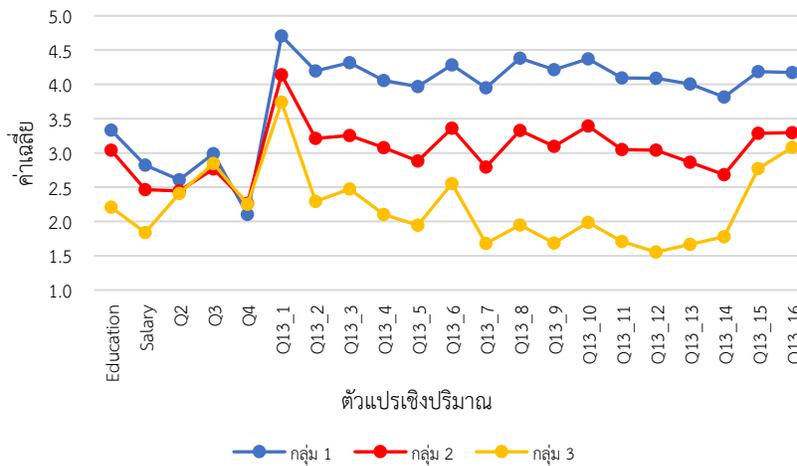


รูปที่ 1. กราฟ Elbow แสดงค่า WCSS สำหรับแต่ละ k

จากรูปที่ 1 เห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะหักศอกที่ $k = 3$ และ $k = 4$ ดังนั้นจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมของการจัดกลุ่มผู้สูงอายุ คือ จำนวน 3 กลุ่ม และจำนวน 4 กลุ่ม ต่อไปเป็นการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจัดกลุ่มโดยนำทั้งตัวแปรเชิงปริมาณและตัวแปรเชิงคุณภาพมาวิเคราะห์พฤติกรรมการรับข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการของผู้สูงอายุร่วมกัน ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.1 การวิเคราะห์การจัดกลุ่มจำนวน 3 กลุ่ม

จากการจัดกลุ่มเป็นจำนวน 3 กลุ่ม พบว่าค่าเฉลี่ยของตัวแปรเชิงปริมาณที่ใช้ในการจัดกลุ่มแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2. กราฟแสดงค่าเฉลี่ยตัวแปรเชิงปริมาณของการจัดกลุ่มผู้สูงอายุ 3 กลุ่ม

จากการวิเคราะห์ที่กลุ่มผู้สูงอายุทั้ง 3 กลุ่ม พบว่ามีคุณลักษณะหรือพฤติกรรมหลายประการที่คล้ายคลึงกัน เช่น สัดส่วนเพศชายต่อเพศหญิงใกล้เคียงกัน พฤติกรรมการรับข่าวสารทั่วไปและข่าวสารรัฐสวัสดิการจากสื่อโทรทัศน์ โดยส่วนใหญ่มีการบริโภคสื่อทุกวันในช่วงเช้าใช้ระยะเวลา 30 นาที ถึง 1 ชั่วโมง สำหรับความต้องการข่าวสารรัฐสวัสดิการมีความต้องการที่เหมือนกัน 5 ด้าน ได้แก่

- 1) ด้านที่อยู่อาศัย ต้องการความช่วยเหลือด้านที่พัก อาหาร และอื่น ๆ
- 2) ด้านสาธารณสุข ต้องการการอำนวยความสะดวกและบริการทางการแพทย์ รองลงมาคือสิทธิในระบบหลักประกันสุขภาพ (บัตรทอง 30 บาท)
- 3) ด้านรายได้ ต้องการสิทธิการได้รับเงินเบี้ยยังชีพและบัตรสวัสดิการแห่งรัฐของผู้สูงอายุ
- 4) ด้านการจ้างงาน ต้องการประกอบอาชีพด้วยตนเองที่บ้านหรือในชุมชน
- 5) ด้านการบริการสังคม ต้องการรถเคลื่อนที่ให้บริการลงทะเบียนสวัสดิการจากรัฐ รองลงมาคือต้องการสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้สูงอายุในที่สาธารณะ ยกเว้นกลุ่ม 1 ที่มีความต้องการสวนทางกับกลุ่ม 2 และ 3

ต่อมาวิเคราะห์คุณลักษณะและพฤติกรรมที่มีเฉพาะกลุ่ม สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

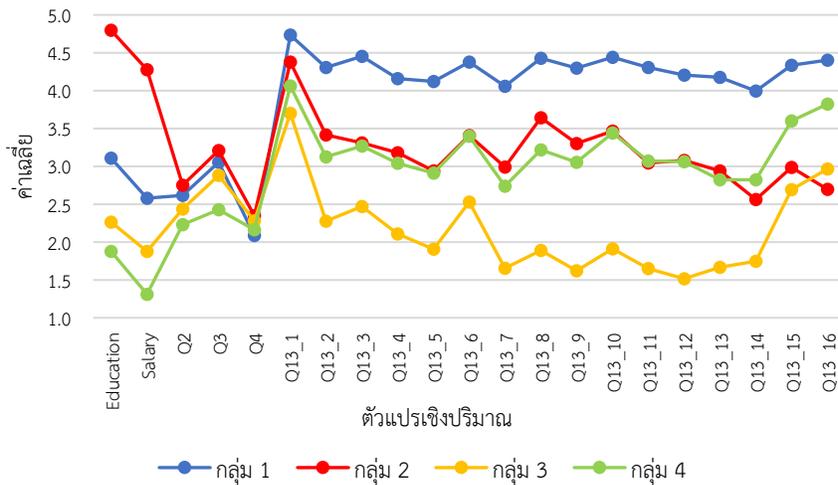
กลุ่ม 1 (สีฟ้า) มีจำนวน 305 คน (ร้อยละ 23) ผู้สูงอายุในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีวุฒิการศึกษาสูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ โดยมีสัดส่วนของผู้ที่จบปริญญาตรีสูงสุด และส่วนใหญ่เป็นคนเกษียณอายุ/ข้าราชการบำนาญ รองลงมา คือ เกษตรกรมีรายได้เฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ เนื่องจากมีสัดส่วนของผู้ที่มีรายได้ต่อเดือนมากกว่า 20,000 บาทมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามก็มีผู้ที่มีรายได้ต่อเดือนต่ำกว่า 5,000 บาทในสัดส่วนที่มากเช่นกัน มีระยะเวลาในการเปิดรับสื่อแต่ละครั้งสูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ นอกจากนี้ความต้องการข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านการศึกษายังแตกต่างจากกลุ่มอื่น ๆ คือ ต้องการรายการส่งเสริมความรู้สำหรับผู้สูงอายุ สำหรับรูปแบบของสื่อที่ต้องการในการรับข่าวสารรัฐสวัสดิการทุกรูปแบบอยู่ในระดับมากถึงมากที่สุด

กลุ่ม 2 (สีแดง) มีจำนวน 614 คน (ร้อยละ 47) ผู้สูงอายุในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีวุฒิการศึกษาใกล้เคียงกับกลุ่ม 1 แต่มีสัดส่วนคนที่มีวุฒิปริญญาตรีน้อยกว่าประกอบอาชีพเกษตรกร รองลงมา คือ เกษียณอายุ/ข้าราชการบำนาญมีรายได้ต่อเดือนต่ำกว่า 5,000 บาท สำหรับความต้องการข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านการศึกษา คือ ต้องการศูนย์การเรียนรู้ชุมชน มากกว่ารายการส่งเสริมความรู้เพื่อผู้สูงอายุ สำหรับรูปแบบสื่อที่ต้องการในการรับข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการของกลุ่มนี้จะมีความต้องการในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น ๆ โดยจะมีรูปแบบสื่อแบบข่าวที่ต้องการมากที่สุด รองลงมา คือ รูปแบบคลิปวิดีโอ

กลุ่ม 3 (สีเหลือง) มีจำนวน 395 คน (ร้อยละ 30) ผู้สูงอายุในกลุ่มนี้มีสัดส่วนของผู้ที่มีวุฒิการศึกษาระดับประถมศึกษาสูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ จึงมีสัดส่วนคนว่างงานสูงที่สุด ส่งผลให้คนเกินกว่าครึ่งมีรายได้ต่อเดือนต่ำกว่า 5,000 บาท สำหรับเรื่องความต้องการข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการมีความคล้ายกลุ่ม 2 สำหรับรูปแบบสื่อที่ต้องการในการรับข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการของกลุ่มนี้จะมีความต้องการในระดับน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น ๆ แต่จะมีรูปแบบข่าวที่ต้องการมากที่สุดและรองลงมา คือ รูปแบบหอกระจายข่าว

3.2 การวิเคราะห์การจัดกลุ่มจำนวน 4 กลุ่ม

จากการจัดกลุ่มเป็นจำนวน 4 กลุ่ม พบว่าค่าเฉลี่ยของตัวแปรเชิงปริมาณที่ใช้ในการจัดกลุ่มแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3. กราฟแสดงค่าเฉลี่ยตัวแปรเชิงปริมาณของการจัดกลุ่มผู้สูงอายุ 4 กลุ่ม

จากการวิเคราะห์การจัดกลุ่มผู้สูงอายุจำนวน 4 กลุ่ม พบว่า กลุ่ม 1 มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับกลุ่ม 1 ของการจัดกลุ่มผู้สูงอายุจำนวน 3 กลุ่ม กลุ่ม 3 มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับกลุ่ม 3 ของการจัดกลุ่มผู้สูงอายุจำนวน 3 กลุ่ม กลุ่ม 4 มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับกลุ่ม 2 ของการจัดกลุ่มผู้สูงอายุ 3 กลุ่ม โดยจะเห็นได้ว่ากลุ่ม 2 ไม่มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับกลุ่มใดเลยของการจัดกลุ่มผู้สูงอายุจำนวน 3 กลุ่ม ดังนั้นจะวิเคราะห์พฤติกรรมกลุ่ม 2 เพิ่มเติมดังนี้

กลุ่ม 2 (สีแดง) มีจำนวน 295 คน (ร้อยละ 22) ผู้สูงอายุในกลุ่มนี้มีวุฒิการศึกษาสูงที่สุด โดย 80 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มนี้จบการศึกษาระดับปริญญาตรีหรือสูงกว่าปริญญาตรี ส่วนใหญ่เป็นคนเกษียณอายุ/ข้าราชการบำนาญ ทำให้มีรายได้ต่อเดือนมากกว่า 20,000 บาท รับข้อมูลข่าวสารทั่วไปผ่านสื่อดิจิทัล ไม่ว่าจะเป็นเว็บไซต์ โลกฟีดส เฟซบุ๊ก ทวิตเตอร์ อินสตาแกรม ยูทูป ดิจิต็อก พอดแคสต์ กลุ่มไลน์ และ SMS สำหรับความต้องการข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านการศึกษา คือ รายการส่งเสริมความรู้เพื่อผู้สูงอายุ และความต้องการข่าวสารด้านการบริการสังคม คือ สิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้สูงอายุในที่สาธารณะ รูปแบบสื่อที่ต้องการในการรับข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการของกลุ่มนี้จะมีความต้องการในระดับปานกลาง เมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น ๆ แต่จะมีรูปแบบข่าวที่ต้องการมากที่สุด รองลงมา คือ รูปแบบโพสต์

4. สรุปผลการทดลอง

จากการจัดกลุ่มข้อมูลของผู้สูงอายุ ซึ่งมีจำนวน 1,314 คน พบว่ามีจำนวนในการจัดกลุ่มที่เหมาะสมคือ จำนวน 3 กลุ่ม และจำนวน 4 กลุ่ม สามารถสรุปจุดเด่นในแต่ละกลุ่มของผู้สูงอายุ และแนะนำแนวทางในการประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการของแต่ละกลุ่มได้ดังนี้

ผู้สูงอายุกลุ่ม 1 “กลุ่มการศึกษาสูง รายได้ดี ชอบเสฟสื่อ” มีสมาชิกจำนวน 305 คน

กลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีวุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี และมีรายได้เฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ ส่วนใหญ่เป็นคนเกษียณอายุ/ข้าราชการบำนาญ ทำให้มีเวลาและความต้องการในการเปิดรับข้อมูลข่าวสารนั้น มากกว่ากลุ่มอื่น ๆ โดยบริโภคสื่อทุกรูปแบบ เช่น ข่าว คลิปวิดีโอ ดิจิต็อก และสตอรี่โพสต์ การประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการสามารถประชาสัมพันธ์ได้ในช่วงเช้า และประชาสัมพันธ์ได้ทุกรูปแบบ และหากรัฐบาลต้องการประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านการศึกษา ควรผลิตรายการที่ส่งเสริมความรู้เพื่อผู้สูงอายุจะทำให้ได้รับความสนใจจากกลุ่มนี้มากที่สุด

ผู้สูงอายุกลุ่ม 2 “กลุ่มมีการศึกษา รายได้ปานกลาง ชอบฟังข่าว” มีสมาชิกจำนวน 614 คน

กลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีวุฒิการศึกษาระดับประถมศึกษา รองลงมาคือระดับปริญญาตรี ประกอบอาชีพเกษตร มีรายได้เฉลี่ยต่ำกว่ากลุ่ม 1 สำหรับการบริโภคสื่อของคนกลุ่มนี้มีการเลือกรูปแบบในการรับข่าวสารโดยชอบรูปแบบข่าวมากที่สุด รองลงมา คือ รูปแบบคลิปวิดีโอ การประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการสามารถประชาสัมพันธ์ได้ในช่วงเช้า และประชาสัมพันธ์ในรูปแบบของข่าวหรือรูปแบบคลิปวิดีโอ และหากรัฐบาลต้องการประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านศึกษาควรจะประชาสัมพันธ์เรื่องศูนย์การเรียนรู้ชุมชนจะได้รับความสนใจจากกลุ่มนี้มากที่สุด

ผู้สูงอายุกลุ่ม 3 “กลุ่มการศึกษาระดับพื้นฐาน รายได้น้อย ไม่ชอบเสฟสื่อ” มีสมาชิกจำนวน 395 คน

กลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีวุฒิการศึกษาระดับประถมศึกษา มีสัดส่วนคนว่างงานสูงที่สุด ส่งผลให้มีรายได้ต่อเดือนต่ำกว่า 5,000 บาท และคนกลุ่มนี้มีความต้องการในการเปิดรับข้อมูลข่าวสารน้อยกว่ากลุ่มอื่น ๆ ทุกรูปแบบ โดยส่วนใหญ่บริโภคข่าวเป็นหลัก รองลงมา คือ รูปแบบกระจายข่าว การประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการสามารถประชาสัมพันธ์ได้ในช่วงเช้า และประชาสัมพันธ์ในรูปแบบของข่าวและรูปแบบกระจายข่าว และหากรัฐบาลต้องการประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านศึกษานอกจากจะประชาสัมพันธ์เรื่องศูนย์การเรียนรู้ชุมชนแล้วควรประชาสัมพันธ์คล้ายกลุ่ม 2

สำหรับกรณีการจัดกลุ่มผู้สูงอายุออกเป็น 4 กลุ่ม พบว่ามี 1 กลุ่มที่มีลักษณะส่วนใหญ่ไม่คล้ายคลึงกับกลุ่มใดเลยของการจัดกลุ่มผู้สูงอายุจำนวน 3 กลุ่ม โดยจะวิเคราะห์จุดเด่นของผู้สูงอายุกลุ่มดังกล่าวได้ดังต่อไปนี้

กลุ่มผู้สูงอายุ “รายได้สูง ข้าราชการบำนาญ ชอบโซเชียล” มีสมาชิกจำนวน 295 คน กลุ่มนี้ส่วนใหญ่จบการศึกษาระดับปริญญาตรีหรือสูงกว่าปริญญาตรี ส่งผลให้คนในกลุ่มนี้มีรายได้เฉลี่ยต่อเดือนมากกว่า 20,000 บาท และคนส่วนใหญ่เป็นคนเกษียณอายุ/ข้าราชการบำนาญ การประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการควรประชาสัมพันธ์ในช่วงเช้าผ่านสื่อโซเชียลไม่ว่าจะเป็นเว็บไซต์ ไลฟ์สด เฟซบุ๊ก ทวิตเตอร์ อินสตาแกรม ยูทูป ดิกด็อก พอดแคสต์ กลุ่มไลน์ และ SMS และหากรัฐบาลต้องการประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการด้านบริการสังคมควรประชาสัมพันธ์เรื่องสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้สูงอายุในที่สาธารณะ

จากผลการวิจัยพบว่าการจัดกลุ่มข้อมูลการเปิดรับข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการของผู้สูงอายุในประเทศไทย โดยใช้ขั้นตอนวิธีเคมีน และใช้วิธี Elbow ในการกำหนดจำนวนกลุ่มที่เหมาะสม สามารถจัดกลุ่มผู้สูงอายุที่มีพฤติกรรมการเปิดรับข้อมูลข่าวสารที่ใกล้เคียงกันอยู่ในกลุ่มเดียวกันได้ ซึ่งจะช่วยให้วิเคราะห์พฤติกรรมในการเปิดรับข้อมูลข่าวสารรัฐสวัสดิการของผู้สูงอายุในแต่ละกลุ่มได้ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถช่วยเป็นแนวทางให้ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทางด้านการประชาสัมพันธ์ข่าวสารรัฐสวัสดิการสามารถประชาสัมพันธ์ได้ตรงจุดและเข้าถึงผู้สูงอายุมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการประชาสัมพันธ์ให้เข้าถึงผู้สูงอายุทุกคนได้อย่างถ้วนหน้า

สำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตสามารถวิเคราะห์แต่ละกลุ่มเพิ่มเติมได้ โดยอาจจะทำแบบสอบถามเพิ่มเติมที่ตรงกับข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์แต่ละกลุ่มได้ละเอียดและตรงประเด็นยิ่งขึ้น นอกจากนี้สามารถนำวิธีการจัดกลุ่มดังกล่าวไปเป็นแนวทางในการวิเคราะห์การจัดกลุ่มข้อมูลลักษณะอื่น ๆ ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักพัฒนานโยบายและแผนการประชาสัมพันธ์ของกรมประชาสัมพันธ์สำหรับความอนุเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] นิภาพรณ เจนสันติกุล. 2565. รัฐสวัสดิการ : การนำไปปฏิบัติในบริบทสังคมไทยเพื่อความครอบคลุมทางสังคม. *วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มจร วิทยาเขตอีสาน*, 3(3), 20-37. [Nipapan Jentsantikul. 2022. Welfare State: Implementation in the Thai Social Context for Social Inclusion. *Journal of Humanities and Social Sciences Mahamakut Buddhist University Isan Campus*, 3(3), 20-37. (in Thai)]
- [2] Maimon, O. and Rokach, L. 2010. Data mining and knowledge discovery handbook. 2nd ed., Springer, New York.

- [3] Syakur, M.A., Khotimah, B.K., Rochman, E.M.S. and Satoto, B.D. 2018. Integration k-means clustering method and elbow method for identification of the best customer profile cluster. *IOP conference series: materials science and engineering*, 336, 1-6, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/336/1/012017>.
- [4] ทิพยา ถินสูงเนิน, มาโนช ถินสูงเนิน, กิตติศักดิ์ เกิดประสพ และนิตยา เกิดประสพ. 2561. การตรวจสอบความเหมาะสมของการจัดกลุ่มข้อมูลอนุกรมเวลา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 20(2), 127-147. [Tippaya Thinsungnoen, Manoch Thinsungnoen, Kittisak Kerdprasop and Nittaya Kerdprasop. 2018. The Consideration of Proper Time-serier Clustering. *Journal of Science and Technology Ubon Ratchathani University*, 20(2), 127-147. (in Thai)]
- [5] Cui, M. 2020. Introduction to the k-means clustering algorithm based on the elbow method. *Accounting, Auditing and Finance*, 1(1), 5-8, <https://dx.doi.org/10.23977/accaf.2020.010102>.
- [6] Duarte-Duarte, J.B., Talero-Sarmiento, L.H. and Rodríguez-Padilla, D.C. 2021. Methodological proposal for the identification of tourist routes in a particular region through clustering techniques. *Heliyon*, 7(4), 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06655>.
- [7] ณรรฐคุณ วิรุฬห์ศรี, ลัทธพล โชครัตน์ประภา, ณัฐนิชา ศรีสมาน และพรทิพย์ เดชพิชัย. 2565. การวิเคราะห์แบ่งกลุ่มลูกค้าโดยใช้พฤติกรรมการซื้อเชิงลึก : กรณีศึกษาบริษัทผู้ผลิตอาหารสัตว์เลี้ยงแห่งหนึ่ง. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 31(1), 103-119. [Nathakhun Wiroonsri, Latthapol Chokratprapa, Natnicha Srisamarn and Porntip Dechpichai. 2022. Clustering Customers Using Their In-Depth Buying Behavior: A Pet Food Manufacturing Company Case Study. *Journal of Science Ladkrabang*, 31(1), 103-119. (in Thai)]
- [8] วุฒิชชาติ สุนทรสมัย. 2564. การวิเคราะห์ปัจจัยและจำแนกกลุ่มนักท่องเที่ยวตามภาพลักษณ์แหล่งท่องเที่ยวจังหวัดชลบุรีเพื่อเลือกตลาดเป้าหมายที่ตั้งใจกลับมาเที่ยวซ้ำ. *วารสารวิชาการมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา*, 29(1), 123-148. [Vuttichat Soonthonsmai. 2022. A Factor and Cluster Analysis of Chon Buri Destination for Market Targeting with Tourists' Revisit Intention. *Journal of Humanities and Social Sciences Burapha University*, 29(1), 123-148. (in Thai)]
- [9] เจนจิรา สุกใส และนิภาพร ชนะมาร. 2566. การจัดกลุ่มข้อมูลเศรษฐกิจครัวเรือนด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดกลุ่ม. *วารสารวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย*, 3(1), 18-31. [Janejira Suksai and Nipaporn Chanamarn. 2023. Clustering of Household Economic Data Using K-Means Clustering Techniques. *Journal of Science, Engineering and Technology Loei Rajabhat University*, 3(1), 18-31. (in Thai)]

- [10] สำนักพัฒนานโยบายและแผนการประชาสัมพันธ์. 2566. ปิงปองประมาธ พ.ศ. 2566 การพัฒนาการสื่อสารจากความต้องการรัฐสวัสดิการของกลุ่มเปราะบาง (กลุ่มผู้สูงอายุ คนพิการ และผู้มีรายได้น้อย). แหล่งข้อมูล : <https://plan.prd.go.th/th/content/category/detail/id/15/iid/173214>. ค้นเมื่อวันที่ 24 เมษายน 2566.
- [11] ภคภูมิ สารพัฒน์. 2563. อีกชั้นของ k-means algorithm ที่สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลได้ทุกประเภท. แหล่งข้อมูล : <https://bigdata.go.th/big-data-101/k-means-algorithm-for-clustering-large-data-sets-with-categorical-values/>. ค้นเมื่อวันที่ 26 กันยายน 2566.
- [12] เชษฐเนติ ศรีสีอาน. 2564. การหาค่า k ของ Kmeans ด้วยวิธี Elbow Method. แหล่งข้อมูล : <https://chetnetisrisaan.medium.com/>. ค้นเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2566.

ลักษณะของมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียน

Characteristics of Mozzarella Cheese Supplemented with Durian Pulp

สมภา เทิดขวัญชัย¹ น้อมจิตต์ สุธิบุตร² ชญาภัทร์ ก่ออารีโย² นพพร สกุลยีนยงสุข³ ชาวลิต อู่อุปถาก¹ และ ธนภพ โสทรโยม^{3*}

Sumapar Thedkwanchai¹ Nomjit Suteebut² Chayapat Keeariyo² Nopporn Sakulyunyongsuk³

Chaowalit Auppathak¹ and Thanapop Soteyome^{3*}

¹สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
กรุงเทพฯ ประเทศไทย

²สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ ประเทศไทย

³สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
กรุงเทพฯ ประเทศไทย

¹Program in Foods and Nutrition, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

²Program in Home Economics, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

³Program in Food Science and Technology, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala
University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 14 สิงหาคม 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 28 ตุลาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 28 ตุลาคม 2567

Received: 14 August 2023, Revised: 28 October 2024, Accepted: 28 October 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาสูตรพื้นฐานที่เหมาะสมของมอสซาเรลล่าชีส 2) ศึกษาปริมาณเนื้อทุเรียนเสริมที่เหมาะสมในมอสซาเรลล่าชีสจากสูตรพื้นฐานที่คัดเลือก และ 3) ศึกษาลักษณะทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐานและมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียน จากการประเมินการยอมรับของผู้บริโภคของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐานจำนวน 3 สูตร พบว่าผู้ประเมินให้การยอมรับสูตรที่ 2 ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยคะแนนเท่ากับ 7.20, 7.70, 7.60, 7.80, 7.55 และ 7.80 ตามลำดับ จากนั้นนำเนื้อทุเรียนมาเสริมในสูตรพื้นฐานสูตรที่ 2 ในปริมาณที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) ร้อยละ 5 ร้อยละ 10

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: sumapar.t@rmutp.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.260039>

และร้อยละ 15 ของน้ำหนักนํ้านมวัวดิบ ผลการประเมินการยอมรับของผู้บริโภคพบว่า มอสซาเรลล่าชีสที่เสริมทุเรียนร้อยละ 10 ของน้ำหนักนํ้านมวัวดิบ มีค่าเฉลี่ยคะแนนด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงสุดเท่ากับ 8.00, 8.05, 7.95, 7.90, 8.03 และ 8.23 ตามลำดับ ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 พบว่ามอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐานมีค่าสีด้านความสว่าง (L^*) และเนื้อสัมผัส (ความยืดตัว) ต่ำกว่า แต่มีค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ที่มีค่าสูงกว่ามอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 สำหรับคุณภาพทางทางเคมี พบว่ามอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 มีค่าพลังงาน ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าน้อยกว่า แต่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตและความชื้นมากกว่ามอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน สำหรับคุณภาพทางจุลินทรีย์ พบว่าทั้ง 2 สูตรมีปริมาณจุลินทรีย์เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 209 พ.ศ. 2543 ว่าด้วยกำหนดคุณภาพหรือมาตรฐาน หลักเกณฑ์เงื่อนไข และวิธีการในการตรวจวิเคราะห์ของอาหารด้านจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค

คำสำคัญ : ชีส มอสซาเรลล่าชีส ทุเรียน

Abstract

The aims of this research were to: 1) study the optimal basic formula for mozzarella cheese, 2) study the optimal amount of durian pulp to be added to the selected basic mozzarella cheese, and 3) study the physical, chemical, and microbial properties of both the basic mozzarella cheese formula and the mozzarella cheese with added durian pulp. A consumer acceptance assessment of three variations of the basic mozzarella cheese formula showed that Form 2 received the highest scores from evaluators in terms of appearance, color, aroma, taste, texture, and overall liking, with average scores of 7.20, 7.70, 7.60, 7.80, 7.55, and 7.80, respectively. Durian pulp was subsequently added to the selected Form 2 mozzarella cheese at four different levels: 0% (control), 5%, 10%, and 15% of the weight of raw cow's milk. Consumer acceptance evaluations revealed that mozzarella cheese with 10% durian pulp had the highest average scores for appearance, color, aroma, taste, texture, and overall liking, with scores of 8.00, 8.05, 7.95, 7.90, 8.03, and 8.23, respectively. An investigation of the physical characteristics of both the basic mozzarella cheese and the mozzarella cheese with 10% durian pulp revealed that the basic mozzarella cheese had lower brightness (L^*) and stretchability but higher color intensity in terms of

redness (a^*) and yellowness (b^*) than the mozzarella cheese with 10% durian pulp. In terms of chemical quality, the mozzarella cheese with 10% durian pulp had slightly lower energy content, protein, fat, and ash values, but higher carbohydrate and moisture content compared to the basic mozzarella cheese. Regarding microbiological quality, both formulations had microbial amounts in accordance with the specified standards. According to the Ministry of Public Health's standards, set by Notification of the Ministry of Public Health (No.209) B.E.2543 (2000) Re: Prescribing the quality or standard, principles, conditions and methods of analysis for pathogenic microorganisms in foods.

Keywords: Cheese, Mozzarella cheese, Durian

1. บทนำ

ทุเรียนเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญอันดับต้นของประเทศ ในปี พ.ศ. 2565 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกทุเรียนประมาณ 941,204 ไร่ โดยมีผลผลิตประมาณ 1,252,086 ตัน และมีมูลค่าส่งออกสูงถึง 171,612 ล้านบาท [1] ทุเรียนสดมีมูลค่าการส่งออก 110,146.21 ล้านบาท ในขณะที่ทุเรียนแช่แข็งมีมูลค่าการส่งออก 14,963.44 ล้านบาท โดยมีแนวโน้มอัตราการขยายตัวเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 56.31 [2] สำหรับทุเรียนที่นำมาแช่แข็งนั้นส่วนใหญ่เป็นทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่มีเนื้อมาก เกษตรกรจะทำการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนที่สุกได้ที่ ส่งไปยังพ่อค้าคนกลางหรือสถานประกอบการ เพื่อคัดผลทุเรียนสดที่มีลักษณะสอดคล้องกับความต้องการของตลาดส่งขายให้กับลูกค้าหรือผู้บริโภค แต่ถ้ามีผลทุเรียนตกเกรดที่มีลักษณะไม่ตรงตามความต้องการ เช่น ขนาดไม่ได้ตามความต้องการ หรือมีลักษณะบางประการที่บกพร่อง เช่น ผลมีรอยแตกหรือผลมีรูปร่างไม่สวยงาม เป็นต้น ผลทุเรียนเหล่านี้จะถูกนำไปขายในราคาที่ต่ำกว่าทุเรียนคุณภาพดี ดังนั้นพ่อค้าคนกลางหรือผู้ประกอบการจึงได้นำทุเรียนตกเกรดไปแยกเอาเฉพาะส่วนของเนื้อทุเรียนที่บริโภคได้ไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ทุเรียนแช่แข็ง เพื่อส่งไปจำหน่ายให้ลูกค้านำไปบริโภคโดยตรง หรือส่งให้กับโรงงานเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบต้นทาง (Intermediate product) ส่วนเนื้อทุเรียนที่ไม่ได้คุณภาพ เช่น เศษเหลือจากการตัดแต่งทุเรียนที่ไม่สามารถส่งขายได้ สุกหรือดิบเกินไป ไม่สวย หรือมีรอยตำหนิบนเนื้อทุเรียน เป็นต้น เศษเนื้อทุเรียนเหล่านี้ถูกจำหน่ายไปผลิตเป็นเนื้อทุเรียนกวนที่มีราคาไม่สูงมาก เศษเนื้อทุเรียนเหล่านี้มีจำนวนมากพอที่จะนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้สูงขึ้น เช่น ทุเรียนกวน แยมทุเรียน ไอศกรีมทุเรียน พืชชาทุเรียนชีส หรือพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเฉพาะกับกลุ่มบุคคลที่ชอบบริโภคทุเรียน หรือประเภทอาหารตะวันตก โดยใช้ประโยชน์เศษเนื้อทุเรียนอย่างคุ้มค่า

ชีส คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนํานม ครีมบัตเตอร์มิลค์ หรือเวย์ อย่างหนึ่งอย่างใดหรือหลายอย่างมาผสมกับเอนไซม์ หรือกรดแล็กติกที่สร้างจากแบคทีเรียที่ผลิตกรดแล็กติก (Lactic acid bacteria) หรือใช้

ทั้งสองอย่างร่วมกัน จนเกิดการรวมตัวเป็นก้อนแล้วแยกส่วนที่เป็นน้ำออก เพื่อให้โปรตีนเคซีน (Casein) ซึ่งเป็นโปรตีนหลักในน้ำนมตกตะกอนหรือแยกตัวออกมา โดยมีลักษณะเป็นก้อนตะกอนขาวที่เรียกว่า เคิร์ด (Curd) แม้จะยังมีน้ำหรือของเหลวอยู่ก็จะถูกคัดแยกเพื่อกลั่นน้ำออก และนำมาใช้ในลักษณะสด หรือนำมาบ่มให้ได้ที่ก่อนใช้ด้วยวิธีการที่แตกต่างกันออกไปตามขั้นตอนการหมักและบ่ม รวมถึงชนิดของจุลินทรีย์ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของชีส [3] การผลิตชีสโดยใช้เอนไซม์เป็นวิธีการตกตะกอนเคซีนโดยใช้เรนเนท ซึ่งจะตัดโปรตีนแคปทาเคซีนที่มีประจุลบ เพื่อให้ปลายด้านลบของโซลละลายเป็นของเหลว เนื้อสัมผัสของชีสจะแน่นแข็งกว่าแบบที่เติมกรด การผลิตชีสโดยใช้กรดอาจทำได้โดยการเติมกรดลงไปโดยตรง หรือใช้กรดที่สร้างมาจากแบคทีเรียที่ผลิตกรดแล็กติก การเติมกรดทำให้นมที่มีเคซีนเป็นประจุลบเปลี่ยนเป็นไม่มีประจุ และรวมตัวกันตกตะกอน เนื้อสัมผัสของชีสที่เติมกรดจะนุ่ม โดยการผลิตจะให้ผลต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของชีส [4] ชีสเป็นอาหารที่มีคุณประโยชน์ทางโภชนาการ อุดมไปด้วยแคลเซียม โปรตีน ฟอสฟอรัส และไขมัน ชีสมีลักษณะและประเภทที่แตกต่างกัน เป็นวัตถุดิบที่นิยมในการประกอบอาหาร ซึ่งจะทำให้อาหารมีกลิ่นแรง รสเข้มข้น และยืดอายุรับประทาน อาหารจำพวกพาสต้า มักกะโรนี มักจะมีมอสซาเรลล่าชีสเป็นส่วนประกอบ นอกจากจะเป็นส่วนประกอบในอาหารคาวแล้ว ชีสยังเป็นส่วนประกอบของขนมอีกด้วย เช่น ชีสเค้ก เนื่องจากชีสเหมาะกับทุกเพศทุกวัย สามารถรับประทานแล้วดีต่อสุขภาพ ลดความเสี่ยงต่อการเกิดกระดูกพรุน ข้อเข่าเสื่อม เสริมความแข็งแรงของฟัน ลดระดับคอเลสเตอรอล และลดความเสี่ยงโรคเบาหวาน แต่ต้องรับประทานแต่พอดีจึงจะเกิดประโยชน์กับร่างกาย [5] ด้วยประโยชน์ที่กล่าวมาทำให้อุปสงค์ต่อการบริโภคของมอสซาเรลล่าชีสมีเพิ่มมากขึ้นทั่วโลกในอุตสาหกรรมอาหาร [6] ปัจจุบันน้ำนมโคเป็นแหล่งนมดิบหลักที่ใช้ผลิตมอสซาเรลล่าชีส และมีผู้ประกอบการรายย่อยหลายคนสนใจผลิตชีสเพื่อเพิ่มมูลค่าให้ธุรกิจน้ำนม การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตมอสซาเรลล่าชีสโดยใช้แหล่งน้ำนมดิบที่แตกต่างกัน เพื่อพัฒนาคุณภาพชีสยังคงเป็นสิ่งที่ต้องพัฒนาต่อไป นอกจากนี้ ชีสยังเป็นวัตถุดิบหลักที่ขาดไม่ได้สำหรับอาหารของชาติตะวันตก และชีสส่วนใหญ่ที่รับประทาน หรือพบในปัจจุบันได้ผ่านการผลิตในระดับอุตสาหกรรม มีการฆ่าเชื้อและทำให้สะอาดทุกขั้นตอนของการผลิต จึงค่อนข้างมั่นใจได้ในความปลอดภัย ทำให้ชีสยังคงมีเอกลักษณ์และได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง

มอสซาเรลล่าชีสเป็นชีสชนิดสด มีแหล่งกำเนิดในประเทศอิตาลี เริ่มต้นผลิตจากน้ำนมควาย ปัจจุบันผลิตได้ทั้งจากน้ำนมวัวและน้ำนมควาย มอสซาเรลล่าชีสเป็นชีสที่มีเนื้อสัมผัสนุ่ม มีสีเหลืองอ่อน หรือสีครีม เนื้อเรียบเนียน ชีสชนิดนี้มักมีรสที่ไม่แรง ซึ่งทำการบ่มหรือไม่บ่มก็ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต สำหรับมอสซาเรลล่าชีสที่นิยมใช้เป็นส่วนประกอบของหน้าพิซซ่าจะมีความชื้นต่ำกว่ามอสซาเรลล่าชีสสด โดยมีความโดดเด่นเรื่องความยืด นุ่มหนึบ ปกติมีสีขาวแต่อาจมีสีเหลืองอ่อนได้ ขึ้นอยู่กับพืชหรืออาหารสัตว์ที่วัวกินเข้าไป

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเนื้อทุเรียนตากเกรด สายพันธุ์หมอนทอง มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารโดยเสริมในมอสซาเรลล่าชีส เนื่องจากเนื้อทุเรียนที่บดละเอียดมีลักษณะเป็นครีมและสามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกับมอสซาเรลล่าชีสได้ ใช้เป็นวัตถุดิบต่อยอดให้กับผลิตภัณฑ์มอสซาเรลล่าชีสซึ่งเป็นอาหารตะวันตกพร้อมรับประทาน อีกทั้งยังเป็นการสร้างโอกาส และเพิ่มช่องทางการตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ สร้างความร่วมมือทางการค้า พัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่จากฐานการผลิต และทุนที่มีอยู่เดิมให้เกิดประโยชน์สูงสุด ตลอดจนสร้างนวัตกรรมที่ยังไม่มีในระบบตลาด และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันเชิงพาณิชย์

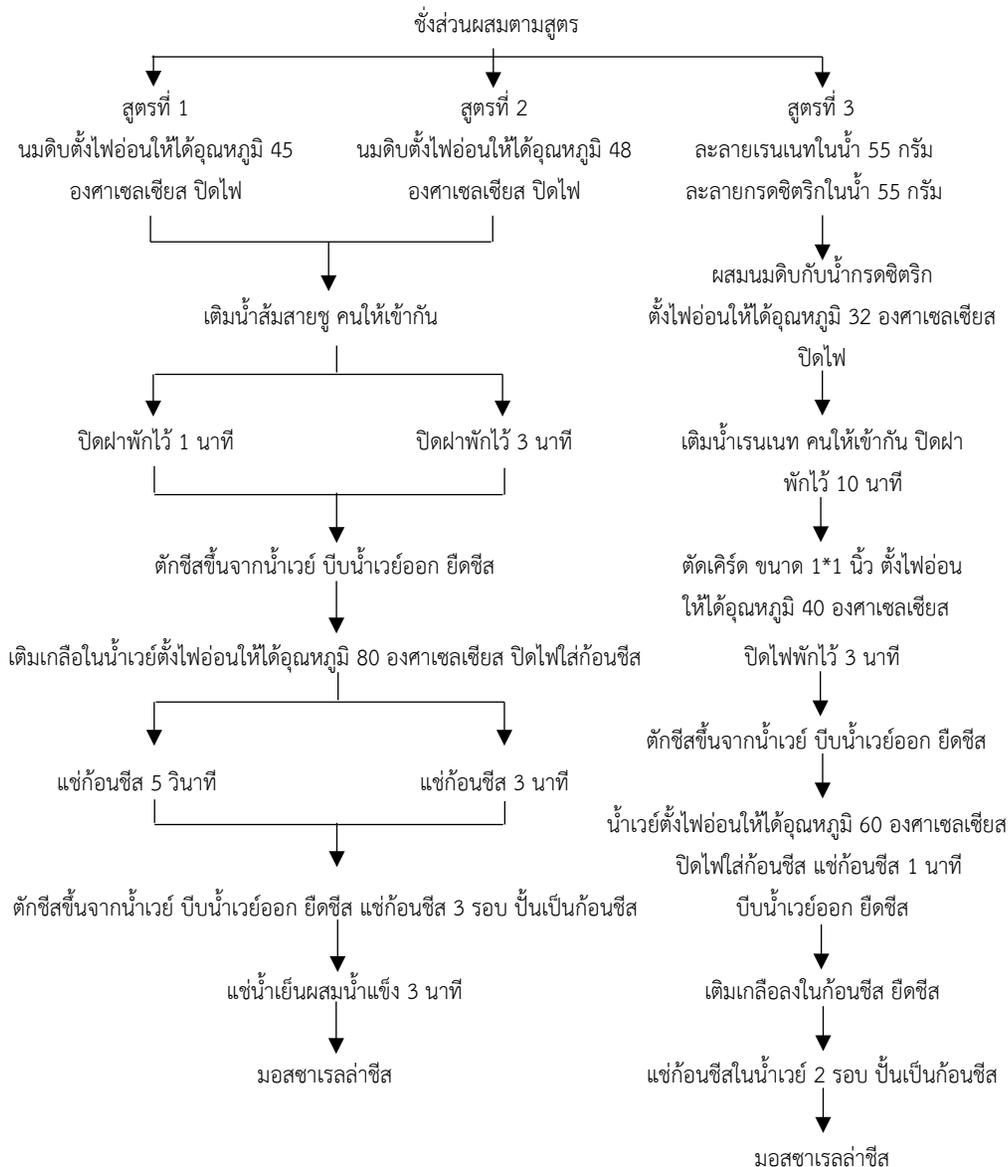
2. วิธีการทดลอง

2.1 ศึกษาสูตรพื้นฐานของมอสซาเรลล่าชีส

คัดเลือกสูตรพื้นฐานของมอสซาเรลล่าชีสจำนวน 3 สูตร โดยมีวัตถุดิบดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับวิธีการเตรียมแสดงในรูปที่ 1 เตรียมตัวอย่างมอสซาเรลล่าชีสโดยนำมอสซาเรลล่าชีส 10 กรัม ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 500 วัตต์ เป็นเวลา 20 วินาที โดยอุ่นร้อนแล้วจัดเสิร์ฟชีสทั้ง 3 ตัวอย่างให้ผู้ทดสอบชิมประเมินคุณภาพของชีสในด้านประสาทสัมผัส ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการชิมแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) จากผู้ที่มีประสบการณ์ในการบริโภคมอสซาเรลล่าชีส จำนวน 30 คน ทั้งนี้ให้ผู้ทดสอบชิมบ้วนน้ำเปล่ากลั้วคอระหว่างชิมตัวอย่างทั้ง 3 สูตร ตามลำดับการเสิร์ฟโดยใช้เลขสุ่ม นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างหน่วยทดลองโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทำการวิจัยโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design: RCBD)

ตารางที่ 1. วัตถุดิบของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน

วัตถุดิบ	สูตร 1 [7]		สูตร 2 [8]		สูตร 3 [9]	
	กรัม	ร้อยละ	กรัม	ร้อยละ	กรัม	ร้อยละ
นํ้านมวัว (ดิบ)	2,000.00	94.49	1,500.00	92.21	3,800.00	96.90
นํ้าส้มสายชูกลั่น 5%	110.00	5.20	120.00	7.38	-	-
นํ้าสะอาด	-	-	-	-	110.00	2.87
กรดซิตริก	-	-	-	-	7.50	0.13
เรนเนท	-	-	-	-	0.83	0.02
เกลือ	6.66	0.31	6.66	0.41	3.33	0.08



รูปที่ 1. วิธีการทำมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน 3 สูตร

2.2 ศึกษาปริมาณเนื้อทุเรียนเสริมในมอสซาเรลล่าชีส

ศึกษาปริมาณเนื้อทุเรียนที่เหมาะสมเพื่อเสริมในมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐานที่ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับจากข้อ 2.1 โดยใช้ทุเรียนตากเกรดสายพันธุ์หมอนทอง ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้หรือของแข็งที่ละลายได้ของเนื้อทุเรียนอยู่ระหว่าง 25-26 °Brix ทำการศึกษาปริมาณการเสริมที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) ร้อยละ 5 ร้อยละ 10 และร้อยละ 15 ของน้ำหนักนํ้านมวัวดิบ ปริมาณ

การเสริมเนื้อทุเรียนในมอสซาเรลล่าชีส แสดงดังตารางที่ 2 โดยนำเนื้อทุเรียนตากเกรดมาบดด้วยเครื่องบด (Vitamix) ให้ละเอียด และนำมาผสมในขั้นตอนการเติมน้ำส้มสายชูในการผลิตมอสซาเรลล่าชีส จากนั้นนำมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนที่ได้มาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เช่นเดียวกับวิธีการในข้อ 2.1

ตารางที่ 2. ปริมาณการเสริมเนื้อทุเรียนในมอสซาเรลล่าชีส

วัตถุดิบ	น้ำหนักวัตถุดิบ (กรัม)			
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 5	ร้อยละ 10	ร้อยละ 15
น้ำนมวัวดิบ	1,500.00	1,500.00	1,500.00	1,500.00
น้ำส้มสายชู	120.00	120.00	120.00	120.00
เกลือ	6.66	6.66	6.66	6.66
เนื้อทุเรียน	-	75.00	150.00	225.00

2.3 ศึกษาลักษณะทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียน

1) ศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์มอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียน ที่อุณหภูมิห้อง 37 องศาเซลเซียส โดยศึกษา ค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าสี (Konica Minolta CM-3500d) ระบบสี Cambridge International Examination (CIE) กำหนดหน่วยวัดสีมีสัญลักษณ์เป็น L^* a^* และ b^* และวัดค่าความสามารถในการยึดตัวด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer TA-xT2i) และใช้หัววัด Backward Extrusion Rig Code-A/BE โดยใช้ตัวอย่าง 100 กรัม ใส่ภาชนะพลาสติกใส ใช้หัวทดสอบแบบแผ่นแบนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร กดด้วยแรงกดร้อยละ 50 ลงบนตัวอย่างอาหารซ้ำ 3 ครั้ง วัดความแน่นเนื้อ (Firmness) ความคงตัว (Consistency) และการเกาะติด (Cohesiveness)

2) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีสที่ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์และการเกษตรแห่งเอเชีย โดยตรวจวัดปริมาณโปรตีน ไขมัน ความชื้น และเถ้า ด้วยวิธี AOAC [10] รวมทั้งคำนวณหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด และพลังงานทั้งหมด [11]

3) ศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียน พิจารณาจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดกับข้อกำหนดของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน 1×10^6 โคโลนีต่อกรัม [3]

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้นำมาหาค่าเฉลี่ย วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างหน่วยทดลองโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทำการวิจัยโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาสูตรพื้นฐานของมอสซาเรลล่าชีส

ลักษณะของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน 3 สูตร แสดงดังรูปที่ 2 และผลการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน จำนวน 3 สูตร แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 2. ลักษณะมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน 3 สูตร

ตารางที่ 3. คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	คะแนนความชอบ (ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)		
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3
ลักษณะปรากฏ ^{ns}	6.95±1.36	7.20±1.61	6.65±1.84
สี	7.10±0.85 ^b	7.70±1.03^a	7.00±1.21 ^b
กลิ่น ^{ns}	7.65±0.93	7.60±0.99	7.40±1.39
รสชาติ ^{ns}	7.05±1.54	7.80±1.20	6.95±1.76
เนื้อสัมผัส	6.85±1.35^{ab}	7.55±1.00^a	6.30±1.84 ^b
ความชอบโดยรวม ^{ns}	7.20±1.32	7.80±1.15	7.00±1.56

^{a, b} กำกับค่าในแนวนอนที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} กำกับคุณลักษณะที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 3 เมื่อนำค่าคะแนนความชอบที่มีต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของมอสซาเรลล่าชีสมาวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติพบว่า คะแนนในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติและความชอบโดยรวม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p>0.05$) คะแนนในด้านสีและเนื้อสัมผัส มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\leq 0.05$) โดยสูตรที่ 2 ซึ่งมีกรรมวิธีทำชีสโดยการตกตะกอนด้วยน้ำส้มสายชู มีคะแนนความชอบด้านสีสูงสุด ($p\leq 0.05$) และให้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสสูงสุด ซึ่งไม่แตกต่างกับสูตรที่ 1 ซึ่งมีกรรมวิธีทำชีสโดยการตกตะกอนด้วยน้ำส้มสายชูเช่นเดียวกัน สำหรับสูตรที่ 2 มีคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมเท่ากับ 7.20, 7.70, 7.60, 7.80, 7.55 และ 7.80 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงชอบมาก การเตรียมมอสซาเรลล่าชีสต่างกันมีผลต่อค่าสีและเนื้อสัมผัสที่ต่างกัน โดยมอสซาเรลล่าชีสเป็น Fresh Cheese ที่ภายหลังจากการตกตะกอนโปรตีนในนมด้วยน้ำส้มสายชู และแยกเวย์ออกไปนวดหลายครั้ง จะได้ชีสที่มีเนื้อนุ่มเหนียว มีความยืดหยุ่นก่อนนำไปใส่ในน้ำเกลือ ทำให้ได้เป็นมอสซาเรลล่าชีขาว เมื่อแยกส่วนเวย์ออกมากขึ้น มอสซาเรลล่าชีสที่ได้ยังมีสีเหลืองเข้มขึ้น กลิ่นของชีสนี้จะไม่รุนแรงเนื่องจากไม่ได้ผ่านกระบวนการบ่ม การตกตะกอนของนมจนเกิดเป็นก้อนชีส เป็นการทำให้เคซีนไมเซลล์เสียสภาพจับตัวกันเป็นก้อนได้โดยการเติมกรด ทำให้โปรตีนเคซีนเสียสภาพเกิดการตกตะกอนเป็นเคิร์ด หรือการเติมเอนไซม์จะย่อยโปรตีนเคซีนชนิดแคปปา-เคซีน ทำให้โมเลกุลเล็กลงแล้วจับกับแคลเซียมไอออนเกิดเป็นตะกอนขาวขุ่นจับตัวเป็นก้อน [12] โดยมอสซาเรลล่าชีสสูตรที่ 1 และสูตรที่ 2 เป็นการตกตะกอนนมด้วยน้ำส้มสายชู ร้อยละ 5.20 และ 7.38 ให้ค่า pH เท่ากับ 5.25 และ 4.90 ตามลำดับ ปริมาณของน้ำส้มสายชูที่มากกว่าช่วยให้เกิดการตกตะกอนที่ดี แต่เนื้อสัมผัสที่ได้จะมีลักษณะแข็งกว่าสูตรที่ 2 ที่เนื้อสัมผัสของมอสซาเรลล่าชีสที่ได้มีลักษณะยืด เนื้อเนียน ส่งผลให้มีคะแนนการยอมรับด้านเนื้อสัมผัสที่ไม่ต่างกัน แต่คะแนนความชอบด้านสีของสูตรที่ 2 สูงกว่าสูตรที่ 1 โดยสีของสูตรที่ 1 มีสีขาวมากกว่าสูตรที่ 2 สำหรับการตกตะกอนด้วยน้ำส้มสายชูมีผลให้คะแนนความชอบมากกว่าการตกตะกอนด้วยกรดซิตริกและเอนไซม์เรนเนท ตามวิธีการของสูตรที่ 3 จากการทดลองของ บุตรีนทร์ ชนะช และคณะ [13] พบว่ามอสซาเรลล่าชีสจากนํ้านมโคดิบใช้เอนไซม์เรนเนทร้อยละ 0.03 และมอสซาเรลล่าชีสจากนํ้านมแพะดิบใช้เอนไซม์เรนเนทร้อยละ 0.01 แต่จากการวิจัยนี้ สูตรที่ 3 ใช้เอนไซม์เรนเนทร้อยละ 0.02 จึงอาจส่งผลให้เกิดเคิร์ดที่มีลักษณะยืดน้อยกว่า และมีสีขาว จึงได้รับคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสด้านสีและเนื้อสัมผัสน้อยกว่าการตกตะกอนนมด้วยน้ำส้มสายชูในสูตรที่ 2 ($p\leq 0.05$) จากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสที่ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับมากที่สุดด้านสี และเนื้อสัมผัสจึงคัดเลือกสูตรที่ 2 เป็นสูตรพื้นฐานในการศึกษาต่อไป

3.2 ผลการศึกษาปริมาณเนื้อทุเรียนที่เหมาะสมในมอสซาเรลล่าชีส

จากการเสริมเนื้อทุเรียนในมอสซาเรลล่าชีสที่ปริมาณร้อยละ 0 ร้อยละ 5 ร้อยละ 10 และร้อยละ 15 ของน้ำหนักนมวัวดิบ พบว่ามอสซาเรลล่าชีสสูตรควบคุมและเสริมเนื้อทุเรียนมีลักษณะดังรูปที่ 3 และผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของมอสซาเรลล่าชีสที่เสริมเนื้อทุเรียนในระดับที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4



รูปที่ 3. ลักษณะของมอสซาเรลล่าชีสสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) และสูตรที่เสริมด้วยเนื้อทุเรียน (ร้อยละ 5, 10 และ 15)

ตารางที่ 4. คะแนนการยอมรับคุณภาพทางประสาทสัมผัสของมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียน

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	คะแนนความชอบ (ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)			
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 5	ร้อยละ 10	ร้อยละ 15
ลักษณะปรากฏ	7.60±0.74 ^b	7.80±0.65 ^a	8.00±0.71 ^a	7.50±0.60 ^b
สี	7.80±0.93 ^b	7.90±0.59 ^{ab}	8.05±0.71 ^a	7.78±0.81 ^b
กลิ่น	7.45±0.67 ^b	7.74±0.82 ^a	7.95±0.71 ^a	7.47±0.50 ^b
รสชาติ	7.68±0.87 ^{ab}	7.71±0.70 ^{ab}	7.90±0.63 ^a	7.56±0.69 ^b
เนื้อสัมผัส	7.64±0.70 ^b	7.70±0.79 ^a	8.03±0.59 ^a	7.43±0.61 ^b
ความชอบโดยรวม	7.68±0.71 ^b	7.85±0.83 ^b	8.23±0.66 ^a	7.74±0.71 ^b

^{a, b} กำกับค่าในแนวนอน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของคะแนนความชอบของคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนจากตารางที่ 4 พบว่าคะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ทั้งนี้ตัวอย่างที่มีการเสริมเนื้อทุเรียนที่เพิ่มขึ้นทำให้เนื้อสัมผัสของมอสซาเรลล่าชีสหลังให้ความร้อนมีลักษณะการยัดลุดลง และมีกลิ่นของทุเรียนที่ชัดเจน

เนื้อเรียบเนียนมีสีเหลืองอ่อน จากผลการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ของน้ำหนักนํ้านมวัวดิบ มีคะแนนค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันในทุกด้าน ($p>0.05$) ยกเว้นด้านความชอบโดยรวมที่เสริมเนื้อทุเรียน ร้อยละ 10 ของน้ำหนักนํ้านมวัวดิบ ได้รับคะแนนความชอบสูงกว่าการเสริมเนื้อทุเรียนในทุกระดับ ($p<0.05$) โดยสูตรที่เสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 ของน้ำหนักนํ้านมวัวดิบ ได้รับคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมเท่ากับ 8.00, 8.05, 7.95, 7.90, 8.03 และ 8.23 ตามลำดับ อยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงชอบมาก ดังนั้นจึงคัดเลือกมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 ของน้ำหนักนํ้านมวัวดิบ มาเปรียบเทียบคุณลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และปริมาณจุลินทรีย์เปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐานต่อไป

3.3 ผลการศึกษาลักษณะของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียน

1) ศึกษาลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียน ร้อยละ 10 แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5. คุณภาพทางกายภาพของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10

คุณภาพ	ตัวอย่าง	
	มอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน	มอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10
ค่าสี		
ค่าความสว่าง (L^*) ^{ns}	84.54 ± 0.82	86.29 ± 0.43
ค่าสีแดง (a^*) ^{ns}	0.23 ± 0.15	- 0.32 ± 0.05
ค่าสีเหลือง (b^*) ^{ns}	18.67 ± 0.85	15.55 ± 0.30
ค่าเนื้อสัมผัส		
Firmness (g)	171.15 ± 41.80 ^a	39.03 ± 9.37 ^b
Consistency (g)	3394.89 ± 1184.06 ^a	700.05 ± 334.90 ^b
Cohesiveness (g)	-291.48 ± 70.45 ^b	-138.25 ± 53.91 ^a

^{ns} กำกับคุณลักษณะที่แตกต่างอย่างไม่มีความสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

^{a, b} กำกับค่าในแนวนอน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 จากตารางที่ 5 พบว่าค่าสีของทั้ง 2 ตัวอย่างมีค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) ค่าสี

เหลือ (b*) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p>0.05$) และการเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 ของน้ำหนักน้ำนมวัวดิบ ทำให้สีของมอสซาเรลล่าชีสเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ไม่แตกต่างกับมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน อย่างไรก็ตาม การเสริมเนื้อทุเรียนส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของมอสซาเรลล่าชีส ค่าความแน่นเนื้อ ความคงตัว และการเกาะติด โดยมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนมีค่าน้อยกว่ามอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน เนื่องจากการเสริมเนื้อทุเรียนลงไปเป็นการเพิ่มในส่วนของการโบไฮเดรตและความชื้น ในขณะที่ปริมาณโปรตีนและไขมันลดลง ทำให้โครงร่างตาข่ายของโปรตีนเคซีนที่รวมตัวกันตกตะกอน ส่งผลให้มีความแข็งแรงน้อยลงและเนื้อสัมผัสของชีสจึงมีความแน่นเนื้อลดลง การยึดเกาะกันน้อยลง ทำให้ความยืดหยุ่น การยึดตัวของชีสลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ørskov และคณะ [14] และ Butt และคณะ [15] ที่รายงานว่าปฏิกริยาในการยึดรวมกันของโปรตีน ไขมัน และแป้งมีผลต่อลักษณะการตกตะกอนของผลิตภัณฑ์ชีสเลียนแบบ

2) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

ลักษณะทางเคมีของของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 ของน้ำหนักน้ำนมวัวดิบ แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6. คุณภาพทางเคมีของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10

คุณภาพ	ตัวอย่าง	
	มอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน	มอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10
พลังงาน (Kcals)	283.53	258.17
คาร์โบไฮเดรต (g)	3.61	5.74
โปรตีน (g)	28.64	23.77
ไขมัน (g)	17.17	15.57
ความชื้น (g)	49.27	53.68
เถ้า (g)	1.31	1.24

การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 จากตารางที่ 6 พบว่า มอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 มีปริมาณความชื้นและคาร์โบไฮเดรตสูงกว่าสูตรพื้นฐาน แต่มีปริมาณพลังงาน โปรตีน ไขมัน และเถ้า ลดลง เนื่องจากการเสริมเนื้อทุเรียนลงไป ทำให้องค์ประกอบทางเคมี โดยเฉพาะโปรตีนและไขมันลดลงกว่าสูตรพื้นฐาน ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ชีสเลียนแบบรสมะม่วงน้ำดอกไม้ ปริมาณ 100 กรัม ให้พลังงานทั้งหมด 356.20 กิโลแคลอรี

โปรตีน 7.58 กรัม ไขมัน 26.80 กรัม คาร์โบไฮเดรต 21.17 กรัม และใยอาหาร 1.15 กรัม [16] เมื่อเปรียบเทียบกับคุณค่าทางโภชนาการของมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียน ร้อยละ 10 ของน้ำหนักนํ้านมวัวดิบ จัดเป็นชีสที่มีปริมาณไขมันต่ำประมาณร้อยละ 10-25 ของน้ำหนักแห้ง [17]

3) ศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางจุลินทรีย์ของของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 ของน้ำหนักนํ้านมวัวดิบ แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7. คุณภาพทางจุลินทรีย์ของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐานและมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10

คุณภาพ	ตัวอย่าง	
	มอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน	มอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10
จุลินทรีย์ทั้งหมด (โคโลนี/กรัม)	$< 1 \times 10^6$	$< 1 \times 10^6$
<i>Staphylococcus aureus</i> (โคโลนี/กรัม)	$< 1 \times 10^6$	$< 1 \times 10^6$

การวิเคราะห์ลักษณะทางจุลินทรีย์ของของมอสซาเรลล่าชีสสูตรพื้นฐาน และมอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 จากตารางที่ 7 พบว่าทั้ง 2 ตัวอย่าง มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดที่ให้ปริมาณจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด คือ ต้องไม่เกิน 1×10^6 โคโลนีต่อ 1 กรัม เนื่องจากมอสซาเรลล่าชีสมีปริมาณน้ำตาลน้อย และมีส่วนผสมของน้ำส้มสายชูที่มีฤทธิ์เป็นกรด ทำให้ชะลอการเจริญของจุลินทรีย์ได้ และมีค่า pH เป็นกรดอ่อนไปทางกลาง

4. สรุปผลการทดลอง

จากการคัดเลือกสูตรพื้นฐานของมอสซาเรลล่าชีสจำนวน 3 สูตร และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่ามอสซาเรลล่าชีสสูตรที่ 2 มีคะแนนค่าเฉลี่ยด้านสี และเนื้อสัมผัสที่ดีที่สุด ขณะที่คะแนนจากคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากสูตรอื่น ดังนั้นจึงใช้สูตรที่ 2 เป็นสูตรพื้นฐานมาศึกษาปริมาณเนื้อทุเรียนที่เสริมในมอสซาเรลล่าชีส 4 ระดับ โดยพบว่ามอสซาเรลล่าชีสที่เสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 ของน้ำหนักนํ้านมวัวดิบ มีค่าคะแนนเฉลี่ยด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม อยู่ในระดับความชอบปานกลาง ถึงชอบมาก จึงนำมาเปรียบเทียบกับมอสซาเรลล่าชีสพื้นฐานสูตรที่ 2 ในลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และปริมาณจุลินทรีย์ โดยพบว่าค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ค่าเนื้อสัมผัส ค่าความแน่นเนื้อ ความคงตัว และการเกาะติด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) มอสซาเรลล่าชีสเสริมเนื้อทุเรียนร้อยละ 10 มีปริมาณ

ความชื้น และคาร์โบไฮเดรต สูงกว่า ทั้งนี้พบว่าปริมาณพลังงาน โปรตีน ไขมัน และเถ้า มีค่าต่ำกว่าสูตรพื้นฐาน สำหรับปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดมีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด คือ ปริมาณจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ไม่เกิน 1×10^6 โคโลนีต่อ 1 กรัม ดังนั้นการศึกษานี้สามารถนำผลการทดลองไปต่อยอดให้กับผลิตภัณฑ์มอสซาเรลล่าชีสซึ่งเป็นอาหารตะวันตกพร้อมรับประทาน เพื่อเป็นการสร้างโอกาสทางการตลาดและเพิ่มช่องทางการตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ สร้างการร่วมมือทางการค้า พัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่จากฐานการผลิต และทุนที่มีอยู่เดิมให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2566. สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้า ปี 2565. แหล่งข้อมูล : <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2566/commodity2565.pdf>. ค้นเมื่อวันที่ 29 เมษายน 2566.
- [2] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์ โดยความร่วมมือจากกรมศุลกากร. 2564. สินค้าส่งออกสำคัญของไทยตามโครงสร้างสินค้าส่งออกทั่วโลก. แหล่งข้อมูล : <http://tradereport.moc.go.th/Report/Default.aspx?Report=MenucomRecode&ImExType=1&Lang=Th>. ค้นเมื่อวันที่ 29 เมษายน 2566.
- [3] กระทรวงสาธารณสุข. 2543. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 209) พ.ศ. 2543 เรื่อง เนยแข็ง. แหล่งข้อมูล : https://fic.nfi.or.th/law/upload/file1/TH_91.pdf. ค้นเมื่อวันที่ 29 เมษายน 2566.
- [4] Cheese Science Toolkit. 2017. Coagulation. Available at: <https://www.cheesescience.org/coagulation.html>. Retrieved 2 July 2024.
- [5] ช้อนกลาง. 2562. 11 ประเภทชีส ที่คนรักชีสต้องรู้จัก. แหล่งข้อมูล : <https://www.chonklang.com/th/บทความ/11+ประเภทชีส+ที่คนรักชีสต้องรู้จัก-29/>. ค้นเมื่อวันที่ 12 กรกฎาคม 2565.
- [6] Ahmed, S. et.al. 2008. Effects of acidification on physic-chemical characteristics of buffalo milk, a comparison with cow's milk. *Food Chemistry*, 106(1), 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.04.021>.
- [7] MS RoamAround. 2564. Easy Mozzarella recipe no rennet มอสซาเรลล่าชีส แค่ส่วนผสม 3 อย่างก็ยัดได้แล้ว กับคุณพ่อบ้านฝรั่ง. แหล่งข้อมูล : <https://www.youtube.com/watch?v=JXxFE76eXZs>. ค้นเมื่อวันที่ 12 กรกฎาคม 2565.

-
- [8] แม่บ้านตุรกี Asli in Kitchen. 2563. ทำเองได้ง่ายๆ 15 นาทีเสร็จ สูตรมอสซาเรล่าชีส ยืดๆยืดๆ โยมเมดจ้า Homemade mozzarella 2 ingredients. แหล่งข้อมูล : <https://www.youtube.com/watch?v=mn7xeeCM8wY>. ค้นเมื่อวันที่ 12 กรกฎาคม 2565.
- [9] Encanto' Channel. 2563. วิธีทำมอสซาเรล่าชีส โยมเมดแบบง่ายๆ ชีสยืดๆ, How to make Homemade Mozzarella Cheese. แหล่งข้อมูล : <https://www.youtube.com/watch?v=3DEVRRuxPkA&t=0s>. ค้นเมื่อวันที่ 12 กรกฎาคม 2565.
- [10] AOAC. 2019. Association of Official Chemists, Official Methods of Analysis. 21th ed., Washington, D.C.
- [11] Sullivan, D.M. and Carpenter, D.E. 1993. Method of Analysis for Nutrition Labeling. AOAC International, Arlington.
- [12] อศิรา เฟื่องฟูชาติ. 2567. กิจกรรมการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ของชีส. แหล่งข้อมูล : https://www.mtec.or.th/mat_sci_design_acti/cheese/. ค้นเมื่อวันที่ 2 เมษายน 2567.
- [13] บุศรินทร์ ชนะคช, สุเจตน์ ชื่นชม และศศิธร นาคทอง. 2563. การศึกษาระดับเอนไซม์เรนเนทที่เหมาะสมต่อการผลิตมอสซาเรล่าชีสจากน้ำนมโคและน้ำนมแพะ. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตรและการจัดการ*, 3(2), 81-86. [Bussarin Chanakot, Sujate Chaunchom and Sasitorn Nakthong. 2020. Study on Optimum Rennet Enzyme Level on Mozzarella Cheese from Cow Milk and Goat Milk. *Journal of Agricultural Science and Management*, 3(2), 81-86. (in Thai)]
- [14] Ørskov, K.E., Christensen, L.B., Wiking, L., Hannibal, T., and Hammershøj, M. 2023. Detecting interactions between starch and casein in imitation cheese by FTIR and Raman spectroscopy. *Food Chemistry Advances*, 2, 100322. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100322>.
- [15] Butt, N.A., Ali, T.M., and Hasnain, A. 2020. Development of rice starch-based casein and fat mimetics and its application in imitation mozzarella cheese. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(12), e14928. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14928>.
- [16] สุชานาด ทิพย์จันทร์. 2565. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชีสเลียนแบบรสมะม่วงน้ำดอกไม้. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิตกิตติมศักดิ์, สาขาวิชาเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. [Suchanart Thippayajan. 2022. Product development of cheese analogue *Mangifera indica* L. “Nam Dok Mai” flavor. M.H.E. This thesis, Home Economics Technology Program, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)]

- [17] นิธิยา รัตนพานนท์. 2557. เคมีนมและผลิตภัณฑ์นม. พิมพ์ครั้งที่ 1, โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
[Nithiya Rattanapanon. 2014. Cheese in milk and product chemistry. 1st ed., Odeon Store, Bangkok. (in Thai)]

การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความแม่นยำของการจำลองอัตราการไหลน้ำท่า Comparison of Precision Coefficients for Streamflow Data Simulation

นพรัตน์ เตชะพันธุ์รัตนกุล¹ พงศ์พันธุ์ กาญจนการุณ^{2*} และ ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์³

Noparat Techapunratanakul¹ Pongpan Kanjanakaroon^{2*} and Chaiwat Ekkawatpanit³

¹กลุ่มวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

จ.เชียงใหม่ ประเทศไทย

²สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จ.เชียงใหม่ ประเทศไทย

³ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ ประเทศไทย

¹Department of Mathematics, Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Rai, Thailand

³Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 21 เมษายน 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 7 พฤศจิกายน 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 12 พฤศจิกายน 2567

Received: 21 April 2023, Revised: 7 November 2024, Accepted: 12 November 2024

บทคัดย่อ

ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำเป็นข้อมูลที่สำคัญในโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ การเก็บข้อมูลน้ำท่าระยะยาวเป็นเรื่องยาก เนื่องจากปัญหาด้านการบำรุงรักษาหรือปัญหาทางด้านเทคนิค การใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถสร้างข้อมูลน้ำท่าที่ขาดหายไปได้ โดยข้อมูลจำลองเหล่านี้จำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ สัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่แตกต่างกันสามารถใช้ในการประเมินผลลัพธ์การจำลองทางอุทกวิทยาได้ บทความนี้ได้นำเสนอความเหมาะสมและข้อจำกัดในการใช้งานสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ เพื่อตรวจสอบข้อมูลน้ำท่าจำลองตามวัตถุประสงค์การใช้งาน 3 กรณี ได้แก่ กรณีสมดุลงน้ำ กรณีน้ำหลาก และกรณีน้ำแล้ง ข้อมูลน้ำท่าจำลองที่ใช้ในการวิจัยสร้างขึ้นโดยมีความผิดพลาดแบบเป็นระบบ และความผิดพลาดแบบพลวัต สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ 21 ชนิดถูกเลือกภายใต้หลักการของค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์และค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ในการตรวจสอบน้ำท่าจำลอง ผลการศึกษาพบว่าความผิดพลาดแบบเป็นระบบของทุกกรณีน้ำท่าจำลอง สามารถใช้ดัชนี NSE , NSE_{j-1} , NSE_{j-3} , NSE_{rQ} , $\ln NSE$, NSE_{sqnQ} , NSE_{iQ} , MSE , $RMSE$, MAE , $RMSRE$ และ $AAPE$ เพื่อตรวจสอบน้ำท่าจากแบบจำลองคณิตศาสตร์และสามารถหาแนวโน้มของความถูกต้องในการจำลองได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ $RLFD_{oH}$ เพื่อตรวจสอบผลการจำลองกรณีน้ำหลาก และสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ NSE_{uL} , B_{uL} และ $RLFD_{uL}$ เพื่อตรวจสอบการจำลองกรณีน้ำแล้งได้อีกด้วย สำหรับความ

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: pongpank@gmail.com

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.258682>

ผิดพลาดแบบพลวัตพบว่า สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ NSE_{j-1} , NSE_{iQ} และ $RMSRE$ มีความเหมาะสมเมื่อใช้กับกรณีจำลองสมดุมน้ำและน้ำหลาก สำหรับการจำลองน้ำท่ากรณีน้ำแล้งเหมาะสมกับสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ NSE_{uL} และ $RLFD_{uL}$ ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงในการเลือกใช้งานสัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่เหมาะสมต่อข้อมูลน้ำท่าจำลองได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : การจำลองอัตราการไหลของน้ำท่า สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ ความผิดพลาดแบบมีระบบ ความผิดพลาดแบบพลวัต

Abstract

Streamflow data is crucial for water resource development projects. Acquiring long-term streamflow data poses difficulties due to maintenance or technological issues. The use of a mathematical model may reconstruct missing streamflow data. Nevertheless, it is necessary to calibrate and validate simulation data using precision coefficients. Different precision coefficients can be used to evaluate the results of hydrological simulations. This paper presents the suitability and constraints of precision coefficients in evaluating streamflow outcomes using a hydrological model under three conditions: water balance, flood, and drought. The simulated data was generated with both systematic and dynamic errors. Twenty-one coefficients were selected based on the principle of relative and absolute errors to evaluate the simulated data. Regardless of systematic errors, the findings indicate that all simulated outcome conditions could be evaluated using several coefficients such as NSE , NSE_{j-1} , NSE_{j-3} , NSE_{rQ} , $\ln NSE$, NSE_{sqmQ} , NSE_{iQ} , MSE , $RMSE$, MAE , $RMSRE$, and $AAPE$. These coefficients could analyze the simulation's accuracy as well as determine its accuracy tendency. In addition, the precision coefficient $RLFD_{oH}$ can be used to evaluate the simulation results for flood scenarios, and the precision coefficients NSE_{uL} , B_{uL} , and $RLFD_{uL}$ can be used to assess the simulations for drought scenarios. For dynamic errors, the coefficients of NSE_{j-1} , NSE_{iQ} , and $RMSRE$ were suitable for assessing the water balance and flood conditions, while drought is aligned with the coefficients of NSE_{uL} and $RLFD_{uL}$. The results can serve as a criterion for determining appropriate coefficients for streamflow simulation.

Keywords: Streamflow data simulation, Precision coefficient, Systematic error, Dynamic error

1. บทนำ

ทรัพยากรน้ำเป็นสิ่งสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ โดยเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนที่ 6 มุ่งมั่นที่จะ “ให้มีน้ำเพื่อใช้ประโยชน์และมีการจัดการน้ำและสุขาภิบาลอย่างยั่งยืนสำหรับทุกคน ” นับเป็นเป้าหมายที่เป็นความท้าทายสำคัญที่จะเข้าถึงสำหรับทุกประเทศซึ่งมีความเชื่อมโยงกับทุกภาคส่วน

ทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน ภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งในส่วนของชุมชน ที่มีความเสี่ยงด้านทรัพยากรน้ำทั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ ที่มีการพัฒนาทางเศรษฐกิจรวมถึงการขยายตัวของชุมชนเมือง [1] ซึ่งการเรียนรู้เพื่อศึกษางจรอุทกวิทยา เป็นกระบวนการที่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรต้องการหาคำตอบที่มีความถูกต้องและแม่นยำ โดยอาศัยข้อมูลสถิติที่มีการเก็บรวบรวมไว้ นำไปสู่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้หลักการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ งานวิจัยในปัจจุบันแสดงให้เห็นว่ากระบวนการจำลองจะใช้ข้อมูลทางกายภาพ การเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นที่ และวิธีการที่ทันสมัยในการคำนวณมาร่วมในการวิเคราะห์ อาทิ Tal maon และคณะ [2] ได้ใช้ตัวชี้วัดทางสังคมและนิเวศวิทยาพร้อมกับแบบจำลองอุทกวิทยาในการบริหารจัดการโครงการน้ำท่วม ต่อมา Mehta และคณะ [3] ใช้เทคนิคการวิเคราะห์กลุ่มแบบลำดับชั้น (Hierarchical clustering) และรูปเหลี่ยมอิเอสเซนในการเลือกสถานีฝนที่จะนำไปใช้ในการทำนายการเกิดน้ำท่วมที่เขื่อน Sardar Sarovar ประเทศอินเดีย ข้อมูลจำลองถูกตรวจสอบและปรับแก้โดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ รากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง และประสิทธิภาพแนช-ซัทคลิฟ (Nash-Sutcliffe efficiency: *NSE*) ในขณะที่ Horta และคณะ [4] ใช้ข้อมูลคุณสมบัติชลศาสตร์ของดินรูปแบบดิจิทัลในการจำลองต้นทุนดินและน้ำในแบบจำลองอุทกวิทยาเพื่อบริหารจัดการน้ำในทางตอนใต้ของประเทศโปรตุเกส การตรวจสอบความใช้ได้ของคุณสมบัติดินจำลองเชิงพื้นที่จะใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเป็นเกณฑ์ในการประเมิน นอกจากนี้ Yu และคณะ [5] ได้จำลองพฤติกรรมระบบอุทกวิทยาของระบบพืชพรรณ (Bioretention system) โดยการใช้การเปลี่ยนแปลงของพืชในช่วงเวลาต่าง ๆ ประกอบการจำลอง ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลิฟถูกนำมาใช้ในการปรับเทียบและตรวจความใช้ได้ของข้อมูลพืชปกคลุมดิน ความชื้นในดิน ความลึกของชั้นกรวด และอัตราการไหลออก แต่ทั้งนี้ ข้อมูลทางสถิติที่สำคัญซึ่งใช้ในการจำลองที่นักอุทกวิทยาและวิศวกรทรัพยากรน้ำสนใจ ได้แก่ ข้อมูลน้ำท่า เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักในการพัฒนางานทางด้านแหล่งน้ำต่าง ๆ โดยปกติข้อมูลน้ำท่ารายวันจะมีการบันทึกที่สถานีวัดน้ำและส่งข้อมูลมาให้ยังหน่วยงานหลักเพื่อรวบรวมเก็บไว้อีกครั้ง แต่เนื่องจากการเก็บข้อมูลน้ำท่ารายวันต้องกระทำอย่างต่อเนื่อง ในบางครั้งอาจเกิดเหตุสุดวิสัยทำให้การเก็บข้อมูลไม่สามารถกระทำได้ในบางวันส่งผลให้ข้อมูลน้ำท่าขาดหายไป นอกจากนี้ ความลำบากในการดำเนินงานของสถานีตลอดจนลักษณะของพื้นที่ลุ่มน้ำ ทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลเป็นเวลานานได้ ข้อมูลน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่าจึงมีไม่มาก ดังนั้นการจำลองทางอุทกวิทยาของข้อมูลน้ำท่าจึงมีความจำเป็นอย่างสูง

สิ่งที่ต้องกระทำหลังจากทำการใช้แบบจำลองหาปริมาณของน้ำท่าจำลองแล้วเสร็จนั้น สิ่งที่ตามมาคือ ความถูกต้องหรือการยอมรับได้ของข้อมูลที่จำลองขึ้น ในเบื้องต้นข้อมูลที่จำลองขึ้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำท่าจากสถานีตรวจวัดจริง โดยพิจารณาการสอดคล้องของเส้นกราฟน้ำท่าจำลองและน้ำท่าวัดจริง แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะกราฟที่ได้นั้น ไม่สามารถบอกได้แน่ชัดว่าข้อมูลที่จำลองขึ้นมีความสอดคล้องกับน้ำท่าจริงอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงได้มีการเลือกใช้ตัวเลขมาเป็นดัชนีในการชี้วัดความถูกต้องของข้อมูลหรือเรียกกันว่า “สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ” ทั้งนี้ สัมประสิทธิ์ความแม่นยำต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนตั้งอยู่บนหลักการของค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) [6] และค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute error) เช่น ค่าคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ยโดยสัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่ดีต้องครอบคลุมหรือพิจารณาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการจำลองได้อย่างชัดเจน เพื่อให้ผู้ใช้งานแบบจำลองสามารถตัดสินใจเลือกใช้หรือ

เปรียบเทียบแบบจำลองได้ง่าย โดยค่าความผิดพลาดในการจำลองจำแนกได้เป็น ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นแบบมีระบบ (Systematic error) เช่น ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำท่าจำลองมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าน้ำท่าจริง และค่าผิดพลาดแบบพลวัต (Dynamic error) เช่น การโค้งขึ้น การโค้งลง และความคลาดเคลื่อนช่วงเวลา อย่างไรก็ตาม Krause และคณะ [7] พบว่า การใช้สัมประสิทธิ์ความแม่นยำต่าง ๆ เหล่านี้ยังมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นได้ซึ่งสอดคล้องกับ Jain และ Sudheer [8] ที่ระบุว่าไม่มีเกณฑ์หรือสัมประสิทธิ์ความแม่นยำใดที่สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพของการจำลองได้ดีทุกกรณี ในบางครั้งสัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่สามารถบอกความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแบบเป็นระบบได้ดี อาจไม่สามารถบอกถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแบบพลวัตได้ [9]

การศึกษาครั้งนี้นำเสนอข้อจำกัดและความเหมาะสมของการใช้สัมประสิทธิ์ความแม่นยำในการตรวจสอบผลการจำลองน้ำท่าทางอุทกวิทยา โดยเลือกใช้สัมประสิทธิ์ความแม่นยำมาวิเคราะห์ความผิดพลาดแบบเป็นระบบและวิเคราะห์ความผิดพลาดแบบพลวัตที่เป็นความคลาดเคลื่อนด้านเวลา สำหรับข้อมูลน้ำท่าจำลองที่ใช้ในการศึกษาสังเคราะห์ขึ้นตามวัตถุประสงค์การใช้งาน 3 แบบ ได้แก่ กรณีน้ำหลาก (Flood) กรณีน้ำแล้ง (Drought) และกรณีสมดุลน้ำ (Water balance)

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ

ในการศึกษานี้ ได้รวบรวมสัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่มีการใช้งานทางด้านอุทกวิทยาเป็นหลัก จากนั้นนำมาวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลน้ำท่าจำลองโดยพิจารณาตามประเภทการใช้งานหลัก 3 กรณี ได้แก่ กรณีจำลองสมดุลน้ำ กรณีจำลองการเกิดน้ำหลาก และกรณีจำลองการเกิดน้ำแล้ง จากตารางที่ 1 แสดงถึงสัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่ใช้ในการศึกษาและค่าเหมาะสมของการจำลอง โดยสัมประสิทธิ์ความแม่นยำแต่ละตัวมีความหมาย ดังนี้

1) สัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of determination: r^2)

สัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจถูกนำเสนอในปี ค.ศ.1921 โดยนักพันธุศาสตร์ Wright [10] โดยข้อดีของสัมประสิทธิ์อยู่ที่การบอกถึงความสอดคล้องของกลุ่มตัวแปรจริงและตัวแปรจำลอง แต่ข้อจำกัดคือไม่สามารถบอกถึงความเอนเอียงของข้อมูลทั้งสองและต้องใช้ดัชนีชี้วัดตัวอื่น ๆ ช่วยในการพิจารณา สัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(Q_{s_i} - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - \bar{Q}_s)^2}} \right)^2 \quad (1)$$

เมื่อ Q_i คือ ข้อมูลน้ำท่าจริง ลำดับที่ i
 Q_{s_i} คือ ข้อมูลน้ำท่าจำลอง ลำดับที่ i
 \bar{Q} คือ ข้อมูลน้ำท่าจริงเฉลี่ย

$\overline{Q_s}$ คือ ข้อมูลน้ำท่าจำลองเฉลี่ย

n คือ จำนวนข้อมูล

รากที่สองของสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจเรียกว่า “สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์” สามารถแสดงให้อยู่ในรูปรากที่สองของอัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนร่วมและผลคูณของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำท่าจริงและน้ำท่าจำลองได้ ค่าของ r^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ในกรณีที่ผลการจำลองสอดคล้องกับข้อมูลจริง ค่า r^2 จะมีค่าเข้าใกล้ 1 และหากข้อมูลไม่สอดคล้องกัน ค่าดังกล่าวจะเข้าใกล้ 0

ตารางที่ 1. สัมประสิทธิ์ความแม่นยำทางอุทกวิทยาและค่าความเหมาะสมในการใช้งาน

ดัชนี	ค่าความเหมาะสม						การนำไปใช้		
	สมบูรณ์แบบ	ดีมาก	ดี	ยอมรับได้	ไม่ยอมรับ	แย่	กรณีต้นน้ำ	กรณีท่ากลาง	กรณีน้ำแฉ่ง
r^2	1	-	-	≥ 0.6	< 0.6	0	X	X	X
NSE	1	≥ 0.75	≥ 0.65	≥ 0.5	< 0.5	$-\infty$	X	X	X
NSE_j	1	≥ 0.75	≥ 0.65	≥ 0.5	< 0.5	$-\infty$	X	X	X
NSE_{rQ}	1	≥ 0.75	≥ 0.65	≥ 0.5	< 0.5	$-\infty$	X	-	X
$\ln NSE$	1	≥ 0.75	≥ 0.65	≥ 0.5	< 0.5	$-\infty$	X	-	X
NSE_{sqnQ}	1	≥ 0.75	≥ 0.65	≥ 0.5	< 0.5	$-\infty$	X	-	X
NSE_{rQ}	1	≥ 0.75	≥ 0.65	≥ 0.5	< 0.5	$-\infty$	X	-	X
NSE_{uL}	1	≥ 0.75	≥ 0.65	≥ 0.5	< 0.5	$-\infty$	-	-	X
NSE_{oH}	1	≥ 0.75	≥ 0.65	≥ 0.5	< 0.5	$-\infty$	-	X	-
d	1	-	-	≥ 0.5	< 0.5	$-\infty$	X	X	X
d_j	1	-	-	≥ 0.5	< 0.5	$-\infty$	X	-	X
d_{rel}	1	-	-	≥ 0.5	< 0.5	$-\infty$	X	-	X
B_{uL}	0	-	-	-	-	$-\infty, 1$	-	-	X
B_{oH}	0	-	-	-	-	$-\infty, 1$	-	X	-
$RLFD_{uL}$	0	-	-	-	-	$-\infty, 1$	-	-	X
$RLFD_{oH}$	0	-	-	-	-	$-\infty, 1$	-	X	-
MSE	0	$\leq (0.5STD_0)^2$	$\leq (0.6STD_0)^2$	$\leq (0.7STD_0)^2$	$> (0.7STD_0)^2$	∞	X	X	X
$RMSE$	0	$\leq 0.5STD_0$	$\leq 0.6STD_0$	$\leq 0.7STD_0$	$> 0.7STD_0$	∞	X	X	X
MAE	0	-	-	$\leq 0.5STD_0$	$> 0.5STD_0$	∞	X	X	X
$RMSRE$	0	-	-	-	-	∞	X	X	X
$AAPE$	0	-	-	-	-	∞	X	X	X

หมายเหตุ STD_0 คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลน้ำท่าจริง

X คือ กรณีศึกษาการใช้งานของสัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่สามารถนำไปใช้งานได้

2) ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลีฟ

Nash and Sutcliffe [6] ได้นำเสนอแนวทางวิเคราะห์โดยเน้นที่ผลรวมกำลังสองของผลต่างระหว่างค่าจริงและค่าจำลอง โดยมีข้อดีคือการวัดประสิทธิภาพความต่างของการจำลองโดยตรงกับค่าจริง บ่งบอกถึงความต่างเชิงปริมาณในการจำลองได้ดี ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลีฟแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{s_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (2)$$

ค่าของ *NSE* มีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ซึ่งในกรณีที่ผลการจำลองสอดคล้องกับข้อมูลจริง ค่าของ *NSE* จะมีค่าเข้าใกล้ 1 และในทางตรงกันข้ามหากผลการจำลองไม่สอดคล้องกัน ค่าของ *NSE* จะมีค่าน้อยมากลงไป โดย Moriasi และคณะ [11] ได้ให้ข้อสังเกตว่าถ้าค่า *NSE* มากกว่า 0.5 แสดงว่ายอมรับได้ หากค่า *NSE* มากกว่า 0.65 แสดงว่าดี และหากค่า *NSE* มากกว่า 0.75 แสดงว่าดีมาก นอกจากนี้ ยังเห็นได้ว่าการใช้ *NSE* มีข้อควรระวังเนื่องจากการตรวจสอบเน้นไปที่การจำลองในช่วงอัตราการไหลสูงเป็นหลัก [12] นั่นคือ ถึงแม้ว่าแบบจำลองให้ผลการจำลองข้อมูลน้ำท่าช่วงน้ำแล้งที่ผิดพลาดมาก แต่ค่า *NSE* ของผลรวมของผลต่างน้ำท่าจริงและน้ำท่าจำลองในช่วงน้ำแล้งมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยไม่แสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในขณะที่เมื่อเทียบกับการจำลองข้อมูลน้ำท่าช่วงน้ำหลากที่เกิดความผิดพลาดมาก ทำให้ค่า *NSE* มีการเปลี่ยนแปลงที่มากตามไปด้วย ซึ่งในบทความนี้แสดงตัวอย่างความผิดพลาดดังกล่าวอย่างชัดเจน

3) ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลีฟแบบดัดแปลง (Nash-Sutcliffe efficiency modification: *NSE_j*)

เนื่องจากข้อจำกัดของการประเมินประสิทธิภาพแนช-ซัทคลีฟเกี่ยวกับการวิเคราะห์ข้อมูลช่วงน้ำหลากและน้ำแล้งไม่อยู่ในระดับการเปลี่ยนแปลงเดียวกัน Krause และคณะ [7] ได้เสนอให้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพดังกล่าวโดยเพิ่มความไวในการวิเคราะห์หลังไป ดังสมการที่ (3)

$$NSE_j = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - Q_{s_i}|^j}{\sum_{i=1}^n |Q_i - \bar{Q}|^j} ; j \in N \quad (3)$$

เมื่อ j คือ ดิกรีของกลุ่มตัวแปร

N คือ จำนวนนับบวก

ในกรณีต้องการลดความแปรปรวนในช่วงน้ำหลาก สามารถใช้ค่า j ที่น้อย ซึ่งทำให้ผลต่างของความแปรปรวนดังกล่าวน้อยลงตามไปด้วย ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ที่ใช้ค่า $j = 1$ ทำให้ค่าประมาณที่เกินความเป็นจริงของน้ำท่าจำลองช่วงน้ำหลากลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมดีขึ้น นอกจากนี้ยังเสนอให้ทำ

การวิเคราะห์แบบสัมพัทธ์ เรียกว่า ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลิฟสัมพัทธ์ (Relative Nash-Sutcliffe efficiency: NSE_{rQ}) แสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$NSE_{rQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i - Q_s}{Q_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i - \bar{Q}}{\bar{Q}} \right)^2} \quad (4)$$

โดย Oudin และคณะ [13] ได้เสนอแนะให้มีการเปลี่ยนค่าอัตราการไหลในประสิทธิภาพของแนช-ซัทคลิฟให้อยู่ในรูปลอการิทึมหรือรากที่สองเพื่อที่จะให้ผลต่างมีค่าใกล้เคียงกัน เรียกว่า ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลิฟแบบลอการิทึม (NSE calculated on logarithm transformed flows: $\ln NSE$) แสดงได้ดังสมการที่ (5) และประสิทธิภาพแนช-ซัทคลิฟสัมพัทธ์แบบรากที่สอง (NSE calculated on root squared transformed flows: NSE_{sqrtQ}) แสดงได้ดังสมการที่ (6)

$$\ln NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_i) - \ln(Q_s)) ^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_i) - \overline{\ln(Q)}) ^2} \quad (5)$$

$$NSE_{sqrtQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_i} - \sqrt{Q_s}) ^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_i} - \sqrt{\bar{Q}}) ^2} \quad (6)$$

นอกจากนี้ Le Moine [14] ได้ใช้ค่าส่วนกลับของอัตราการไหล เรียกว่า ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลิฟแบบส่วนกลับ (NSE calculated on inverse transformed flows: NSE_{iQ}) ในการพิจารณา แสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$NSE_{iQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Q_i} - \frac{1}{Q_s} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Q_i} - \frac{1}{\bar{Q}} \right)^2} \quad (7)$$

Pushpalatha และคณะ [15] ได้เสนอให้มีการพิจารณาสัมประสิทธิ์ความแม่นยำโดยแยกพิจารณาในเฉพาะช่วงน้ำแล้งออกมา ซึ่งมีค่ากำหนดช่วงน้ำแล้งไว้ เรียกว่า ประสิทธิภาพแนช-ซัทคลิฟภายใต้ขีดจำกัดน้ำแล้ง (NSE calculated under low-flow threshold: NSE_{LL}) แสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$NSE_{uL} = 1 - \frac{\sum_{i \in [1,n] | Q_i < T} (Q_i - Q_{s_i})^2}{\sum_{i \in [1,n] | Q_i < T} (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (8)$$

การวิเคราะห์ช่วงน้ำหลากในการศึกษานี้ทำการดัดแปลงจากสมการ NSE_{uL} เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ในช่วงน้ำหลากได้ เรียกว่า ประสิทธิภาพแนวซ-ซัทคลีฟภายใต้ขีดจำกัดน้ำหลาก (NSE calculated over high-flow threshold: NSE_{oH}) แสดงดังสมการที่ (9)

$$NSE_{oH} = 1 - \frac{\sum_{i \in [1,n] | Q_i > T} (Q_i - Q_{s_i})^2}{\sum_{i \in [1,n] | Q_i > T} (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (9)$$

ค่าประสิทธิภาพแนวซ-ซัทคลีฟแบบดัดแปลงทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ในกรณีที่ผลการจำลองสอดคล้องกับข้อมูลจริง ค่าประสิทธิภาพแนวซ-ซัทคลีฟแบบดัดแปลงจะมีค่าเข้าใกล้ 1 และจะมีค่าน้อยลงเมื่อข้อมูลไม่สอดคล้องกัน

4) ดัชนีความสอดคล้อง (Index of agreement: d)

Willmot [16] ได้นำเสนอดัชนีความสอดคล้องเพื่อใช้แทน r^2 และ NSE เนื่องจากสัมประสิทธิ์ทั้งสองไม่ได้พิจารณาความต่างของข้อมูลจริงและจำลองต่อค่าเฉลี่ยข้อมูลจริง ดัชนีความสอดคล้องแสดงในรูปของอัตราส่วนของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยและศักยภาพความคลาดเคลื่อน แสดงดังสมการที่ (10)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{s_i})^2}{\sum_{i=1}^n (|Q_{s_i} - \bar{Q}| + |Q_i - \bar{Q}|)^2} \quad (10)$$

Krause และคณะ [7] ได้เสนอให้มีการปรับปรุงตัวเลขยกกำลังเพื่อลดระดับความไวของการวิเคราะห์เมื่อมีปริมาณน้ำหลากมากเกินไปหรือแปลงอัตราส่วนให้รูปในรูปสัมพัทธ์ เรียกว่า ดัชนีความสอดคล้องแบบปรับปรุง (Modified form of index of agreement: d_j) แสดงดังสมการที่ (11) และ ดัชนีความสอดคล้องสัมพัทธ์ (Relative index of agreement: d_{rel}) แสดงดังสมการที่ (12)

$$d_j = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - Q_{s_i}|^j}{\sum_{i=1}^n (|Q_{s_i} - \bar{Q}| + |Q_i - \bar{Q}|)^j} ; j \in N \quad (11)$$

$$d_{rel} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i - Q_{s_i}}{Q_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|Q_{s_i} - \bar{Q}| + |Q_i - \bar{Q}|}{\bar{Q}} \right)^2} \quad (12)$$

ค่าดัชนีความสอดคล้องมีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ในกรณีที่ผลการจำลองสอดคล้องกับข้อมูลจริง ค่าดัชนีความสอดคล้องจะมีค่าเข้าใกล้ 1 และจะมีค่าน้อยลงเมื่อข้อมูลไม่สอดคล้องกัน

5) อคติภายใต้ขีดจำกัด (Bias under threshold)

Pushpalatha และคณะ [15] ได้พัฒนาสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ เรียกว่า อคติภายใต้ขีดจำกัดน้ำแล้ง (Bias under low-flow threshold: B_{uL}) ซึ่งวิเคราะห์เฉพาะการไหลในช่วงน้ำแล้งขึ้นมา โดยกำหนดให้อัตราการไหลที่น้อยกว่าอัตราการไหลที่ร้อยละ 90 ของเส้นโค้งแสดงสภาพการไหลของน้ำ (Flow duration curve) เป็นการไหลกรณีน้ำแล้ง การหาค่า B_{uL} แสดงได้ดังสมการที่ (13)

$$B_{uL} = 1 - \frac{\sum_{i \in [1,n] | Q_i < T} Q_{s_i}}{\sum_{i \in [1,n] | Q_i < T} Q_i} \quad (13)$$

เมื่อ T คือ ค่าขีดจำกัด หรือค่าอัตราการไหลที่กำหนดของเส้นโค้งแสดงสภาพการไหลของน้ำ ซึ่งกรณีน้ำแล้งในการศึกษานี้เลือกใช้อัตราการไหลที่ร้อยละ 90

สำหรับช่วงน้ำหลาก ผู้วิจัยทำการดัดแปลงดัชนีอคติภายใต้ขีดจำกัดดังกล่าวให้พิจารณาเฉพาะช่วงอัตราการไหลที่มีค่าสูงกว่าร้อยละ 10 เรียกว่า อคติภายใต้ขีดจำกัดน้ำหลาก (Bias over high-flow threshold: B_{oH}) แสดงได้ดังสมการที่ (14)

$$B_{oH} = 1 - \frac{\sum_{i \in [1,n] | Q_i > T} Q_{s_i}}{\sum_{i \in [1,n] | Q_i > T} Q_i} \quad (14)$$

เมื่อ T คือ ค่าขีดจำกัด กรณีน้ำหลากเลือกใช้อัตราการไหลที่ร้อยละ 10

ค่าอคติภายใต้ขีดจำกัดมีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ในกรณีที่ผลการจำลองสอดคล้องกับข้อมูลจริง ค่าอคติภายใต้ขีดจำกัดจะมีค่าเข้าใกล้ 0 และในกรณีที่ผลรวมข้อมูลน้ำท่าจำลองมีค่ามากกว่าและน้อยกว่าผลรวมน้ำท่าต้นแบบอย่างมาก ค่าอคติจะมีค่าเข้าใกล้ $-\infty$ ถึง 1 ตามลำดับ

6) อัตราส่วนขาด (Ratio of deficit)

ในกรณีที่ต้องการตรวจสอบผลต่างของข้อมูลน้ำท่าจำลองและน้ำท่าต้นแบบ Pushpalatha และคณะ [15] ได้ใช้อัตราส่วนขาดมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยใช้ขีดจำกัดเช่นเดียวกับการวิเคราะห์อคติของน้ำแล้ง เรียกว่า อัตราส่วนขาดของน้ำแล้ง (Ratio of low-flow deficit: $RLFD_{uL}$) แสดงได้ดังสมการที่ (15)

ในทำนองเดียวกันสำหรับช่วงน้ำหลาก ได้ใช้อัตราส่วนขาดมาใช้ในการวิเคราะห์ เรียกว่า อัตราส่วนขาดของน้ำหลาก (Ratio of high-flow deficit: $RLFD_{oH}$) แสดงได้ดังสมการที่ (16)

$$RLFD_{uL} = 1 - \frac{\sum_{i \in [1,n] | Q_i < T} \max(0, T - Q_i)}{\sum_{i \in [1,n] | Q_i < T} (T - Q_i)} \quad (15)$$

$$RLFD_{oH} = 1 - \frac{\sum_{i \in [1,n] | Q_i > T} \max(0, Q_i - T)}{\sum_{i \in [1,n] | Q_i > T} (Q_i - T)} \quad (16)$$

ค่าอัตราส่วนขาดมีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ในกรณีที่ผลการจำลองสอดคล้องกับข้อมูลจริง ค่าอัตราส่วนขาดจะมีค่าเข้าใกล้ 0 กรณีที่ไม่สอดคล้อง ค่าอัตราส่วนขาดจะมีค่าเข้าใกล้ 1 และ $-\infty$ ตามลำดับ

7) ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean Error)

เป็นการหาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลจริงและข้อมูลจำลอง มีการพัฒนาหลายรูปแบบ ประกอบด้วย ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: $RMSE$) ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองสัมพัทธ์ (Root Mean Square Relative Error: $RMSRE$) และค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Average Absolute Percentage Error: $AAPE$) แสดงได้ดังสมการที่ (17) - (21) ตามลำดับ

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - Q_i)^2 \quad (17)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - Q_i)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{s_i} - Q_i| \quad (19)$$

$$RMSRE = 100 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{s_i} - Q_i}{Q_i} \right|^2} \quad (20)$$

$$AAPE = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{s_i} - Q_i}{Q_i} \right| \quad (21)$$

ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง ∞ โดยค่าที่เข้าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความสอดคล้องอยู่ในเกณฑ์ระดับดี [14] นอกจากนี้ Fiseha และคณะ [17] ได้เสนอว่าหากค่า $RMSE$ และค่า MAE ของการจำลองน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงว่าข้อมูลที่จำลองยอมรับได้ แต่สำหรับค่า $RMSRE$ และ $AAPE$ ไม่มีการกำหนดไว้อย่างชัดเจน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดค่ายอมรับไว้ที่ร้อยละ 25

2.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลน้ำท่ารายวันต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาเลือกใช้สถานีวัดน้ำ N.7 ของกรมชลประทาน ปี พ.ศ. 2551 (เมษายน พ.ศ.2551 - พฤษภาคม พ.ศ.2552) รวม 365 ค่า และข้อมูลน้ำท่าจำลองแบ่งได้ 6 แบบ ประกอบด้วย

1) กรณีอัตราการไหลจำลองน้อยกว่าการไหลจริงทุกค่าอัตราการไหลหรือกรณี $ERROR_1 (Q_s = 0.3Q_i, 0.5Q_i, 0.7Q_i)$

2) กรณีอัตราการไหลจำลองมากกว่าการไหลจริงทุกค่าอัตราการไหลหรือกรณี $ERROR_2 (Q_s = 1.3Q_i, 1.5Q_i, 1.7Q_i)$

3) กรณีอัตราการไหลจำลองไม่เท่ากับอัตราการไหลจริง (อัตราการไหลจำลองมากกว่าหรือน้อยกว่าอัตราการไหลจริง) หรือกรณี $ERROR_3 (Q_s = Y(\omega) * Q_i$ เมื่อ $Y(\omega)$ คือ ตัวแปรสุ่มตั้งแต่ 0.1 ถึง 3)

4) กรณีผลรวมอัตราการไหลจำลองเท่ากับการไหลจริงหรือกรณี $ERROR_4 (\sum Q_s = \sum Q_i)$

5) กรณีอัตราการไหลจำลองเกิดเร็วกว่าอัตราการไหลจริง 4 วันหรือกรณี $ERROR_5 (Q_{E4})$

6) กรณีอัตราการไหลจำลองเกิดช้ากว่าการไหลจริง 4 วันหรือกรณี $ERROR_6 (Q_{L4})$

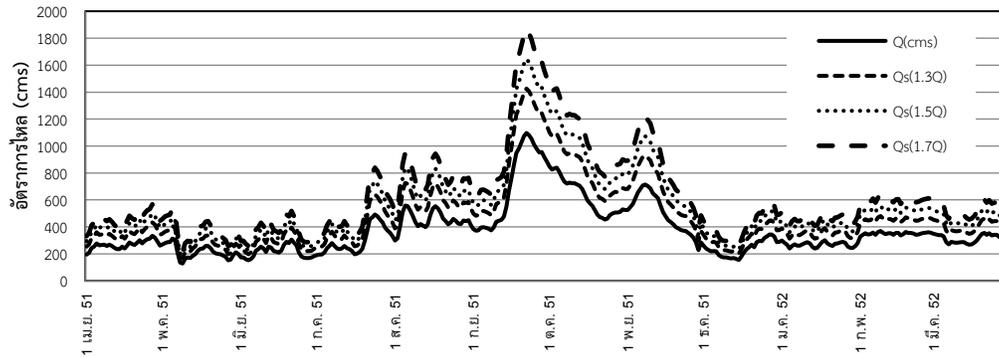
ชุดข้อมูล $ERROR_1, ERROR_2, ERROR_5$ และ $ERROR_6$ ถูกสร้างให้มีผิดพลาดโดยไม่มีกรอบวงภายในข้อมูลจำลอง เนื่องจากต้องการชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของสัมประสิทธิ์ความแม่นยำเมื่อนำมาใช้ตรวจสอบ ชุดข้อมูล $ERROR_3$ สร้างโดยใช้ฟังก์ชันสุ่มของ Microsoft Excel และชุดข้อมูล $ERROR_4$ ถูกสร้างโดยใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลน้ำท่ารายวันครั้งปีแรกเป็นตัวแบ่ง

รูปที่ 1 และ รูปที่ 2 แสดงกราฟน้ำท่าเปรียบเทียบกรณีศึกษาทั้ง 6 รูปแบบกับน้ำท่าต้นแบบ โดยรูปที่ 1 แสดงให้เห็นความผิดพลาดแบบเป็นระบบสำหรับ 4 กรณีแรก ได้แก่ รูปที่ 1(ก) แสดงกรณีอัตราการไหลจำลองมากกว่าการไหลจริงทุกค่าอัตราการไหล รูปที่ 1(ข) แสดงกรณีอัตราการไหลจำลองน้อยกว่าการไหลจริงทุกค่าอัตราการไหล รูปที่ 1(ค) แสดงกรณีอัตราการไหลจำลองมากกว่าหรือน้อยกว่าอัตราการไหลจริง รูปที่ 1(ง) แสดงกรณีปริมาณอัตราการไหลจำลองเท่ากับการไหลจริง สำหรับรูปที่ 2 แสดงความผิดพลาดแบบพลวัตในเรื่องความคลาดเคลื่อนช่วงเวลาสำหรับ 2 กรณีสุดท้าย ได้แก่ รูปที่ 2(ก) แสดงกรณีอัตราการไหลจำลองเกิดช้ากว่าอัตราการไหลจริง 4 วัน รูปที่ 2(ข) แสดงกรณีอัตราการไหลจำลองเกิดเร็วกว่าอัตราการไหลจริง 4 วัน

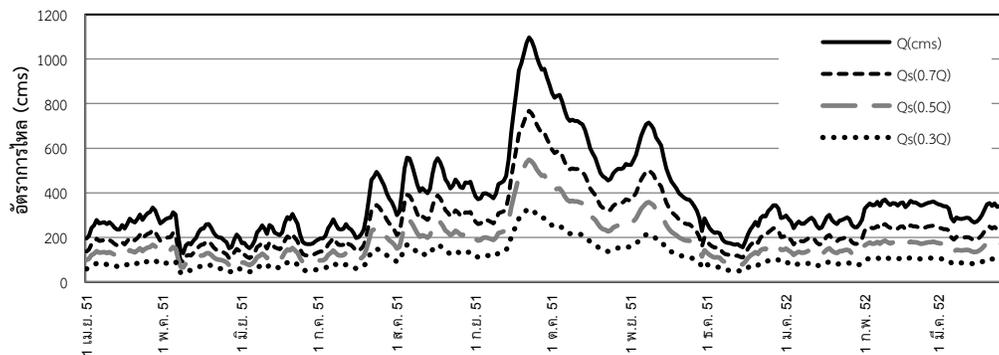
รูปที่ 3 แสดงเส้นโค้งแสดงสภาพการไหลของน้ำสถานี N.7 โดยมีค่าอัตราการไหลต่ำสุด 128.6 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และอัตราการไหลสูงสุด 1,097 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที สำหรับการศึกษาความเหมาะสมของการใช้งานในช่วงน้ำแล้งและน้ำหลากจะพิจารณาขีดจำกัดที่อัตราการไหล 10 เปอร์เซ็นต์ไทล์ (P_{10}) และ 90 เปอร์เซ็นต์ไทล์ (P_{90}) ของโค้งแสดงสภาพการไหลของน้ำ นั่นคืออัตราการไหล 646.20 และ 196.01 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

3. ผลการวิจัย

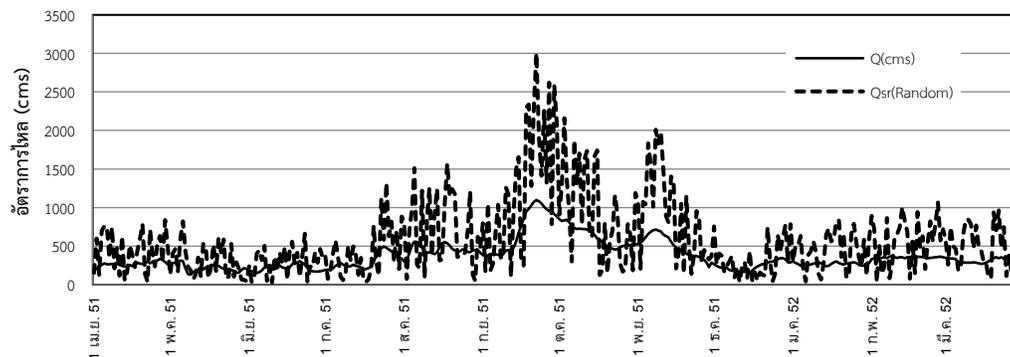
ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของการจำลองน้ำท่าเพื่อนำมาใช้ในกรณีต่าง ๆ ของสัมประสิทธิ์ความแม่นยำแสดงดังตารางที่ 2 โดยสามารถจำแนกความเหมาะสมต่อการใช้งานของสัมประสิทธิ์ความแม่นยำทางอุทกวิทยาสำหรับแต่ละกรณีได้ดังนี้



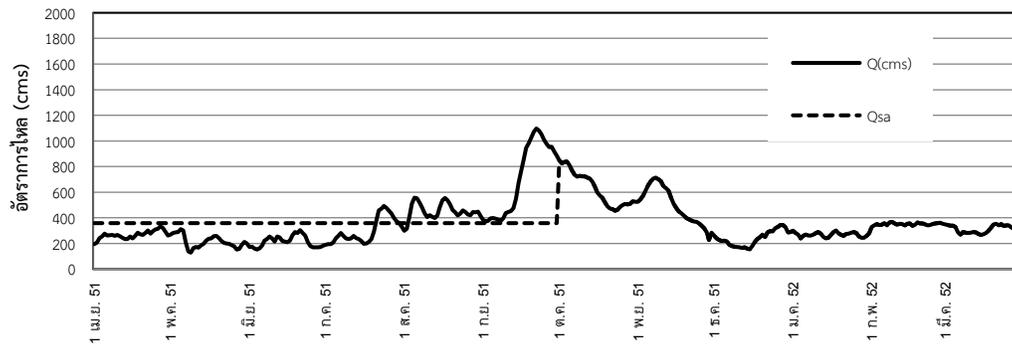
(ก) กรณีอัตราการไหลจำลองมากกว่าการไหลจริงทุกค่าอัตราการไหล



(ข) กรณีอัตราการไหลจำลองน้อยกว่าการไหลจริงทุกค่าอัตราการไหล

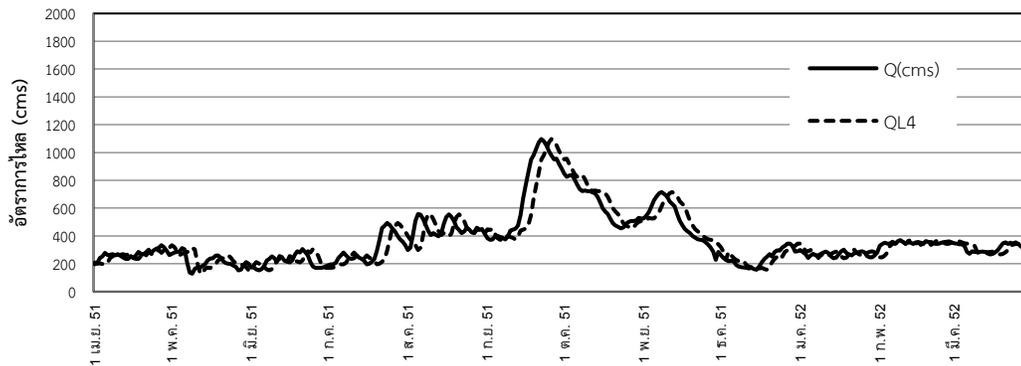


(ค) กรณีอัตราการไหลจำลองมากกว่าหรือน้อยกว่าอัตราการไหลจริง

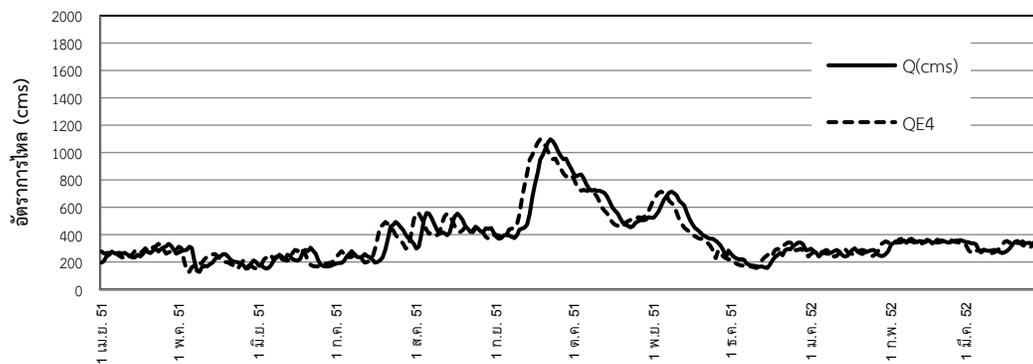


(จ) กรณีปริมาณอัตราการไหลจำลองเท่ากับการไหลจริง

รูปที่ 1. การจำลองความผิดพลาดแบบเป็นระบบของกราฟน้ำท่า

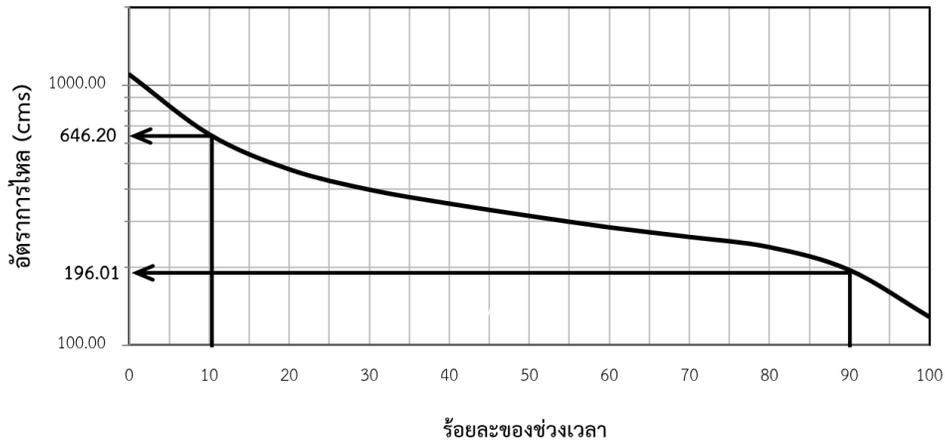


(ก) กรณีอัตราการไหลจำลองเกินกว่าอัตราการไหลจริง 4 วัน



(ข) กรณีอัตราการไหลจำลองเกินกว่าอัตราการไหลจริง 4 วัน

รูปที่ 2. การจำลองความผิดพลาดแบบพลวัต



รูปที่ 3. เส้นโค้งแสดงสภาพการไหลของน้ำสถานี N.7

3.1 ความเหมาะสมต่อการใช้งานกรณีจำลองสมดุลงน้ำ

การจำลองสมดุลงน้ำจะพิจารณาที่ปริมาณน้ำท่าของจริงและจำลองที่มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้ความผิดพลาด $ERROR_1$, $ERROR_2$ และ $ERROR_3$ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการดูความเหมาะสม เนื่องจากผลการจำลองปริมาณน้ำท่าผิดพลาดไปจากของจริงอย่างมาก จากการพิจารณาผลการตรวจสอบที่ได้ของสัมประสิทธิ์ความแม่นยำกรณีสมดุลงน้ำในตารางที่ 2 จะเห็นว่าในกรณี $ERROR_1$ และ $ERROR_2$ สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ r^2 ระบุว่าผลการจำลองน้ำท่าสมบูรณ์แบบทุกค่าเหมาะสมกับการใช้งานซึ่งตรงข้ามกับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในขณะที่สัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่เหลือมีการยอมรับผลการจำลองมากขึ้นตามความผิดพลาดในการจำลองลดน้อยลง อย่างไรก็ตาม ดัชนี d , d_{j-3} และ d_{rel} ยังมีการยอมรับผลการจำลองในขณะที่เกิดความผิดพลาดสูง กรณี $ERROR_3$ ดัชนี d , d_{j-3} และ d_{rel} ให้การยอมรับผลการจำลองในขณะที่ดัชนีอื่น ๆ ไม่ยอมรับ และ d_{j-3} ให้การยอมรับผลการจำลองที่สูงมาก พิจารณากรณี $ERROR_4$ ดัชนี d , d_{j-1} , d_{j-3} , d_{rel} , MSE และ $AAPE$ ยอมรับผลการจำลอง กรณี $ERROR_5$ และ $ERROR_6$ ดัชนีทั้งหมดยอมรับผลการจำลองแต่ NSE_{j-1} , NSE_{IQ} และ $RMSRE$ ให้การยอมรับในระดับที่ต่ำสุด ดังนั้น ในการตรวจสอบความผิดพลาดแบบมีระบบสามารถใช้ NSE , NSE_{j-1} , NSE_{j-3} , NSE_{IQ} , $\ln NSE$, NSE_{sqrtQ} , NSE_{IQ} , MSE , $RMSE$, MAE , $RMSRE$ และ $AAPE$ เพื่อตรวจวัดและดูแนวโน้มของความถูกต้องในการจำลองได้ แต่ดัชนี NSE_{j-1} และ $RMSRE$ ดีที่สุดในการใช้งาน ในขณะที่การเปรียบเทียบความผิดพลาดแบบพลวัตสามารถใช้ NSE_{j-1} , NSE_{IQ} และ $RMSRE$ เพื่อดูความเหมาะสมได้แต่อาจต้องกำหนดระดับการยอมรับเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 2. ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ความแม่นยำของน้ำท่าจำลอง 6 รูปแบบ

สัมประสิทธิ์	ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสม									
	Systematic error								Dynamic error	
	ERROR ₁			ERROR ₂			ERROR ₃	ERROR ₄	ERROR ₅	ERROR ₆
	$Q_S=0.3Q_i$	$Q_S=0.5Q_i$	$Q_S=0.7Q_i$	$Q_S=1.3Q_i$	$Q_S=1.5Q_i$	$Q_S=1.7Q_i$	$Q_S=Y(\omega)*Q_i$	$\Sigma Q_S=\Sigma Q_i$	Q_{E4}	Q_{L4}
r^2	1	1	1	1	1	1	0.531	0.365	0.836	0.835
NSE	-1.349	-0.199	0.568	0.568	-0.199	-1.349	-4.615	0.365	0.828	0.828
$NSE_{j=1}$	-0.866	-0.333	0.200	0.200	-0.333	-0.866	-1.370	0.446	0.608	0.609
$NSE_{j=3}$	-1.401	0.125	0.811	0.811	0.125	-1.401	-11.629	0.237	0.921	0.921
NSE_{rQ}	-0.859	0.051	0.658	0.658	0.051	-0.859	-2.981	0.352	0.829	0.807
$\ln NSE$	-6.487	-1.482	0.343	0.644	0.151	-0.454	-2.537	0.353	0.781	0.782
NSE_{sqrtQ}	-2.862	-0.620	0.496	0.629	0.046	-0.743	-2.614	0.378	0.815	0.815
NSE_{IQ}	-38.477	-6.251	-0.332	0.614	0.194	-0.229	-15.083	0.225	0.642	0.645
NSE_{uL}	0.038	0.509	0.823	0.823	0.509	0.038	-1.359	0.759	0.930	0.940
NSE_{oH}	-65.34	-32.85	-11.18	-11.18	-32.85	-65.34	-106.35	-115.24	-16.93	-9.65
d	0.496	0.659	0.869	0.924	0.837	0.754	0.605	0.704	0.955	0.955
$d_{j=1}$	0.349	0.447	0.624	0.641	0.480	0.376	0.354	0.625	0.805	0.803
$d_{j=3}$	0.536	0.769	0.957	0.987	0.987	0.987	0.785	0.738	0.989	0.989
d_{rel}	0.601	0.730	0.896	0.940	0.871	0.940	0.720	0.698	0.956	0.950
B_{oH}	0.700	0.500	0.300	-0.300	-0.500	-0.700	-0.647	0.154	0.015	0.017
B_{uL}	0.700	0.500	0.300	-0.300	-0.500	-0.700	-0.375	-0.787	-0.192	-0.198
$RLFD_{oH}$	0.999	0.890	0.644	-0.800	-1.333	-1.867	-1.894	0.410	0.014	0.031
$RLFD_{uL}$	-5.157	-3.684	-2.210	0.947	0.998	1.000	-0.709	0.731	0.474	0.607
MSE	84,965	43,350	15,606	15,606	43,350	84,965	203,077	22,973	6,231	6,226
$RMSE$	291	208	125	125	208	291	451	152	79	79
MAE	259	185	111	111	185	259	329	77	54	54
$RMSRE$	70	50	30	30	50	70	102.43	41.31	21.24	22.57
$AAPE$	70	50	30	30	50	70	86.21	23.87	15.22	15.76

หมายเหตุ ช่องที่มีการแรเงาคือให้การยอมรับผลการจำลอง

3.2 ความเหมาะสมต่อการใช้งานกรณีจำลองน้ำหลาก

การจำลองน้ำหลากจะพิจารณาที่ปริมาณน้ำท่าสูงสุดของจริงและจำลองที่มีความใกล้เคียงกันตลอดจนช่วงเวลาการเกิด ซึ่งการจำลองควรต้องเกิดก่อนหรือพร้อมกับของจริง เนื่องจากทำให้สามารถเตือนภัยก่อนเกิดอุทกภัยได้ ความผิดพลาดที่เด่นชัดซึ่งใช้ในการชี้วัดความเหมาะสมของสัมประสิทธิ์ความแม่นยำกรณีน้ำหลาก ได้แก่ ความผิดพลาดแบบเป็นระบบเนื่องจากให้ผลการทำนายน้ำหลากคลาดเคลื่อนจากข้อมูลจริงอย่างชัดเจน พิจารณาจากกรณี $ERROR_1$ และ $ERROR_2$ สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ r^2 , d , $d_{j=3}$, d_{rel} และ NSE_{oH} ไม่เหมาะสมในการตรวจสอบความถูกต้องอย่างยิ่ง เนื่องจากยอมรับผลการจำลองน้ำท่าที่ความคลาดเคลื่อนสูง (ยอมรับที่ข้อมูลจำลองเท่ากับ 0.5 และ 1.5 เท่าของข้อมูลจริง) กรณี $ERROR_3$ ไม่ควรใช้ d , $d_{j=3}$ และ d_{rel} ในการตรวจสอบ เนื่องจากให้ค่าการยอมรับได้ต่อผลการจำลองในขณะที่สัมประสิทธิ์ความแม่นยำต่าง ๆ ไม่ยอมรับ กรณี $ERROR_4$ ซึ่งจากรูปที่ 1 เห็นว่าผลการทำนายน้ำหลากมีความคลาดเคลื่อนอย่างมาก แต่ดัชนี d , NSE_{oH} , $d_{j=1}$, $d_{j=3}$, d_{rel} , B_{oH} , MAE และ $AAPE$ กลับยอมรับผลการจำลอง ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ดัชนีดังกล่าวในการตรวจสอบ กรณี $ERROR_5$ และ $ERROR_6$ เห็นว่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำต่าง ๆ ยอมรับผลการจำลองทั้งหมด โดยสัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่ยอมรับน้อยที่สุดคือ $NSE_{j=1}$, NSE_{iQ} และ $RMSRE$ ดังนั้นในการตรวจสอบความผิดพลาดแบบมีระบบสามารถใช้ NSE , $NSE_{j=1}$, $NSE_{j=3}$, NSE_{iQ} , $ln NSE$, NSE_{sqnQ} , NSE_{iQ} , $RLFD_{oH}$, MSE , $RMSE$, MAE และ $RMSRE$ เพื่อตรวจวัดและดูแนวโน้มของความถูกต้องในการจำลองได้ แต่ดัชนี $NSE_{j=1}$, $RLFD_{oH}$ และ $RMSRE$ จะดีที่สุดในการใช้งาน และในการเปรียบเทียบความผิดพลาดแบบพลวัตสามารถใช้ $NSE_{j=1}$, NSE_{iQ} และ $RMSRE$ เพื่อดูความเหมาะสมได้โดยเพิ่มระดับการยอมรับให้สูงขึ้น

3.3 ความเหมาะสมต่อการใช้งานกรณีจำลองน้ำแล้ง

ความผิดพลาดแบบเป็นระบบจะถูกใช้เป็นหลักในการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ความแม่นยำเหมือนกับกรณีน้ำหลาก โดยกรณี $ERROR_1$ ถึง $ERROR_4$ ไม่สามารถใช้สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ r^2 , d , $d_{j=3}$, d_{rel} , MAE และ $AAPE$ ในการตรวจสอบได้ สำหรับกรณี $ERROR_5$ และ $ERROR_6$ นอกจากจะสามารถใช้สัมประสิทธิ์ความแม่นยำเช่นเดียวกับกรณีน้ำหลากแล้ว ยังมีสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ NSE_{uL} , B_{uL} และ $RLFD_{uL}$ มีความเหมาะสมในการตรวจสอบ และเมื่อพิจารณาความผิดพลาดทั้งหมด พบว่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ NSE_{uL} และ $RLFD_{uL}$ ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดี คือ ไม่ยอมรับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมด ดังนั้นสัมประสิทธิ์ความแม่นยำทั้งสองจึงมีความเหมาะสมที่สุดในการตรวจสอบข้อมูลน้ำท่าจำลองกรณีน้ำแล้ง

3.4 วิจารณ์ผลการวิจัย

ถึงแม้ว่าการจำลองข้อมูลน้ำท่าในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ข้อมูลเพียงสถานีเดียวและปีเดียวในการจำลอง แต่งานวิจัยนี้ได้สนใจถึงเรื่องของวิธีการจำลองแต่เป็นเรื่องของความเหมาะสมของเครื่องมือที่ใช้ในการบ่งชี้ความเหมาะสมของการจำลอง โดยข้อมูลที่จำลองขึ้นเป็นข้อมูลที่กำหนดให้เกิดการผิดพลาดแบบเป็นระบบหรือแบบพลวัต อีกทั้งลักษณะของข้อมูลน้ำท่าเป็นข้อมูลอนุกรมเวลา ทำให้การจำลองเหตุการณ์เพียง 1 ปี จึงใช้เป็นตัวแทนของทุกปีได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Krause และคณะ [7] ซึ่งใช้ข้อมูล

สังเคราะห์เพียง 1 ปีเช่นกัน โดยในตารางที่ 3 สรุปความเหมาะสมในการใช้สัมประสิทธิ์ความแม่นยำในกรณีศึกษาต่าง ๆ โดยผลการวิจัยสำหรับการใช้งานกรณีจำลองสมดุลงน้ำและกรณีจำลองน้ำหลากพบว่า

ตารางที่ 3. ความเหมาะสมในการใช้งานสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ

สัมประสิทธิ์	ความเหมาะสมต่อการใช้งาน			สัมประสิทธิ์	ความเหมาะสมต่อการใช้งาน		
	กรณีจำลองสมดุลงน้ำ	กรณีน้ำหลาก	กรณีน้ำแล้ง		กรณีจำลองสมดุลงน้ำ	กรณีน้ำหลาก	กรณีน้ำแล้ง
r^2	P	P	P	$d_{j=3}$	P	P	P
NSE	F	F	F	d_{rel}	P	P	P
$NSE_{j=1}$	G	G	G	B_{oH}	NU	G	NU
$NSE_{j=3}$	F	F	F	B_{uL}	NU	NU	G
NSE_{iQ}	F	F	F	$RLFD_{oH}$	NU	G	NU
$\ln NSE$	F	F	F	$RLFD_{uL}$	NU	NU	G
NSE_{sqmQ}	F	F	F	MSE	F	F	F
NSE_{iQ}	F	F	F	$RMSE$	F	F	F
NSE_{uL}	NU	NU	G	MAE	F	P	P
NSE_{oH}	NU	G	NU	$RMSRE$	G	G	G
d	P	P	P	$AAPE$	F	P	P
$d_{j=1}$	F	F	F				

หมายเหตุ G คือ ดีที่สุดในการใช้งาน F คือ สามารถใช้งานได้ P คือ ไม่เหมาะสมในการใช้งาน NU คือสัมประสิทธิ์ไม่เกี่ยวข้องกับกรณีศึกษา

สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ $NSE_{j=1}$ และ $RMSRE$ ดีที่สุดในการใช้งานเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดแบบเป็นระบบและสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ $NSE_{j=1}$, NSE_{iQ} และ $RMSRE$ เหมาะสมสำหรับตรวจความผิดพลาดแบบพลวัต โดยต้องเพิ่มระดับการยอมรับให้สูงขึ้น อาทิ การยอมรับความผิดพลาดของการจำลองที่ร้อยละความผิดพลาดมากขึ้น ทั้งนี้ ลักษณะการตรวจสอบที่เหมือนกัน คือ สัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะตรวจสอบที่ดีก็กำลังหนึ่งของผลต่างข้อมูลน้ำท่าและมีการเทียบสัดส่วนกับข้อมูลน้ำท่าจริงในขณะที่สัมประสิทธิ์อื่น ๆ จะเป็นดีก็กำลังสองของผลต่างข้อมูลน้ำท่าเป็นหลัก ในขณะที่ Hwang และคณะ [18] ได้ให้เหตุผลว่าการพิจารณาที่ดีก็กำลังสูงของผลต่างข้อมูลทำให้ผลต่างข้อมูลที่มีค่าน้อยให้ผลที่น้อยลงไปมากจนไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษา ในทางกลับกัน ผลต่างข้อมูลที่มีค่ามากก็จะให้ค่าที่มากจนเกินไป ผลการตรวจสอบสำหรับกรณีน้ำแล้งพบว่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ NSE_{uL} และ $RLFD_{uL}$ ให้ผลการตรวจสอบที่ดี โดยสัมประสิทธิ์ทั้งสองตัวถูกพัฒนามาเพื่อวิเคราะห์กรณีน้ำแล้งที่มีค่าอัตราการไหลของน้ำท่าที่น้อยเป็นหลัก แสดงให้เห็นว่าสำหรับการตรวจสอบข้อมูลที่มีค่าน้อยควรใช้สัมประสิทธิ์ที่มีการพัฒนามาโดยเฉพาะที่ดีที่สุด

4. สรุปผลการวิจัย

การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความแม่นยำในการชี้วัดความเหมาะสม 21 ชนิด ของข้อมูลน้ำท่าจำลองซึ่งสร้างขึ้นโดยให้ความผิดพลาดแบบเป็นระบบและแบบพลวัต พบว่าความผิดพลาดแบบเป็นระบบของทุกกรณีน้ำท่าจำลองสามารถใช้สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ NSE , $NSE_{j=1}$, $NSE_{j=3}$, NSE_{rQ} , $\ln NSE$, NSE_{sqrtQ} , NSE_{iQ} , MSE , $RMSE$, MAE , $RMSRE$ และ $AAPE$ เพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ของน้ำท่าจำลองและบอกแนวโน้มของความถูกต้องในการจำลองได้ นอกจากนี้สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ $RLFD_{OH}$ ยังสามารถใช้ในกรณีน้ำหลากและสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ NSE_{uL} , B_{uL} และ $RLFD_{uL}$ สามารถใช้ได้ดีในกรณีน้ำแล้งสำหรับความผิดพลาดแบบพลวัตพบว่าในกรณีสมดุลงาน้ำและน้ำหลากสามารถใช้ $NSE_{j=1}$, NSE_{iQ} และ $RMSRE$ ในการตรวจสอบได้แต่ต้องเพิ่มระดับของการยอมรับให้สูงขึ้น ในขณะที่กรณีน้ำแล้งสามารถใช้สัมประสิทธิ์ความแม่นยำ NSE_{uL} และ $RLFD_{uL}$ ตรวจสอบความเหมาะสมของการจำลองได้อย่างเพียงพอเนื่องจากสัมประสิทธิ์ความแม่นยำทั้งสองไม่ยอมรับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทุกชนิด อย่างไรก็ตาม ในการทำงานสัมประสิทธิ์ความแม่นยำทั้งหมดขึ้นอยู่กับดุลพินิจของผู้ใช้งานต่อลักษณะงานที่ต้องการ ซึ่งในการศึกษานี้เลือกใช้ข้อมูลเพียงชุดเดียวและไม่มีการทำซ้ำในแต่ละกรณี ในอนาคตควรวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลสำหรับใช้เป็นมาตรฐานในการใช้งานทั่วไป และศึกษาเพิ่มเติมในข้อมูลอนุกรมเวลาประเภทอื่น ๆ เช่น ข้อมูลน้ำฝน ข้อมูลการระเหย ฯลฯ เพื่อขยายผลการใช้งานสัมประสิทธิ์ความแม่นยำต่าง ๆ ให้ครอบคลุมข้อมูลชนิดอื่น ๆ มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Srivichai, M. 2016. The vulnerability of water resources management as a result of climate change in Chiang Rai province. *Journal of Current Science and Technology*, 6(2), 165-171.
- [2] Tal-maon, M., Broitman, D., Portman, M. E. and Housh, M. 2024. Combining a hydrological model with ecological planning for optimal placement of water-sensitive solutions. *Journal of Hydrology*, 628, 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130457>.
- [3] Mehta, D. et al. 2023. Improving flood forecasting in Narmada river basin using hierarchical clustering and hydrological modelling. *Results in Engineering*, 20, 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101571>.
- [4] Horta, A., Oliveira, A.R., Azevedo, L. and Ramos, T.B. 2023. Assessing the use of digital soil maps in hydrological modeling for soil-water budget simulations-implications for water management plans in southern Portugal. *Geoderma Regional*, 1-25, <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00741>.
- [5] Yu, S., Qin, H. and Ding, W. 2023. Modeling the effects of vegetation dynamics on the hydrological performance of a bioretention system. *Journal of Hydrology*, 620, 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129473>.

- [6] Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- [7] Krause, P., Boyle, D.P. and Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5, 89-97, <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>.
- [8] Jain, S.K. and Sudheer, K.P. 2008. Fitting of hydrologic models: a close look at the Nash–Sutcliffe index. *Journal of hydrologic engineering*, 13(10), 981-986, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:10\(981\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:10(981)).
- [9] Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of hydrology*, 242(3-4), 275-301, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00393-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00393-0).
- [10] Wright, S. 1921. Correlation and causation. *Journal of Agricultural Research*, 20, 557–585.
- [11] Moriasi, D.N. et al. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- [12] Hogue, T.S. et al. 2000. A multistep automatic calibration scheme for river forecasting models. *Journal of Hydrometeorology*, 1(6), 524-542, [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2000\)001<0524:AMACSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2000)001<0524:AMACSF>2.0.CO;2).
- [13] Oudin, L. et al. 2006. Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research*, 42(7), 1-10, <https://doi.org/10.1029/2005WR004636>.
- [14] Le Moine, N. 2008. The surface watershed seen from underground: a way to improve the performance and realism of rainfall-runoff models. Ph.D. Thesis, Geosciences and Natural Resources, Pierre and Marie Curie University.
- [15] Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N. and Andréassian, V. 2012. A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology*, 420, 171-182, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.055>.
- [16] Willmott, C.J. 1984. On the evaluation of model performance in physical geography. *Spatial statistics and models*, 40, 443-460, https://doi.org/10.1007/978-94-017-3048-8_23.
- [17] Fiseha, B.M. et al. 2013. Hydrological analysis of the Upper Tiber River Basin, Central Italy: a watershed modelling approach. *Hydrological processes*, 27(16), 2339-2351, <https://doi.org/10.1002/hyp.9234>.

- [18] Hwang, S.H., Ham, D.H. and Kim, J.H. 2012. A new measure for assessing the efficiency of hydrological data-driven forecasting models. *Hydrological sciences journal*, 57(7), 1257-1274, <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.710335>.

การเปรียบเทียบการแทนค่าสูญหายสำหรับปัญหาการขนส่งแบบสมดุล A Comparison of the Imputation Methods for Balanced Transportation Problems

อัญญา กองโกย และ กัลยา บุญหล้า*

Unna Kongkoy and Kanlaya Boonlha

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก ประเทศไทย

Department of Mathematics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 22 พฤษภาคม 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 12 ธันวาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 13 ธันวาคม 2567

Received: 22 May 2023, Revised: 12 December 2024, Accepted: 13 December 2024

บทคัดย่อ

ตัวแบบการขนส่งเป็นกรณีพิเศษของการโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาค่าใช้จ่ายรวมที่ต่ำที่สุดในการขนส่งจากต้นทางไปปลายทาง การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแทนค่าสูญหายแบบสุ่มสมบูรณ์ของค่าใช้จ่ายในปัญหาการขนส่งแบบสมดุล 4 วิธี ได้แก่ การแทนค่าด้วยค่าเฉลี่ย การแทนค่าด้วยค่ามัธยฐาน การแทนค่าด้วยค่าสูงสุด และการแทนค่าด้วยค่าต่ำสุด โดยกำหนดให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งมีการแจกแจงแบบเอกรูป และการแจกแจงแบบปกติ กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของข้อมูลเป็น 5%, 10%, 15%, 20%, 25% และ 30% ทำการจำลองข้อมูลด้วยเทคนิคมอนติคาร์โลทำซ้ำ 1,000 ครั้ง กำหนดจำนวนต้นทางและปลายทางให้เท่ากันด้วยขนาด 4, 5, 7, 10 และ 20 แห่ง ค่าการสูญหายของข้อมูลเท่ากับ 5%, 10%, 15% และ 20% เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ รากของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อจำนวนต้นทางและปลายทางเพิ่มขึ้น ค่า RMSE ของค่าใช้จ่ายในการขนส่งมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกวิธีการแทนค่าสูญหาย และพบว่าวิธีการแทนค่าข้อมูลสูญหายด้วยค่าเฉลี่ยมีค่า RMSE น้อยที่สุด รองลงมาเป็นวิธีการแทนค่าด้วยค่ามัธยฐาน ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด ตามลำดับ

คำสำคัญ : ปัญหาการขนส่ง วิธีการแทนค่าสูญหาย ค่าสูญหายแบบสุ่มสมบูรณ์

Abstract

Transportation model is a special case of linear programming to transport a product from sources to destinations at total minimum cost. The objective of this study is comparing the efficiency of estimating when the variable costs are missing completely at random in

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: kanlayab@nu.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.259049>

balanced transportation problems by imputation 4 methods which are mean, median, maximum, and minimum. The cost for transport model is set to a uniform distribution and a normal distribution with coefficients of variation to 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30%. The Monte Carlo simulation was repeated 1,000 times. Set the number of sources and destinations to be equal in size 4, 5, 7, 10, and 20. The percentage of missing data are 5%, 10%, 15% and 20% of the sample size. The criterion used for comparison is the Root Mean Square Error (RMSE). The results found that as the number of sources and destinations increases, RMSE also increases across all imputation methods. Among the methods, imputation using the mean resulted in the lowest RMSE, followed by the median, maximum, and minimum, respectively.

Keywords: Transportation problems, Imputation method, Missing completely at random

1. บทนำ

ตัวแบบการขนส่งเป็นแบบที่ใช้ในการวางแผนการขนส่งจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะหาเส้นทางในการขนส่งจากแหล่งต้นทาง (Sources) ไปยังปลายทาง (Destination) ซึ่งตั้งอยู่ในสถานที่ต่าง ๆ กัน โดยต้องการจัดส่งปริมาณวัตถุดิบหรือสินค้าจากต้นทางไปยังปลายทาง เพื่อให้เสียค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการขนส่งมีค่าน้อยที่สุด [1]

หลังจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโควิด-19 ผู้ประกอบการจำเป็นต้องปรับตัวเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงและสภาวะการแข่งขันที่เพิ่มขึ้น การเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าเป็นกลยุทธ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่ง [2] การเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าที่เหมาะสมจะสามารถลดค่าใช้จ่าย จำนวนเส้นทางในการขนส่ง เวลาในการทำงาน และระยะทางลงได้ เช่น การศึกษาวิธีการขนส่งในการกระจายสินค้าประเภทเครื่องดื่มแอลกอฮอล์และน้ำดื่ม [3] เพื่อวิเคราะห์ปรับปรุงกระบวนการขนส่งให้มีระยะทางและค่าใช้จ่ายดีขึ้น สำหรับผู้จัดจำหน่ายเครื่องดื่มแอลกอฮอล์และน้ำดื่มของลูกค้าหลักจำนวน 23 ร้าน ในเส้นทางการขนส่งภายในจังหวัดปทุมธานี พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงานเดิมในการขนส่งของบริษัทกับวิธีการขนส่งด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางการขนส่งที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ สามารถช่วยลดจำนวนเส้นทาง เวลาในการทำงาน ระยะทาง และค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้ โดยสามารถลดจำนวนเส้นทางจากวิธีการทำงานเดิมที่ร้านค้าย่อย จำนวน 23 เส้นทาง ลดลงเป็น 3 เส้นทาง ระยะทางรวมจาก 511 กิโลเมตร ลดลงเป็น 126 กิโลเมตร เวลาในการขนส่งรวมจาก 47 ชั่วโมง ลดลงเป็น 40.6 ชั่วโมง ต้นทุนในการขนส่งจาก 2,238,098 บาทต่อปี ลดลงเป็น 1,638,000 บาทต่อปี

ตัวแบบการขนส่ง ในกรณีทั่ว ๆ ไป [4] กำหนดให้ค่า a_i แทน จำนวนสินค้าจากแหล่งต้นทาง i ค่า b_j แทน จำนวนสินค้าจากแหล่งปลายทาง j ค่า X_{ij} แทน จำนวนสินค้าจากแหล่งต้นทาง i ไปยังปลายทาง j และค่า c_{ij} แทน ค่าใช้จ่ายการขนส่งต่อหน่วยในการส่งสินค้าจากแหล่งต้นทาง i ไปยังปลายทาง j เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, m$ และ $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ดังนั้น ตัวแบบการขนส่งเป็นดังนี้ ฟังก์ชันจุดประสงค์ $Minimize Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} X_{ij}$

เงื่อนไขบังคับ

1. ข้อจำกัดทางด้านแหล่งต้นทาง
$$X_{11} + X_{12} + \dots + X_{1n} \leq a_1$$
$$X_{21} + X_{22} + \dots + X_{2n} \leq a_2$$
$$\vdots$$
$$X_{m1} + X_{m2} + \dots + X_{mn} \leq a_m$$
2. ข้อจำกัดทางด้านแหล่งปลายทาง
$$X_{11} + X_{21} + \dots + X_{m1} \leq b_1$$
$$X_{12} + X_{22} + \dots + X_{m2} \leq b_2$$
$$\vdots$$
$$X_{1n} + X_{2n} + \dots + X_{mn} \leq b_n$$

ข้อจำกัดไม่เป็นศูนย์ $X_{ij} \geq 0$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, m$ และ $j = 1, 2, 3, \dots, n$

ลักษณะของปัญหาการขนส่งมีทั้งหมด 3 กรณี [4] ได้แก่ กรณีที่ 1 ข้อจำกัดทางด้านแหล่งต้นทางเท่ากับข้อจำกัดทางด้านแหล่งปลายทาง เรียกว่า ปัญหาการขนส่งที่อยู่ในรูปแบบมาตรฐานหรือปัญหาการขนส่งแบบสมดุล กรณีที่ 2 ข้อจำกัดทางด้านแหล่งต้นทางมากกว่าข้อจำกัดทางด้านแหล่งปลายทาง และกรณีที่ 3 ข้อจำกัดทางด้านแหล่งต้นทางน้อยกว่าข้อจำกัดทางด้านแหล่งปลายทาง สำหรับกรณีที่ 2 และ 3 เป็นปัญหาการขนส่งที่ไม่อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน จะต้องทำการแปลงให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานก่อน โดยการเพิ่มข้อจำกัดทางด้านแหล่งต้นทางเทียม (Dummy sources) หรือข้อจำกัดทางด้านแหล่งปลายทางเทียม (Dummy destination) ให้มีจำนวนที่สมดุล โดยกำหนดค่าใช้จ่ายเป็นศูนย์ การหาผลเฉลยของปัญหาการขนส่งแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) การหาผลเฉลยเริ่มต้น (Initial solution) ของตัวแบบการขนส่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย [5] ได้แก่ วิธีมุมตะวันตกเฉียงเหนือ (Northwest corner method) ซึ่งเป็นวิธีการอย่างง่าย โดยพิจารณาจากมุมตะวันตกเฉียงเหนือของตารางการขนส่งหรือเรียกว่าหลักเกณฑ์มุมบนซ้าย พร้อมทั้งใช้หลักการเปรียบเทียบอุปทานและอุปสงค์จำนวนที่กำหนด วิธีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด (Least-cost method) เป็นหลักการจัดสรรปริมาณสินค้าให้กับตำแหน่งที่มีค่าใช้จ่ายต่อหน่วยน้อยที่สุดก่อนตามลำดับ พร้อมทั้งใช้หลักการเปรียบเทียบอุปทานและอุปสงค์จำนวนที่กำหนด วิธีโดยประมาณของโวเกิล (Vogel's Approximation Method: VAM) เป็นการหาผลเฉลยเริ่มต้นโดยอาศัยพื้นฐานของค่าปรับ หรือเกิดความเสียหายในกรณีตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ไม่ถูกต้อง เป็นการพิจารณาค่าปรับหรือความเสียหายที่จะเกิดขึ้นสำหรับทุกเส้นทางการขนส่ง จากการหาผลเฉลยเริ่มต้นตามที่ได้กล่าวมา จะต้องมีการตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้นั้นสามารถพัฒนาเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้หรือไม่ ถ้าได้จะต้องดำเนินการพัฒนาหาคำตอบชุดใหม่ขึ้นมา ถ้าไม่ได้แสดงว่าคำตอบที่มีอยู่แล้วนั้นเป็นคำตอบที่ดีที่สุด และ 2) การหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solution) ซึ่งวิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีสเตปปีงสโตน (Stepping-Stone Method) เป็นการพิจารณาการขนส่งในตำแหน่งที่ไม่ถูกจัดสรรงานทุกตำแหน่งของผลเฉลยเริ่มต้น เพื่อพิจารณาเส้นทางที่สามารถลดค่าใช้จ่ายรวม และวิธีโมดิ (Modified Distribution Method: MODI) เป็นวิธีที่ตัดแปลงมาจากวิธีสเตปปีงสโตน อาศัยหลักการพิจารณาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการขนส่งปริมาณสินค้าสำหรับการปรับตำแหน่งที่ไม่ถูกจัดสรรงาน ซึ่งวิธีสเตปปีงสโตนและวิธีโมดิจะให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดเท่ากันเสมอ

ปัญหาหลักอย่างหนึ่งที่มีมากขึ้นได้เสมอจากการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อทำการวิจัยในด้านต่าง ๆ คือ การที่มีข้อมูลสูญหาย ถ้าหากละเลยอาจนำไปสู่ข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ ส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้า หากข้อมูลนั้นสูญหายไปจะส่งผลกระทบต่อคำนวณเส้นทางการขนส่ง ซึ่งการจำแนกประเภทของข้อมูลสูญหายนั้นเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งหาก เลือกใช้วิธีการจัดการกับข้อมูลสูญหายที่ไม่เหมาะสมย่อมส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ข้อมูล [6] การจำแนกข้อมูลสูญหายออกเป็น 3 ประเภท คือ 1) ข้อมูลสูญหายแบบสุ่มสมบูรณ์ (Missing Completely At Random: MCAR) เป็นลักษณะของข้อมูลสูญหายที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มจากค่าสังเกต ข้อมูลที่สูญหายไม่ขึ้นอยู่กับค่าใดค่าหนึ่ง 2) ข้อมูลสูญหายแบบสุ่ม (Missing At Random: MAR) เป็นลักษณะของข้อมูลสูญหายซึ่งไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสุ่มแต่เกิดขึ้นอย่างสุ่มภายในบางกลุ่มของค่าสังเกต ค่าของข้อมูลสูญหายขึ้นอยู่กับตัวแปรบางตัว และ 3) ข้อมูลสูญหายแบบไม่สุ่ม (Not Missing At Random: NMAR) เป็นลักษณะของข้อมูลสูญหายซึ่งไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสุ่ม โดยค่าของข้อมูลสูญหายขึ้นอยู่กับค่าของข้อมูลสมบูรณ์ในตัวแปร สำหรับข้อมูลค่าใช้จ่ายในการขนส่งนั้นเป็นต้นทุนของการขนส่ง ต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการขนส่งซึ่งเกิดจากต้นทุนคงที่ เช่น ค่าเช่า ที่ดิน ค่ายานพาหนะ ค่าเสื่อมสภาพ และเงินเดือน เป็นต้น สำหรับต้นทุนผันแปรเป็นต้นทุนที่แปรเปลี่ยนตามจำนวนการขนส่งหรือระยะทาง ในบางครั้งอาจพบปัญหาข้อมูลมีค่าการสูญหาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ณ เส้นทางการขนส่งที่ไม่กระทบกับค่าใช้จ่ายในการขนส่งเส้นทางการอื่น ซึ่งอาจเกิดจากการบันทึกข้อมูลผิดพลาด เป็นลักษณะการสูญหายของข้อมูลแบบหนึ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้ในกระบวนการขนส่ง ซึ่งในการหาตัวแบบการขนส่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบข้อมูลค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

วิธีการจัดการกับข้อมูลสูญหายแบบสุ่มสมบูรณ์ ทำได้โดยการแทนค่าสูญหาย (Imputation) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) การประมาณค่าที่ได้มาจากตัวแบบ เช่น Regression imputation, Ratio imputation และ Multiple imputation เป็นต้น และ 2) การแทนค่าที่ได้จากเซตข้อมูลของค่าที่สังเกตได้ ส่วนใหญ่ทำการศึกษการประมาณค่าสูญหายในการวิเคราะห์การถดถอย เช่น การประมาณค่าสูญหายในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ [6] การเปรียบเทียบวิธีการประมาณสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เมื่อตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีการสูญหายแบบนอนอินฟอร์เรเบิล [7] การประมาณค่าสูญหายของตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกส์ [8] โดยนิยมใช้ประมาณค่าสูญหาย ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ย วิธีสมการถดถอย วิธีอัตราส่วน [9] และ วิธี K-nearest neighbor [10]

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยสนใจศึกษาวิธีการจัดการกับการแก้ปัญหาข้อมูลค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าสูญหายในตัวแบบการขนส่ง การแทนค่าที่ได้จากข้อมูลของค่าที่สังเกตที่สมบูรณ์ 4 วิธี ได้แก่ 1) การแทนค่าสูญหายด้วยวิธีค่าเฉลี่ย (Mean imputation: Mean) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณหาค่าเฉลี่ยจากชุดข้อมูลที่ปรากฏอยู่ เพื่อแทนค่าข้อมูลสูญหาย ซึ่งวิธีดังกล่าวถือเป็นวิธีการจัดการค่าข้อมูลสูญหายที่ง่ายไม่ซับซ้อน [6] วิธีนี้ Wilks ได้นำเสนอเป็นคนแรกในปี ค.ศ. 1932 ซึ่งเป็นวิธีที่การประมาณค่าตัวแปรตามที่สูญหายโดยใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ไม่สูญหายของตัวแปร 2) วิธีการแทนค่าสูญหายด้วยวิธีค่ามัธยฐาน (Median imputation) ซึ่งเป็นวิธีการประมาณค่าสูญหาย โดยนำค่ามัธยฐานของข้อมูลมาแทนที่ค่าสูญหาย 3) วิธีการแทนค่าสูญหายด้วยวิธีค่าสูงสุด (Maximum imputation) ซึ่งเป็นวิธีการประมาณค่าสูญหายโดยการนำข้อมูลค่าใช้จ่ายที่ไม่สูญหายที่มีค่ามากที่สุดนำไปแทนค่าสูญหาย และ 4) วิธีการแทนค่าสูญหายด้วยวิธีค่าต่ำสุด (Minimum imputation) ซึ่งเป็นวิธีการประมาณค่าสูญหาย โดยการนำข้อมูลที่ไม่สูญหายที่มีค่า

น้อยที่สุดนำไปแทนค่าสูญหาย ในการศึกษารั้งนี้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของค่าการคำนวณค่าใช้จ่ายต่ำสุดในการขนส่งเมื่อแทนค่าสูญหายด้วยวิธีต่าง ๆ โดยใช้เกณฑ์การวัดของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) ภายใต้การจำลองข้อมูลตามสถานการณ์ต่าง ๆ ภายใต้ข้อกำหนดปัญหาการขนส่งแบบสมดุ เมื่อกำหนดค่าใช้จ่ายในการขนส่งให้มีการแจกแจงแบบเอกรูป (Uniform distribution) ซึ่งเป็นการแจกแจงของตัวแปรสุ่มที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดค่าใด ๆ มีค่าเท่ากัน ซึ่งข้อมูลค่าใช้จ่ายในบางครั้งอาจเป็นตัวเลขที่กำหนดมาเป็นช่วงของค่าใช้จ่าย ที่ความน่าจะเป็นของการค่าใช้จ่ายมีการแจกแจงแบบเอกรูป และการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) ซึ่งเป็นการแจกแจงของตัวแปรสุ่มต่อเนื่องมักพบได้บ่อย ๆ สำหรับข้อมูลเชิงปริมาณ ซึ่งอาจจะมีการกระจายของข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยในการศึกษารั้งนี้ผู้วิจัยกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของค่าใช้จ่ายมีความแตกต่างกันเพื่อเป็นตัวแทนของลักษณะการกระจายของข้อมูลที่สามารถพบได้ในปัญหาการขนส่ง

2. วิธีการทดลอง

ในการศึกษารั้งนี้ผู้วิจัยทำการจำลองข้อมูลค่าใช้จ่ายในการขนส่งตามสถานการณ์ต่าง ๆ ด้วยเทคนิควิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo method) โดยการทำวนซ้ำ 1,000 ครั้ง ในแต่ละสถานการณ์ด้วยโปรแกรม R เวอร์ชัน 4.2.1 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดจำนวนต้นทางและปลายทางของการขนส่งให้มีขนาดเท่ากัน โดยกำหนดเป็น 4, 5, 7, 10 และ 20 แห่ง กำหนดให้อุปสงค์และอุปทานของต้นทางและปลายทางแต่ละแห่งมีค่าเท่ากับ 100 หน่วย
2. สร้างข้อมูลค่าใช้จ่ายในการขนส่ง กรณีค่าใช้จ่ายในการขนส่งมีการแจกแจงแบบเอกรูป และการแจกแจงปกติ กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของค่าใช้จ่าย (C.V.) เท่ากับ 5%, 10%, 15%, 20%, 25% และ 30% กำหนดช่วงของการแจกแจงเอกรูป (ค่าต่ำสุด, ค่าสูงสุด) เป็น (10,12), (10,15), (10,17), (10,20), (10,25) และ (10,30) ตามลำดับ เพื่อให้มีค่า C.V. ตามที่กำหนด และกำหนดช่วงของการแจกแจงปกติ (ค่าเฉลี่ย, ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) เป็น (10,0.5), (10,1.0), (10,1.5), (10,2.0), (10,2.5) และ (10,3.0) ตามลำดับ เพื่อให้มีค่า C.V. ตามที่กำหนด
3. คำนวณค่าใช้จ่ายต่ำสุดในการขนส่งของ การหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solution) ของปัญหาการขนส่ง กรณีข้อมูลที่สมบูรณ์ ด้วยโปรแกรม R เวอร์ชัน 4.2.1 โดยใช้ library(lpSolve) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมในการหาผลเฉลยเริ่มต้นและพัฒนาผลเฉลยที่ได้จนเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด
4. กำหนดค่าสูญหายแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยจำนวนข้อมูลที่สูญหาย เท่ากับ 5%, 10%, 15% และ 20% ของข้อมูล
5. นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองที่มีค่าสูญหายไปแทนค่าสูญหายด้วยวิธีการประมาณค่าสูญหาย 4 วิธี ได้แก่ การแทนค่าสูญหายด้วยค่าเฉลี่ย การประมาณค่าสูญหายด้วยค่ามัธยฐาน การแทนค่าสูญหายด้วยค่าสูงสุด และการแทนค่าสูญหายด้วยด้วยค่าต่ำสุด
6. คำนวณค่าใช้จ่ายต่ำสุดในการขนส่งของ การหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาการขนส่ง กรณีข้อมูลที่แทนค่าสูญหาย ด้วยโปรแกรม R เวอร์ชัน 4.2.1 โดยใช้ library(lpSolve) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมในการหาผลเฉลยเริ่มต้นและพัฒนาผลเฉลยที่ได้จนเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด

7. ทวนซ้ำจำนวน 1,000 รอบ ด้วยโปรแกรม R เวอร์ชัน 4.2.1 คำนวณค่ารากของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) จากสูตร

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{1000} (Z_i - \hat{Z}_i)^2}{1000}} \text{ เมื่อ } i = 1, 2, 3, \dots, 1000$$

โดยที่ Z_i คือ ค่าใช้จ่ายต่ำสุดในการหาผลเฉลี่ยของตัวแบบการขนส่ง ในรอบที่ i จากข้อมูลที่สมบูรณ์
 \hat{Z}_i คือ ค่าใช้จ่ายต่ำสุดในการหาผลเฉลี่ยของตัวแบบการขนส่ง ในรอบที่ i จากการประมาณค่า
สูญหายของข้อมูลที่สูญหาย

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

การเปรียบเทียบค่า RMSE ของการหาผลเฉลี่ยในตัวแบบการขนส่ง จากตารางที่ 1 พบว่า เมื่อค่าใช้จ่ายในการขนส่งมีการแจกแจงแบบเอกรูป กำหนดต้นทางและปลายทางเท่ากับ 4 แห่ง กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันคงที่ เมื่อร้อยละการสูญหายเพิ่มขึ้น ค่า RMSE ของทุกวิธีมีค่าเพิ่มขึ้น และกรณีที่ร้อยละการสูญหายคงที่ และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเพิ่มขึ้นพบว่าค่า RMSE ของทุกวิธีมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบวิธีการแทนค่าสูญหาย พบว่า วิธีการแทนค่าสูญหายโดยวิธีค่าเฉลี่ย มีค่า RMSE น้อยที่สุด รองลงมาเป็นวิธีแทนด้วยค่ามัธยฐาน ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด ตามลำดับ เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันและร้อยละการสูญหายคงที่ และจากการเปรียบเทียบกรณีต้นทางเท่ากับ 5 แห่ง พบว่าวิธีการแทนค่าสูญหาย โดยวิธีค่าเฉลี่ย วิธีค่ามัธยฐาน วิธีค่าสูงสุด และวิธีค่าต่ำสุด มีค่า RMSE เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของต้นทางและปลายทางมีค่าเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 2 และผลการศึกษารณีต้นทางและปลายทาง 7, 10 และ 20 แห่ง ก็เป็นเช่นเดียวกันกับกรณีต้นทางเท่ากับ 4 และ 5 แห่ง ดังตารางที่ 3 - 5

เมื่อค่าใช้จ่ายในการขนส่งมีการแจกแจงแบบปกติ จากตารางที่ 1 ต้นทางและปลายทาง ในการขนส่งเท่ากับ 4 แห่ง พบว่า กรณีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันคงที่ ค่า RMSE ของทุกวิธีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อการสูญหายเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเพิ่มขึ้น ค่า RMSE ของทุกวิธีมีค่าเพิ่มขึ้น จากการเปรียบเทียบวิธีการแทนค่าสูญหาย เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันและร้อยละการสูญหายคงที่ พบว่าวิธีการแทนค่าสูญหาย โดยวิธีค่าเฉลี่ย มีค่า RMSE น้อยที่สุด รองลงมาเป็นวิธีค่ามัธยฐาน วิธีค่าสูงสุด และวิธีค่าต่ำสุด ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกรณีต้นทางเท่ากับ 5 แห่ง ดังตารางที่ 2 พบว่า วิธีการแทนค่าสูญหาย โดยวิธีค่าเฉลี่ย วิธีค่ามัธยฐาน วิธีค่าสูงสุดและวิธีค่าต่ำสุด มีค่า RMSE เพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนต้นทางเพิ่มขึ้น และผลการศึกษารณีต้นทางและปลายทาง 7, 10 และ 20 แห่ง ก็เป็นเช่นเดียวกันกับกรณีต้นทางเท่ากับ 4 และ 5 แห่ง ดังตารางที่ 3 - 5

ตารางที่ 1. เปรียบเทียบค่า RMSE ของการหาผลเฉลี่ยในตัวแบบการขนส่ง เมื่อต้นทางและปลายทาง เท่ากับ 4 แห่ง กรณีการแจกแจงแบบเอกรูปและการแจกแจงแบบปกติ

C.V.	การสุ่มหาย	การแจกแจงแบบเอกรูป				การแจกแจงแบบปกติ			
		วิธี ค่าเฉลี่ย	วิธี ค่าต่ำสุด	วิธี ค่าสูงสุด	วิธี ค่ามัธยฐาน	วิธี ค่าเฉลี่ย	วิธี ค่าต่ำสุด	วิธี ค่าสูงสุด	วิธี ค่ามัธยฐาน
5%	5%	37.59	52.15	50.79	41.23	29.77	64.73	37.95	30.17
	10%	53.24	85.56	72.53	57.75	42.54	96.85	56.21	42.69
	15%	64.04	98.59	92.09	69.79	55.80	124.26	76.35	56.04
	20%	82.52	119.79	122.60	90.08	63.44	148.69	89.55	63.56
10%	5%	77.49	136.53	98.89	80.56	50.21	107.05	65.88	51.77
	10%	116.14	199.97	155.82	119.96	69.54	162.36	96.80	72.16
	15%	135.27	250.80	194.91	140.43	88.35	208.35	125.66	91.21
	20%	166.05	306.38	253.67	175.42	104.71	258.15	155.34	107.17
15%	5%	102.66	167.90	143.49	106.11	70.56	154.18	88.99	73.96
	10%	145.68	267.15	195.40	150.15	102.56	236.66	139.68	104.82
	15%	182.85	342.59	268.91	195.12	135.66	322.15	191.47	139.79
	20%	223.60	426.84	343.60	231.19	157.57	369.42	235.05	162.26
20%	5%	138.46	246.62	177.51	141.81	85.38	202.76	101.88	87.01
	10%	209.58	374.19	294.69	215.91	127.63	306.95	180.31	129.36
	15%	249.70	486.13	370.58	263.36	168.03	411.35	240.10	175.39
	20%	294.51	604.71	453.40	309.34	204.35	480.77	304.91	210.22
25%	5%	205.40	368.73	266.78	211.78	108.51	256.48	141.77	109.73
	10%	299.01	555.54	404.08	311.03	172.15	385.94	232.77	176.07
	15%	355.95	723.90	531.53	372.76	218.49	521.31	316.39	223.38
	20%	448.39	868.80	700.76	469.53	247.00	603.64	375.85	252.22
30%	5%	237.17	472.85	311.00	239.29	148.76	289.38	188.55	152.64
	10%	405.41	733.14	565.27	417.82	188.09	485.72	264.88	191.08
	15%	466.88	963.59	682.88	484.38	258.99	631.09	374.14	265.25
	20%	586.74	1,164.12	887.88	606.79	280.96	772.09	435.29	286.59

ตารางที่ 2. เปรียบเทียบค่า RMSE ของการหาผลเฉลี่ยในตัวแบบการขนส่ง เมื่อต้นทางและปลายทาง เท่ากับ 5 แห่ง กรณีการแจกแจงแบบเอกรูปและการแจกแจงแบบปกติ

C.V.	การสุ่มหาย	การแจกแจงแบบเอกรูป				การแจกแจงแบบปกติ			
		วิธี ค่าเฉลี่ย	วิธี ค่าต่ำสุด	วิธี ค่าสูงสุด	วิธี ค่ามัธยฐาน	วิธี ค่าเฉลี่ย	วิธี ค่าต่ำสุด	วิธี ค่าสูงสุด	วิธี ค่ามัธยฐาน
5%	5%	44.66	72.87	57.71	47.01	38.18	94.39	45.28	38.73
	10%	55.64	85.91	71.62	58.27	43.53	123.25	55.59	43.93
	15%	68.15	101.54	92.79	72.18	53.51	143.07	67.82	54.41
	20%	75.52	114.46	104.45	78.34	61.92	161.90	82.52	63.40
10%	5%	89.82	177.85	115.20	92.41	60.90	175.81	77.91	63.09
	10%	116.58	231.58	157.00	120.90	75.87	235.97	101.73	76.50
	15%	138.51	267.30	190.58	144.50	92.14	280.77	127.75	95.29
	20%	159.44	319.26	225.39	166.56	108.28	314.18	149.23	109.66
15%	5%	117.10	240.98	151.23	118.70	83.67	254.79	108.12	84.62
	10%	158.53	321.89	213.59	164.81	107.77	337.96	143.04	109.12
	15%	189.42	383.44	261.21	196.75	132.37	395.60	175.76	134.35
	20%	205.26	434.40	297.91	214.66	156.69	472.96	220.88	158.24
20%	5%	161.54	347.61	212.65	166.37	115.81	353.41	144.53	118.19
	10%	210.13	446.56	297.37	214.98	152.78	434.52	200.85	154.38
	15%	246.14	540.39	344.08	253.67	177.76	533.80	237.91	181.27
	20%	292.73	619.70	420.78	299.04	209.57	623.19	282.17	212.37
25%	5%	249.01	513.54	313.61	252.27	136.04	449.21	167.60	138.35
	10%	298.15	691.54	384.55	306.75	169.80	555.52	227.88	171.34
	15%	355.69	815.90	503.66	360.47	230.14	687.23	317.22	231.73
	20%	424.42	954.71	612.23	439.84	247.26	767.54	352.77	250.28
30%	5%	304.02	679.60	393.79	314.07	172.51	501.30	227.75	174.41
	10%	413.74	913.96	540.84	417.78	217.12	662.93	278.78	217.84
	15%	501.35	1,106.93	685.41	512.37	261.49	817.74	353.82	266.16
	20%	576.66	1,259.80	803.97	590.58	294.10	908.26	399.20	299.39

ตารางที่ 3. เปรียบเทียบค่า RMSE ของการหาผลเฉลี่ยในตัวแบบการขนส่ง เมื่อต้นทางและปลายทาง เท่ากับ 7 แห่ง กรณีการแจกแจงแบบเอกรูปและการแจกแจงแบบปกติ

C.V.	การสูญเสีย	การแจกแจงแบบเอกรูป				การแจกแจงแบบปกติ			
		วิธีค่าเฉลี่ย	วิธีค่าต่ำสุด	วิธีค่าสูงสุด	วิธีค่ามัธยฐาน	วิธีค่าเฉลี่ย	วิธีค่าต่ำสุด	วิธีค่าสูงสุด	วิธีค่ามัธยฐาน
5%	5%	40.53	60.58	46.58	40.99	39.25	121.61	44.05	40.37
	10%	58.43	74.16	70.00	59.69	55.96	164.77	64.88	57.53
	15%	77.27	93.22	99.45	78.42	72.08	229.98	82.76	74.16
	20%	87.65	104.40	114.41	89.33	82.87	246.74	98.29	85.32
10%	5%	87.66	169.23	101.44	91.28	59.71	252.29	70.36	60.19
	10%	112.29	245.91	136.64	114.80	83.43	347.74	100.00	84.54
	15%	166.04	333.17	214.76	171.64	116.20	472.63	145.19	118.66
	20%	189.49	367.34	249.30	196.75	129.92	542.94	169.41	130.65
15%	5%	109.13	251.50	128.88	110.93	93.52	364.83	111.18	95.11
	10%	160.32	353.53	192.33	161.85	121.15	525.53	141.99	122.12
	15%	214.35	471.20	277.58	219.77	163.36	711.29	207.29	165.77
	20%	250.33	545.87	333.00	256.34	185.76	829.16	242.82	188.31
20%	5%	154.54	367.95	179.47	157.07	120.79	488.61	139.39	122.08
	10%	207.08	543.55	244.42	208.73	158.57	684.22	188.63	160.62
	15%	288.93	704.85	362.49	292.52	214.36	948.39	268.96	216.08
	20%	353.96	822.63	472.08	359.36	251.65	1,081.17	318.40	253.10
25%	5%	234.29	565.67	266.42	237.47	140.04	609.73	162.67	141.39
	10%	324.89	790.22	397.62	328.17	200.00	894.68	242.14	201.03
	15%	427.08	1,077.70	548.58	430.85	269.64	1,176.27	330.08	272.29
	20%	515.52	1,258.91	675.79	524.98	324.46	1,370.18	414.72	326.37
30%	5%	295.45	748.11	353.02	296.75	168.77	726.02	195.45	170.48
	10%	408.80	1,079.78	490.69	413.94	235.61	1,032.23	278.10	237.00
	15%	592.13	1,464.56	756.04	603.75	329.43	1,395.84	416.76	331.03
	20%	665.23	1,723.19	863.25	673.83	383.20	1,606.98	494.19	388.11

ตารางที่ 4. เปรียบเทียบค่า RMSE ของการหาผลเฉลี่ยในตัวแบบการขนส่ง เมื่อต้นทางและปลายทาง เท่ากับ 10 แห่ง กรณีการแจกแจงแบบเอกรูปและการแจกแจงแบบปกติ

C.V.	การ สูญ หาย	การแจกแจงแบบเอกรูป				การแจกแจงแบบปกติ			
		วิธี ค่าเฉลี่ย	วิธี ค่าต่ำสุด	วิธี ค่าสูงสุด	วิธี ค่ามัธยฐาน	วิธี ค่าเฉลี่ย	วิธี ค่าต่ำสุด	วิธี ค่าสูงสุด	วิธี ค่ามัธยฐาน
5%	5%	34.46	45.06	36.47	34.79	46.13	171.87	48.99	46.90
	10%	49.61	61.64	54.04	50.52	70.53	276.95	74.50	72.25
	15%	66.03	84.41	75.50	66.93	88.20	346.15	94.55	90.06
	20%	83.66	107.85	96.33	84.50	107.96	407.88	119.08	110.86
10%	5%	79.27	167.03	85.85	80.31	65.75	400.61	70.00	66.56
	10%	122.38	256.73	134.76	125.41	103.34	614.32	112.47	104.83
	15%	163.06	329.53	183.17	166.34	134.33	797.71	150.20	135.65
	20%	209.57	370.62	240.42	215.79	165.59	951.07	188.41	167.51
15%	5%	99.80	257.00	107.33	100.30	87.15	592.30	93.17	87.75
	10%	174.99	405.99	190.63	175.82	148.13	947.61	160.75	149.93
	15%	236.14	525.26	266.51	238.87	193.88	1,218.67	219.16	195.52
	20%	287.66	572.75	324.68	291.29	242.42	1,438.29	281.28	244.18
20%	5%	155.88	377.08	164.16	156.84	133.65	787.81	145.81	134.13
	10%	226.80	633.44	248.05	228.05	189.51	1,282.04	208.97	190.09
	15%	313.22	797.44	348.80	314.90	263.75	1,663.29	295.89	265.56
	20%	406.87	909.19	467.34	409.60	328.91	1,895.62	380.18	330.90
25%	5%	219.20	590.82	230.02	220.34	155.21	973.78	165.05	156.72
	10%	331.32	1,020.76	357.95	334.01	233.67	1,632.24	256.73	235.78
	15%	459.20	1,301.73	517.75	460.54	332.01	2,069.40	372.01	333.12
	20%	587.54	1,508.22	685.61	594.38	398.61	2,393.79	460.41	400.71
30%	5%	296.96	832.19	310.61	298.51	193.29	1,141.59	206.59	193.00
	10%	443.17	1,379.07	492.60	443.50	284.47	1,896.63	315.58	285.23
	15%	593.34	1,759.29	664.50	596.71	395.75	2,470.03	450.75	397.23
	20%	798.98	2,090.81	911.15	804.39	516.60	2,856.73	598.82	519.82

ตารางที่ 5. เปรียบเทียบค่า RMSE ของการหาผลเฉลยในตัวแบบการขนส่ง เมื่อต้นทางและปลายทาง เท่ากับ 20 แห่ง กรณีการแจกแจงแบบเอกรูปและการแจกแจงแบบปกติ

C.V.	การสุ่มหา	การแจกแจงแบบเอกรูป				การแจกแจงแบบปกติ			
		วิธี ค่าเฉลี่ย	วิธี ค่าต่ำสุด	วิธี ค่าสูงสุด	วิธี ค่ามัธยฐาน	วิธี ค่าเฉลี่ย	วิธี ค่าต่ำสุด	วิธี ค่าสูงสุด	วิธี ค่ามัธยฐาน
5%	5%	5.33	10.49	5.69	5.48	55.67	628.13	56.66	56.12
	10%	14.81	16.83	14.97	14.83	89.91	967.59	92.57	90.83
	15%	20.95	22.49	21.68	20.98	118.59	1,084.44	123.45	119.92
	20%	23.98	26.41	24.28	24.08	161.72	1,164.71	166.49	163.19
10%	5%	62.53	123.57	62.77	62.60	96.30	1,326.31	97.11	96.80
	10%	105.53	149.37	106.02	105.74	157.15	2,039.01	160.19	158.02
	15%	144.92	165.26	146.36	145.47	213.94	2,405.35	217.81	215.15
	20%	194.34	201.77	196.80	195.51	274.10	2,599.95	280.25	275.75
15%	5%	96.17	263.44	96.59	96.18	135.50	2,001.81	137.37	135.90
	10%	160.34	353.13	161.31	160.82	225.89	3,055.08	228.56	226.65
	15%	235.37	372.16	237.09	235.84	317.79	3,622.26	324.55	319.12
	20%	301.06	383.74	304.70	301.80	397.18	3,718.67	406.94	398.67
20%	5%	130.20	489.44	130.35	130.23	179.42	2,686.37	180.64	179.83
	10%	215.08	689.07	215.82	215.09	302.58	4,001.99	307.16	302.95
	15%	327.10	744.25	327.78	327.29	407.65	4,751.53	415.56	408.67
	20%	451.35	790.09	454.69	451.62	546.93	4,978.04	560.38	548.06
25%	5%	192.43	859.07	192.87	192.46	199.63	3,344.73	201.42	199.77
	10%	348.15	1,288.15	349.20	348.38	355.60	5,103.61	360.57	356.52
	15%	489.95	1,464.98	491.51	490.87	496.37	5,977.24	507.31	497.23
	20%	674.90	1,489.36	680.24	675.58	673.66	6,383.48	691.74	674.98
30%	5%	257.40	1,242.31	258.01	257.53	262.70	4,042.38	265.44	262.94
	10%	457.42	1,884.84	458.74	457.45	439.60	6,112.06	447.30	439.66
	15%	655.97	2,161.06	659.63	656.69	608.89	7,337.03	620.84	609.36
	20%	880.67	2,209.52	886.63	882.25	809.07	7,480.12	829.28	810.48

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาวิธีการแทนค่าสุ่มหาในตัวแบบการขนส่ง พบว่ากรณีค่าใช้จ่ายในตัวแบบการขนส่งมีการแจกแจงแบบเอกรูป จำนวนต้นทางและปลายทางขนาดเป็น 4, 5, 7, 10 และ 20 แห่ง พบว่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันคงที่ การแทนค่าสุ่มหาทุกวิธีมีค่า RMSE มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อร้อยละการสุ่มหาเพิ่มขึ้น และเมื่อการสุ่มหาของข้อมูลคงที่ การแทนค่าสุ่มหาทุกวิธีให้ค่า RMSE มีค่าเพิ่มขึ้น แปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน กรณีค่าใช้จ่ายในตัวแบบการขนส่งมีการแจกแจงแบบปกติ พบว่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันคงที่ ค่า RMSE ของทุกวิธีมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแปรผันตามการสุ่มหาเพิ่มขึ้น และเมื่อการสุ่มหาของข้อมูลคงที่ ค่า RMSE ของทุกวิธีมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน

เมื่อค่าใช้จ่ายในการขนส่งมีการแจกแจงแบบเอกรูป และการแจกแจงแบบปกติ การเปรียบเทียบวิธีการแทนค่าสุ่มหาทั้ง 4 วิธี พบว่า เมื่อจำนวนต้นทางและปลายทาง เท่ากับ 4, 5, 7, 10 และ 20 แห่ง ทุกค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันที่กำหนด และทุกค่าร้อยละการสุ่มหาของข้อมูลที่กำหนด วิธีการประมาณ

ค่าสูญเสียด้วยค่าเฉลี่ยมีค่า RMSE น้อยที่สุด รองลงมาเป็นการแทนค่าสูญเสียด้วยค่ามัธยฐาน ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าวิธีการประมาณค่าสูญเสียโดยวิธีค่าเฉลี่ยและวิธีค่ามัธยฐาน มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดการแจกแจงของค่าใช้จ่ายในการขนส่งให้มีลักษณะที่สมมาตร จากผลการศึกษาค้นคว้าพบว่าเมื่อค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูญเสียวิธีการแทนค่าสูญเสียโดยวิธีค่าเฉลี่ย มีค่า RMSE ในการประมาณค่าใช้จ่ายในการขนส่งน้อยที่สุด จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ในทุก ๆ สถานการณ์ที่ผู้วิจัยศึกษาซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าสูญเสียของตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกส์ [8] ผลการวิจัย พบว่า ที่ทุกร้อยละการสูญเสียที่กำหนด เมื่อขนาดตัวอย่างเท่ากับ 60, 100 และ 300 วิธีแทนค่าด้วยค่าเฉลี่ยมีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ คือ ค่าประมาณความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ทั้งนี้วิธีแทนค่าด้วยค่าเฉลี่ย เป็นวิธีการที่ง่าย และใช้ข้อมูลทุกค่าที่มี ซึ่งแตกต่างจากวิธีค่ามัธยฐาน ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด จะใช้ข้อมูลเพียงค่าเดียวมาเป็นตัวแทนในการแทนค่า ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์สำหรับปัญหาการขนส่งให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งน้อยที่สุด หากทำการแทนค่าสูญเสียค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดอาจทำให้เป็นเส้นทางที่ถูกเลือกใช้ในการขนส่งเพราะมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด จึงส่งผลให้ผลเฉลยที่ได้มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด และมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรณีที่มีฟังก์ชันจุดประสงค์เพื่อกำไรรวมมากที่สุดค่อนข้างมาก ในการศึกษาครั้งนี้ต่อไปอาจทำการศึกษาในกรณีที่มีฟังก์ชันจุดประสงค์เพื่อกำไรรวมมากที่สุด เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาภายใต้สถานการณ์ จำนวนต้นทางและปลายทาง มีค่าเท่ากัน ในการศึกษาครั้งนี้ต่อไปอาจทำการศึกษาในกรณีที่มีจำนวนต้นทางและปลายทาง มีค่าไม่เท่ากัน เพื่อให้ช่วยอธิบายผลการวิจัยได้ชัดเจนมากขึ้น และอาจศึกษาวิธีเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยวิธีอื่น ๆ เช่น วิธีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) เพื่อให้เกิดความแตกต่างในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ รวมถึงการศึกษานำวิธีการประมาณค่าสูญเสียที่เหมาะสม และอาจนำไปใช้ในการหาผลเฉลยในตัวแบบการขนส่งในกรณีศึกษาของบริษัทต่าง ๆ เพื่อเป็นการประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริงได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] สมเกียรติ เกตุเอี่ยม. 2547. การวิจัยดำเนินการ : การวิเคราะห์เชิงปริมาณทางธุรกิจ. พิมพ์ครั้งที่ 2, การผลิตเอกสารและตำรา กลุ่มงานบริการการศึกษา มหาวิทยาลัยทักษิณ, สงขลา. [Somkiat Ketuiam.2004. Operation Research: Business Quantitative Analysis. 2nd ed., Documents and Textbooks Thaksin University, Songkhla. (in Thai)]
- [2] นิติเดช คูหาทองสมฤทธิ์. 2560. การเลือกเส้นทางขนส่งสินค้าที่เหมาะสม โดยตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายแบบศูนย์หนึ่ง. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 12(2), 78-91. [Nitidetch Koothongsumri. 2017. Selecting optimal distribution route by zero-one goal programming mode. *Phranakhon Rajabhat Research Journal: Science and Technology*, 12(2), 78-91. (in Thai)]
- [3] ณัฐวี เย็นคงคา และณัฐพร คุดตะนันท์. 2560. การจัดเส้นทางและกำหนดเวลาการขนส่งของผู้จัดจำหน่ายเครื่องดื่มแอลกอฮอล์และน้ำดื่ม. โครงการงานวิศวกรรมหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมการจัดการและโลจิสติกส์ วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์,

- มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต. [Natthawadee Yenkhongkha and Nattaporn Kuttanan. 2017. Vehicle Routing and Scheduling of a Liquor, Beer, and Beverage Distributor. Engineering Project, Bachelor's degree, Management and Logistics Engineering, College of Innovative Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University. (in Thai)]
- [4] มานพ วราภักดิ์. 2552. การวิจัยดำเนินการ. พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. [Manop Warapak. 2009. Operation Research. 1st ed., Chulalongkorn University Press, Bangkok. (in Thai)]
- [5] รัตติกาล จอมประพันธ์ และพาชิตชนันต์ ศิริพานิช. 2558. การประมาณค่าสูญหายในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ. *วารสารพัฒนบริหารศาสตร์*, 55(1), 184-202, <https://doi.org/10.14456/ndj.2015.14>. [Ruttikan Jomprapan and Pachitjanut Siripanich. 2015. Missing Imputation in Multiple Linear Regression Analysis. *NIDA Development Journal*, 55(1), 183-202, <https://doi.org/10.14456/ndj.2015.14>. (in Thai)]
- [6] วริษฐา กณิกนันต์ และอนุภาพ สมบูรณ์สวัสดิ์. 2556. การเปรียบเทียบวิธีการประมาณสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุเมื่อตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีการสูญหายแบบนอนอิกนอร์เรเบิล. การประชุมมหาดใหญ่วิชาการ, ครั้งที่ 4, มหาวิทยาลัยมหาดใหญ่, สงขลา, 43-49. [Warittha Kaniknant and Anupap Somboonsawatdee. 2013. Comparison of The Estimation Methods for The Multiple Linear Regression Model with Nonignorable Missing Dependent and Independent Variables. The Proceeding of 4th Hat Yai Symposium, Hat Yai University, Songkhla, 43-49. (in Thai)]
- [7] สุปรียา สระโสม และธิดาเดียว มยุรีสุวรรณ. 2562. การเปรียบเทียบวิธีการเติมข้อมูลสูญหายในตัวแปรตามที่เกิดการสูญหายแบบสุ่มสำหรับการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, 47(4), 737-748. [Supiya Srasom and Tidadeaw Mayureesawan. 2019. Comparison of Missing Data Imputation Methods in Dependent Variable with Missing at Random for Multiple Linear Regression. *KKU Science Journal*, 47(4), 737-748. (in Thai)]
- [8] เรืองลักษณ์ หล้าใจเชื้อ, อำไพ ทองธีรภาพ และจุฑาภรณ์ สิ้นสมบูรณ์ทอง. 2560. การเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าสูญหายสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุเมื่อตัวแปรตามมีการสูญหายแบบสุ่ม. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 25(5), 766-777. [Rueangluck Lamjaisue, Ampai Thongteeraparp and Juthaphorn Sinsomboonthong. 2017. Comparison of Missing Data Estimation Methods for the Multiple Regression Analysis with Missing at Random Dependent Variable. *Thai Science and Technology Journal*, 25(5), 766-777. (in Thai)]
- [9] Chhabra, G., Vashisht, V., and Ranjan, J. 2017. A Comparison of Multiple Imputation Methods for Data with Missing Values. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(19), 1-7.

- [10] Asif, M., and Samart, K. 2022. Imputation Methods for Multiple Regression with Missing Heteroscedastic Data. *Thailand Statistician*, 20(1), 1–15.

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบลอยตัวไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงอยู่กับ
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากชานอ้อย
Floating Photocatalyst based on Titanium Dioxide Immobilized on
Carboxymethyl Cellulose Hydrogel from Bagasse

ปรัชญา วาทะสิทธิ์ วงเดือน ไม้สนธิ์ และ วियรัตน์ กุมุทานา*

Prachya Watasit Wongduan Maison and Wiyarat Kumutanat*

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ จ.ฉะเชิงเทรา ประเทศไทย
Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University,
Chachoengsao, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 22 พฤศจิกายน 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 12 ธันวาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 13 ธันวาคม 2567
Received: 22 November 2023, Revised: 12 December 2024, Accepted: 13 December 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัวไทเทเนียมไดออกไซด์/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล (Titanium dioxide Carboxymethyl Cellulose Hydrogel: TiO_2/CMC -hydrogel) เพื่อกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์ โดยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ได้จากชานอ้อยถูกผสมกับนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ จากนั้นเชื่อมขวางพอลิเมอร์ให้กลายเป็นไฮโดรเจลด้วยกรดซัคซินิก แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมได้ถูกนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคแอมพเทนนูเอเทโททาลรีเฟล็กชันฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy: ATR-FTIR) วิเคราะห์ลักษณะทางพื้นผิวไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อีมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM) และวิเคราะห์ค่าช่องว่างแถบพลังงานด้วยเทคนิคดิฟฟิวส์เรฟเลกแตนซ์ ยูวี สเปกโทรสโกปี (Ultraviolet-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy: UV-Vis DRS) การศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) กระจายตัวได้ดีบนวัสดุรองรับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล (CMC-hydrogel) และมีการเลื่อนตำแหน่งของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่คาร์บอกซิเลต (Carboxylate) ซึ่งบ่งบอกได้ว่ามีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl Cellulose: CMC) และอนุภาค TiO_2 นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุรองรับ CMC-hydrogel ช่วยลดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ของ TiO_2 ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/CMC -hydrogel สามารถสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว $2\% \text{TiO}_2/\text{CMC}$ -hydrogel มีประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์สูงถึง 78.11% หลังจากทดสอบเป็นเวลา 70 ชั่วโมง

คำสำคัญ : ชานอ้อย คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไฮโดรเจล ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว ไทเทเนียมไดออกไซด์

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: wiyarat.kum@rui.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.261319>

Abstract

This research focused on the preparation of Titanium dioxide Carboxymethyl Cellulose Hydrogel (TiO₂/CMC-hydrogel) floating catalyst for removing methyl orange dye. The obtained Carboxymethyl Cellulose (CMC) from bagasse was mixed with nano Titanium dioxide and then crosslinked the polymer into hydrogel using succinic acid. The synthesized hydrogel films were characterized by Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) technique. Surface morphology of hydrogels was analyzed by Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM). Band gap energy was evaluated by Ultraviolet-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV-Vis DRS) technique. The study of morphology showed that TiO₂ particles can disperse in CMC-hydrogel. Infrared absorption of carboxylate groups was shifted when adding TiO₂ content. This can be suggested that there are interactions between carboxylate of CMC and TiO₂ particles. In addition, CMC-hydrogel can decrease the band gap energy of TiO₂, leading to improving methyl orange removal under sunlight. 2% TiO₂/CMC-hydrogel floating catalyst provided an efficiency to remove methyl orange dye up to 78.11% after testing for 70 hours.

Keywords: Bagasse, Carboxymethyl cellulose, Hydrogel, Floating catalyst, Titanium dioxide

1. บทนำ

ปัญหาน้ำเสียโดยส่วนใหญ่มีสาเหตุหลัก ๆ มาจากน้ำทิ้งจากภาคการเกษตร โรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งน้ำทิ้งจากบ้านเรือนและชุมชน เป็นต้น น้ำทิ้งดังกล่าวมีการปนเปื้อนของสารประกอบอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่าง ๆ หากมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัด อาจก่อให้เกิดมลพิษและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำเป็นอย่างมาก ดังนั้นการแก้ไขปัญหาเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น [1]-[2] ปัจจุบันกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธี เช่น กระบวนการออสโมซิสผันกลับ [3] กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมี [4] กระบวนการแยกผ่านเยื่อกรอง [5] การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ [6] และกระบวนการทางชีวภาพจะมีการนำเชื้อจุลินทรีย์เข้ามาใช้ในการบำบัด [7] แต่เนื่องจากกระบวนการเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูงและมีอัตราการสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียค่อนข้างช้า [8] เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ปฏิกิริยาการเร่งเชิงแสงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO₂) ซึ่งเป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต มีความเสถียรต่อแสงและสารเคมี อีกทั้งราคาไม่สูงมากนัก [9] แต่อย่างไรก็ตามการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำยังมีข้อจำกัด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์จำเป็นต้องใช้รังสียูวีในการกระตุ้นเพื่อสร้างอนุมูลอิสระในการกำจัดสารอินทรีย์ ซึ่งแสงอาทิตย์ในธรรมชาติมีปริมาณรังสียูวีในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงเป็นอุปสรรคต่อการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อกำจัดสี้อมโดยใช้แสงจากธรรมชาติ ดังนั้นงานวิจัยจำนวนมาก

จึงมุ่งเน้นพัฒนาปรับปรุงให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความว่องไวต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ตมากขึ้น และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการใช้สารประกอบอินทรีย์ เช่น โทลูอินไดไอโซไซยานาต (Toluene Diisocyanate: $C_9H_6N_2O_2$) [10] และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl Cellulose: $C_8H_{15}NaO$) [11] ในการปรับปรุงพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ภายใต้แสงอาทิตย์ได้

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำขานอ้อยซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากทางภาคการเกษตรมาดัดแปลงเป็นคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล (Carboxymethyl Cellulose hydrogel) เพื่อใช้เป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดซับพลังงานในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้หลักการนี้ในการกำจัดสีย้อมในแหล่งน้ำ โดยวัสดุรองรับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลมีความสามารถในการบวมตัว โดยที่สามารถรักษาสภาพของวัสดุไว้ได้เมื่ออยู่ในน้ำ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการลอยตัว [12] ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ของไฮโดรเจลจะช่วยพยุงให้อนุภาค TiO_2 สามารถรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ จากการบวมตัวและลอยตัวของไฮโดรเจลสามารถช่วยให้ TiO_2 ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลน้ำในการสร้างสารอนุมูลอิสระเพื่อกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้แผ่นไฮโดรเจลยังช่วยดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์ส่งผลให้สามารถกำจัดสีย้อมอินทรีย์ได้เร็วขึ้น ข้อดีอีกประการหนึ่งคือวัสดุรองรับทำมาจากสารพอลิเมอร์ชีวภาพสามารถย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ โดยในปัจจุบันมีการศึกษาโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst) แบบลอยตัวที่ตรึงอยู่บนพื้นผิวของวัสดุที่มีน้ำหนักเบาอย่างกว้างขวาง เช่น เม็ดบีดส์แก้ว (Glass microbead) [13] พอลิเมอร์ (Polymer) [14] คอร์ก (Cork) [15] และกราฟไฟท์แบบขยาย (Expanded graphite) [16] ซึ่งโฟโตคะตะลิสต์แบบลอยตัวที่มีการใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์และสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีการต่าง ๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนที่ย่อยสลายได้ด้วยแสงได้ [17]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความมุ่งเน้นที่จะสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลจากขานอ้อยเพื่อใช้เป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์แบบลอยตัว ตลอดจนศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/CMC -hydrogel ในการกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) ทั้งภายใต้รังสียูวีและภายใต้แสงอาทิตย์

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุขานอ้อยที่สามารถหาได้จากอำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา ไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO_2 (P25 Degussa, Evonik) อัตราส่วนผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ (80:20) กรดซัคซินิก (Kemaus) กรดโมโนคลอโรอะซิติก (Sigma-Aldrich) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Univar)

อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (Velp Scientifica) เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter; Innovation Beyond 2000, Index) เครื่องปั่นละเอียด (HR2056, Philips) ตู้อบลมร้อน (Mettler) เครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์รุ่น (UV-Visible spectrophotometer; UV mini 1240V, Shimadzu และรุ่น UV-2600, Shimadzu) กล้องไม้ที่ติดตั้งหลอดให้แสงอัลตราไวโอเล็ต (TL 8W, Philips) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM; S4700, Hitachi)

2.2. วิธีการทดลอง

1) การเตรียมวัตถุดิบ

นำขานอ้อยที่สามารถหามาได้จากอำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา มาล้างด้วยน้ำจนสะอาดและหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) การสกัดเซลลูโลสจากขานอ้อย

ชั่งขานอ้อย 35 กรัม เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10%w/v ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลสจนกลายเป็นของเหลวหนืด มีสีน้ำตาลแดง จากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบาง ล้างเยื่อที่กรองด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีค่า pH เป็นกลาง นำเยื่อที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาปั่นด้วยเครื่องปั่นละเอียด ฟอกสีเยื่อขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 5%v/v ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงจนได้เยื่อที่เป็นสีขาว ล้างเยื่อด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างมีค่า pH เป็นกลาง อบเยื่อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปั่นด้วยเครื่องปั่นละเอียดอีกครั้ง [18] แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในลำดับต่อไป จากนั้นคำนวณหาผลผลิตร้อยละของผงเซลลูโลส โดยใช้สมการที่ (1)

$$\text{Percentage yield of cellulose} = \frac{W_B}{W_A} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_A และ W_B คือ น้ำหนักขานอ้อยและน้ำหนักเซลลูโลส ตามลำดับ

3) การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)

ชั่งผงเซลลูโลส 10 กรัม เติมไอโซโพรพานอลปริมาตร 200 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30%w/v ปริมาตร 32 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที เติมกรดโมโนคลอโรอะซิติก 12 กรัม แล้วปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำมากรองด้วยกระดาษกรอง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่า pH เป็นกลาง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [19] จากนั้นคำนวณหาผลผลิตร้อยละของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้สมการที่ (2)

$$\text{Percentage yield of CMC} = \frac{W_C}{W_A} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_A และ W_C คือ น้ำหนักเซลลูโลสและน้ำหนักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตามลำดับ

4) การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล

นำแผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้มาปั่นละเอียด จากนั้นชั่ง 1 กรัม และเติมกรดซัคซินิก จำนวน 5%w/w ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปั่นกวนอย่างต่อเนื่องจนมีลักษณะเหนียวและหนืด เทสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลงในภาชนะพิมพ์ (ขนาด 10x10x0.5 เซนติเมตร) จากนั้นอบที่

อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.50 ชั่วโมง อบเพิ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อระเหยความชื้น และขั้นตอนสุดท้ายอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อเชื่อมขวางสายโซ่โพลีเมอร์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากนั้นคำนวณหาผลผลิตร้อยละของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล โดยใช้สมการที่ (3) โดยแผ่นฟิล์มที่ได้จะมีความหนาอยู่ในช่วง 150-200 ไมครอน

$$\text{Percentage yield of CMC-hydrogel} = \frac{W_d}{W_A} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ W_d และ W_A คือ น้ำหนักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและน้ำหนักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล ตามลำดับ

5) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว TiO₂/CMC-hydrogel

นำแผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้มาปั่นละเอียด ชั่ง 1 กรัม และเติมกรดซัลฟิวริกจำนวน 5%w/w ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปั่นจนอย่างต่อเนื่องจนมีลักษณะเหนียวและหนืด เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) จำนวน 0.5, 1 และ 2%w/w ของน้ำหนักคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากนั้นขึ้นรูปแผ่นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นเดียวกับวิธีในข้อ 4)

6) การพิสูจน์ของแผ่นฟิล์ม TiO₂/CMC-hydrogel

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยแอมพเททโททรีเฟลกชันฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยในการวิเคราะห์ตัวอย่างจะทำการวัดการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 4000-650 cm⁻¹ ทำการสแกนซ้ำ 40 รอบ แล้วประเมินผล วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์ม TiO₂/CMC-hydrogel ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชันทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ตำแหน่งภาคตัดขวาง ซึ่งเตรียมชิ้นงานด้วยการหักตัวอย่างภายใต้สภาวะไนโตรเจนเหลว ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ของแผ่นฟิล์มของแผ่นฟิล์ม TiO₂/CMC hydrogel วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคดิฟฟิวรีแฟลกแทนซ์ ยูวี สเปกโทรสโกปี ช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยใช้สมการที่ (4)

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} \quad (4)$$

เมื่อ E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน (eV)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (4.16x10⁻¹⁵ eV·s)

c คือ ค่าความเร็วแสง (3x10¹⁷ nm/s)

λ คือ ค่าขอบความยาวคลื่นที่ดูดกลืน (nm)

7) การศึกษาปริมาณสารตัวเติมของแผ่นฟิล์ม TiO_2/CMC -hydrogel

ซึ่งตัวอย่างปริมาณ 2 กรัม ใส่ในถ้วยครุชชีเบล บันทึกน้ำหนักก่อนเผา จากนั้นนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และบันทึกน้ำหนักหลังเผา จากนั้นคำนวณหาร้อยละปริมาณสารตัวเติม (Amount of additive) โดยใช้สมการที่ (5)

$$\text{Amount of additive (\%)} = \frac{W_1}{W_2} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ W_1 และ W_2 คือน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา และน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา ตามลำดับ

8) ศึกษาการบวมตัวของแผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล

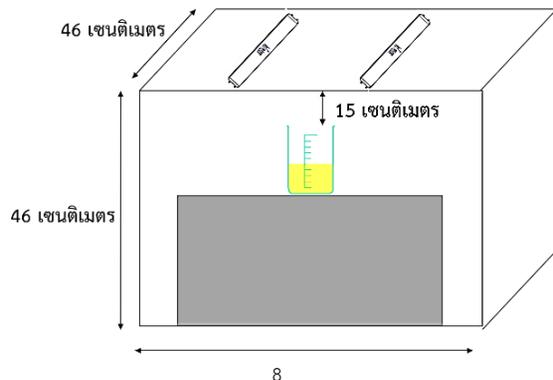
ตัดแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลขนาด 3x3 เซนติเมตร นำไปซังและจดบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ตามเวลาที่กำหนด คือ 5, 10, 20, 30, 60, 120 และ 180 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนด ซังแผ่นไฮโดรเจลแล้วคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพการบวมตัวของแผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล โดยใช้สมการที่ (6)

$$\text{Water swelling} = \frac{(B-A)}{A} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ A และ B คือน้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจลก่อนแช่น้ำ และน้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจลหลังแช่น้ำตามลำดับ

9) การทดสอบการสลายสีของสีย้อมภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต

การสลายสีของสีย้อมภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต ทดสอบโดยใช้หลอดยูวีขนาด 8 วัตต์ จำนวน 2 หลอด ติดตั้งในกล่องที่มีขนาด 46x51x46 เซนติเมตร ระยะห่างจากหลอดยูวีถึงตัวอย่างเท่ากับ 15 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 1 จากนั้นวางบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายเมทิลออเรนจ์เข้มข้น 5 ppm ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และวางแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัวในสารละลาย ปิดฝากล่องให้สนิท ปล่อยให้สีย้อมถูกดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยา 30 นาที จากนั้นเปิดแสงอัลตราไวโอเล็ต และเก็บสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ทุก ๆ 0, 5, 10, 20, 30, 50 และ 70 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ยาวความคลื่น 465 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer และทำการวิเคราะห์ซ้ำอีก 2 รอบ



รูปที่ 1. กล่องสำหรับส่องแสงอัลตราไวโอเล็ต

10) การทดสอบสลายสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์

บรรจุสารละลายเมทิลออเรนจ์เข้มข้น 5 ppm ปริมาตร 50 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ วางแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาลอยตัวในสารละลาย ปิดปากบีกเกอร์ให้ด้วยฟิล์มพลาสติกบางใส ปล่อยให้สีย้อมถูกดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาในที่มีด 30 นาที จากนั้นนำบีกเกอร์ไปวางบริเวณที่มีแสงแดด (ในช่วงเดือนมีนาคม) เก็บสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ทุก ๆ 0, 5, 10, 30, 50 และ 70 ชั่วโมง โดยทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์วันละ 8 ชั่วโมง ในช่วงเวลา 8.00-16.00 น. ของแต่ละวัน หลังจากทดสอบในแต่ละวันทำการเก็บตัวอย่างไว้ในที่มีดและนำตัวอย่างมาทดสอบต่อในวันถัดไป นับเวลาเพิ่มจนครบเวลา 70 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ยาวความคลื่น 465 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และทำการวิเคราะห์ซ้ำอีก 2 รอบ

11) การทำกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลออเรนจ์ เข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ppm จากสารละลายมาตรฐาน 100 ppm นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเมทิลออเรนจ์ที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เขียนกราฟมาตรฐานและคำนวณค่าความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐาน

3. ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล

3.1 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฮโดรเจล

1) การเตรียมวัตถุดิบ

นำขานอ้อยแบบสดมาปอกเปลือกส่วนนอกออก จากนั้นนำส่วนเยื่อในที่ได้หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ล้างน้ำให้สะอาด แล้วอบด้วยตู้อบลมร้อนเพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำขานอ้อยที่แห้งแล้วมาปั่นละเอียดจะได้ผงของเซลลูโลส ลักษณะดังรูปที่ 2(ก)-2(ค) ตามลำดับ



รูปที่ 2. ลักษณะขานอ้อยที่เตรียมได้ (ก) ขานอ้อยแบบสด (ข) ขานอ้อยแบบแห้ง และ (ค) ขานอ้อยแบบปั่นละเอียด

2) การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฮโดรเจล

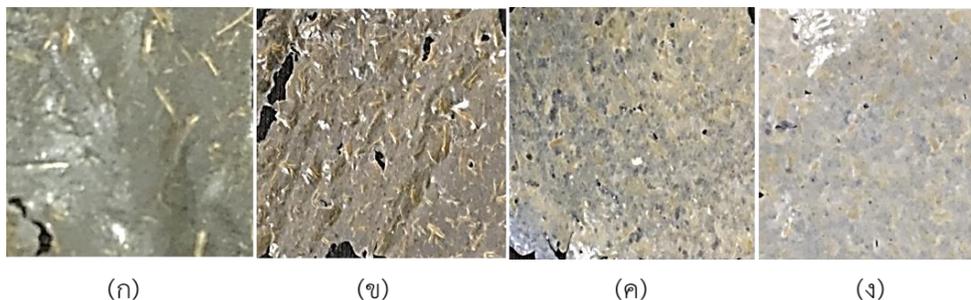
จากการเตรียมเซลลูโลสจากขานอ้อย จากนั้นนำเซลลูโลสที่เตรียมได้มาทำปฏิกิริยากับกรดคลอโรอะซิติกได้ผลผลิตเป็นคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากนั้นนำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไปสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริก ได้ร้อยละผลผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1. ปริมาณร้อยละผลผลิตที่สังเคราะห์ได้ต่อปริมาณขานอ้อย

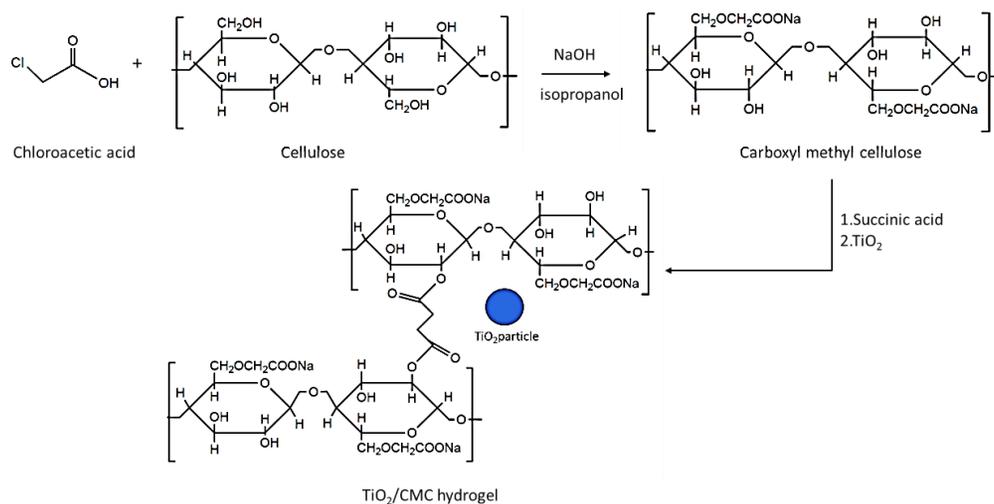
สารผลิตภัณฑ์	ร้อยละผลผลิต
เซลลูโลส	37.68
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	25.10
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล	23.03

3.2 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว TiO_2/CMC -hydrogel

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว TiO_2/CMC -hydrogel ที่มีปริมาณของ TiO_2 เท่ากับ 0.5%, 1% และ 2% พบว่าแผ่นฟิล์มมีความขุ่นมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3(ก)-3(ง) ตามลำดับ โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและปฏิกิริยาการสังเคราะห์ TiO_2/CMC -hydrogel แสดงดังรูปที่ 4 จากนั้นทำการศึกษาปริมาณสารตัวเติม TiO_2 ที่อยู่ใน CMC -hydrogel โดยการเผาตัวอย่าง TiO_2/CMC -hydrogel ที่อุณหภูมิสูงเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ ทำการวิเคราะห์น้ำหนักที่เหลืออยู่ของ TiO_2 ผลการทดลองพบว่า สัดส่วนร้อยละของ TiO_2 มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณ TiO_2 ที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการทดลองของวัสดุรองรับไฮโดรเจล (0.5, 1.0 และ 2.0%) ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3. ลักษณะแผ่นฟิล์ม (ก) CMC-hydrogel (ข) 0.5%TiO₂/CMC-hydrogel (ค) 1%TiO₂/CMC-hydrogel และ (ง) 2%TiO₂/CMC-hydrogel



รูปที่ 4. ปฏิกริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและปฏิกริยาการสังเคราะห์ TiO₂/CMC-hydrogel

ตารางที่ 2. ปริมาณสารตัวเติม TiO₂ ในตัวเร่งปฏิกริยา

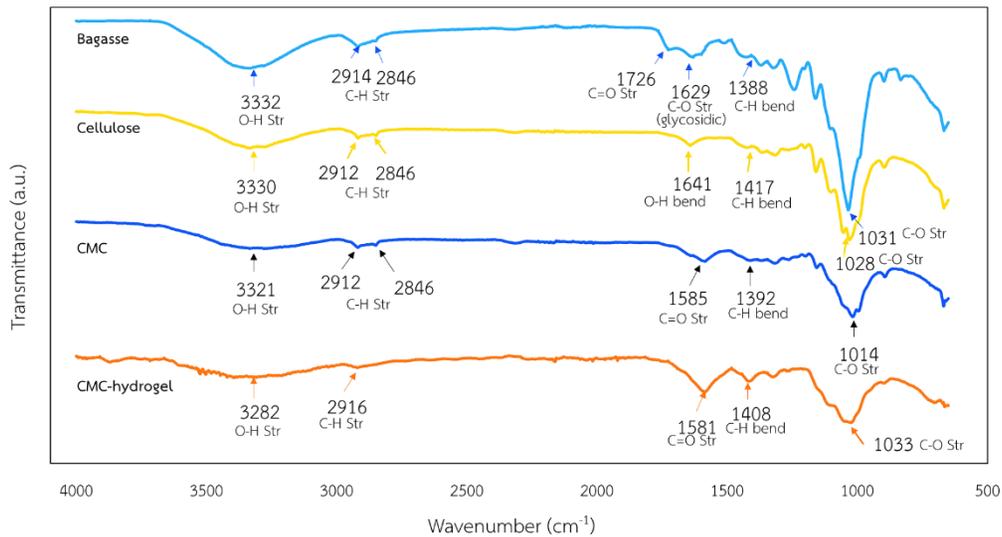
ตัวเร่งปฏิกริยา	น้ำหนัก TiO ₂ หลังเผา (กรัม)	สัดส่วน TiO ₂ (%)
0.5%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.01	0.46
1.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.02	0.94
2.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.04	2.05

3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคแอมเทนนูเอเทดโททรีเฟลกชันฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมี ด้วยแอมเทนนูเอเทดโททรีเฟลกชันฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีของ

สารตัวอย่าง โดยผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของชานอ้อย เซลลูโลส CMC และ CMC-hydrogel แสดงดังรูปที่ 5

ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างชานอ้อย แสดงหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ตำแหน่ง 3332 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ O-H stretching ตำแหน่ง 2914 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-H stretching (Asymmetric) ตำแหน่ง 2846 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-H stretching (Symmetric) ตำแหน่ง 1734 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching ของเอมิเซลลูโลสและลิกนิน ตำแหน่ง 1629 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะไกลโคซิดิกชนิดเบต้าของเซลลูโลสและเอมิเซลลูโลส ตำแหน่ง 1388 cm^{-1} และ 1031 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-H bending และ C-O stretching ของโครงสร้างเซลลูโลส โดยพีดดังกล่าวสอดคล้องกับโครงสร้างของเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบในชานอ้อย [20]



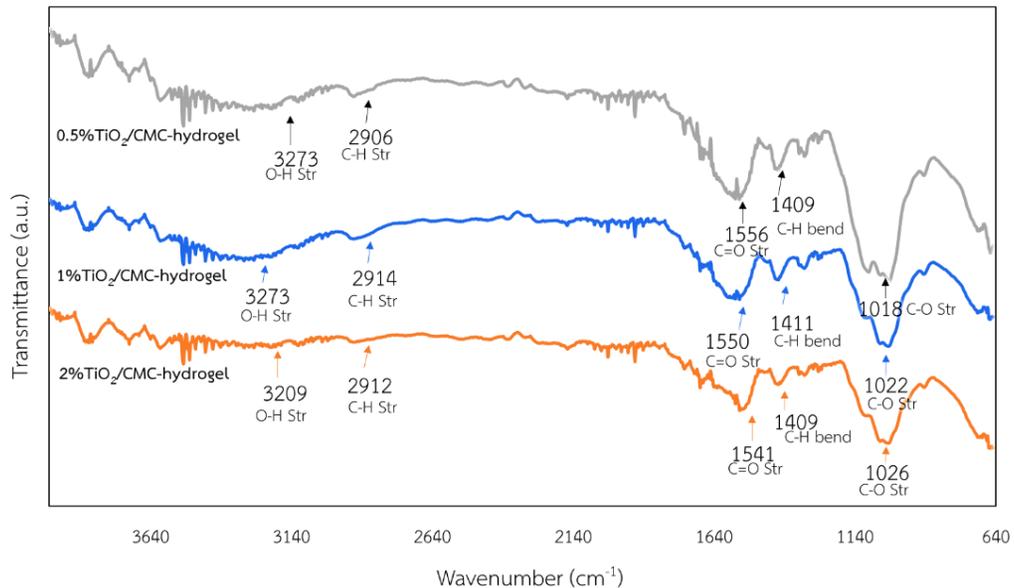
รูปที่ 5. อินฟราเรดสเปกตรัมของชานอ้อย เซลลูโลส CMC และ CMC-hydrogel

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเซลลูโลส พบตำแหน่งการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เลขคลื่น 1641 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่ถูกดูดซับ [21] ตำแหน่ง 1417 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-H bending ที่ตำแหน่ง 1031 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-O stretching [22] นอกจากนี้ยังมีการปรากฏพีดที่ 3330 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH Group) ของเซลลูโลส ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าสารที่สกัดได้จากชานอ้อยคือ เซลลูโลส

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่สังเคราะห์ได้พบตำแหน่งการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เลขคลื่น 1585 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching ของหมู่ carboxylate [23] ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของ CMC ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์ CMC จากเซลลูโลสได้ นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง 1392 cm^{-1} และ 1014 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-H bending และพันธะ C-O stretching ตามลำดับ [24]

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล (CMC-hydrogel) พบตำแหน่งการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เลขคลื่น 1581 cm^{-1} และเป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching พบว่าพีคของ CMC-hydrogel มีการดูดกลืนแสงมากขึ้นและมีการเลื่อนตำแหน่งสูงกว่า CMC เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการรวมกันของพีคของหมู่ฟังก์ชัน carboxylate และคาร์บอนิลของกรดซัคซินิก นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง 1408 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-O bending ของกรดซัคซินิก [25] ซึ่งปรากฏในพีคของ CMC-hydrogel มากกว่า CMC ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างของกรดซัคซินิกที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวาง จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจึงสามารถยืนยันได้เบื้องต้นว่าเกิดการเชื่อมขวาง CMC ได้

ค่าการดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรดของ $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$ ที่มีปริมาณ TiO_2 0.5%, 1% และ 2% แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าแผ่นไฮโดรเจลตัวอย่างปรากฏหมู่ฟังก์ชันหลักคล้ายกัน คือ ที่ตำแหน่ง $3273\text{-}3209\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของพันธะ O-H stretching ตำแหน่ง $2914\text{-}2906\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของพันธะ C-H stretching ตำแหน่ง $1556\text{-}1541\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching ของหมู่ Carboxylate โดยที่ตำแหน่งนี้พบการเลื่อนของพีคเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ Carboxylate และอนุภาค TiO_2 ที่ตำแหน่ง $1411\text{-}1409\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของพันธะ C-O bending ของกรดซัคซินิก ตำแหน่ง $1081\text{-}1022\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของพันธะ C-O stretching ทั้งนี้พีคที่พบในช่วง $3273\text{-}3209\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคมีลักษณะกว้างที่สัมพันธ์กับการสั่นแบบ O-H stretching

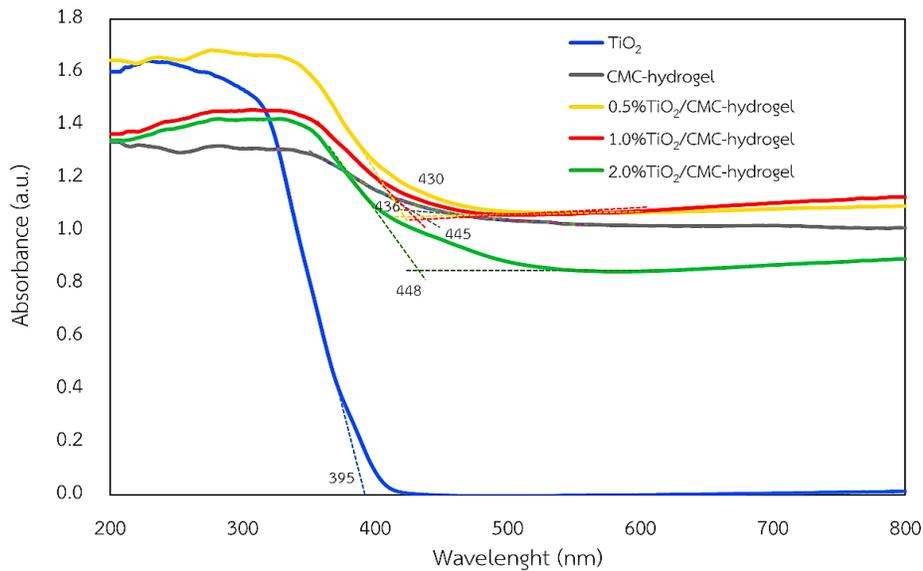


รูปที่ 6. อินฟราเรดสเปกตรัมของ 0.5%, 1% และ 2% $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$

3.4 ผลการวิเคราะห์ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)

ค่าช่องว่างแถบพลังงานของตัวอย่าง วิเคราะห์ได้โดยความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิล (200-800 nm) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า

TiO₂ มีการดูดกลืนแสงเฉพาะในช่วงรังสียูวีเท่านั้น โดยมีค่าขอบการดูดกลืนแสงที่ 395 nm ส่วนวัสดุรองรับ CMC-hydrogel มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงวิซิเบิล โดยมีค่าขอบการดูดกลืนแสงที่ 445 nm ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/CMC-hydrogel สามารถดูดกลืนแสงทั้งในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิล ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ และวัสดุรองรับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าขอบการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO₂ ดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นนำค่าขอบการดูดกลืนแสงของแต่ละตัวอย่างมาคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) โดยใช้สมการของพลิงค์ พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO₂ ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าขอบการดูดกลืนแสง อาจเนื่องมาจากการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาค TiO₂ และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิเลตที่อยู่บนโครงสร้างของ CMC ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sugashini และคณะ [11]



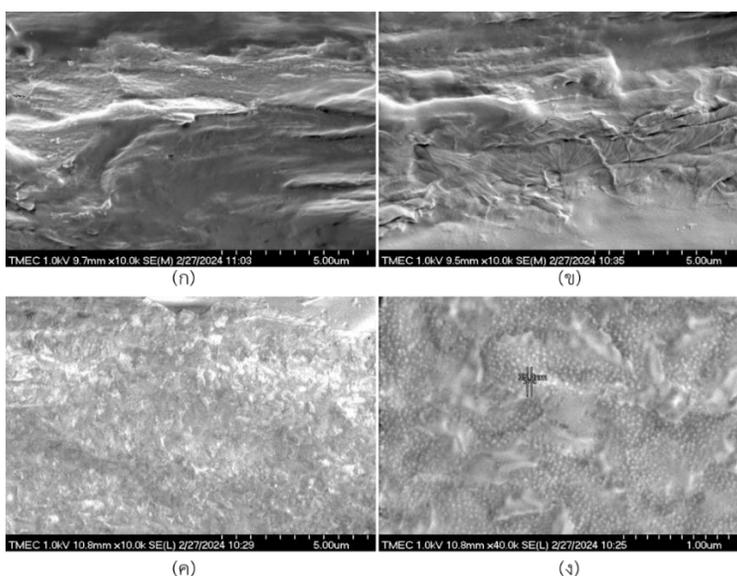
รูปที่ 7. สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิลของตัวอย่าง

ตารางที่ 3. จุดตัดความยาวคลื่นและค่าช่องว่างแถบพลังงานของตัวอย่าง

Materials	Absorption edge (nm)	Band gap energy (eV)
TiO ₂	395.02	3.15
CMC-hydrogel	445.16	2.78
0.5%TiO ₂ /CMC-hydrogel	430.07	2.89
1.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	436.15	2.85
2.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	448.17	2.77

3.5 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของ TiO₂/CMC-hydrogel

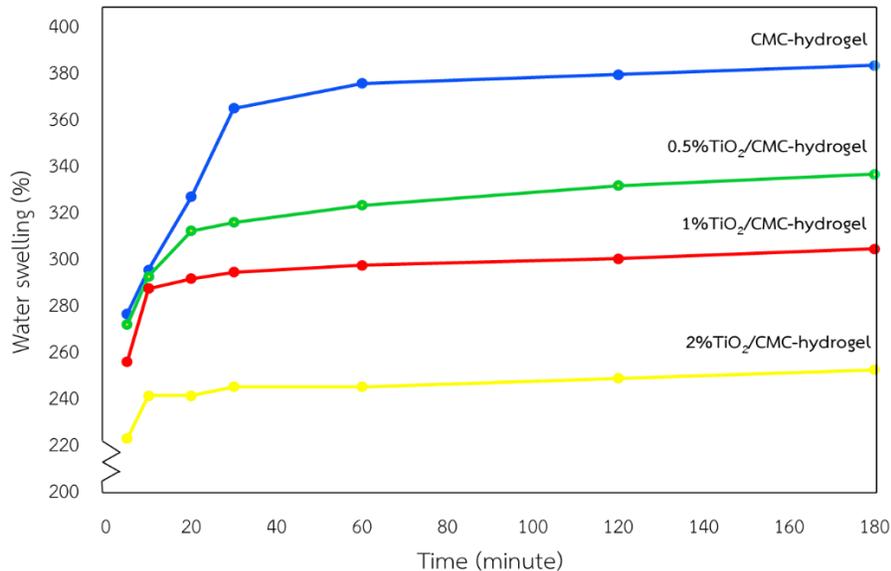
สัณฐานวิทยาของตัวอย่าง TiO₂/CMC-hydrogel ที่ตำแหน่งภาคตัดขวางสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 8(ก)-8(ง) พบว่าอนุภาค TiO₂ มีการกระจายตัวเป็นวัสดูรกรับ hydrogel ทั้ง 3 ชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาค TiO₂ ในรูป 8(ค) มีปริมาณมากกว่า 8(ข) และ 8(ก) ตามลำดับ สอดคล้องกับปริมาณ TiO₂ ที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่าง TiO₂/CMC-hydrogel แสดงดังตารางที่ 2 เมื่อศึกษาตัวอย่าง 2.0%TiO₂/CMC-hydrogel ด้วยกำลังขยาย 40k สังเกตได้ว่าอนุภาค TiO₂ มีการกระจายตัวเป็นแบบอนุภาคเดี่ยว (Single particle) และพบว่าอนุภาค TiO₂ มีขนาดประมาณ 35 นาโนเมตร จากข้อมูลสัณฐานวิทยาสามารถบ่งบอกได้ว่ากระบวนการใช้ในการเตรียม TiO₂/CMC-hydrogel มีความเหมาะสม



รูปที่ 8. สัณฐานวิทยาที่ กำลังขยาย 10k ของ (ก) 0.5%TiO₂/CMC-hydrogel (ข) 1.0%TiO₂/CMC-hydrogel (ค) 2.0%TiO₂/CMC-hydrogel และ (ง) สัณฐานวิทยาที่ กำลังขยาย 40k ของ 2.0%TiO₂/CMC-hydrogel

3.6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบวมน้ำของไฮโดรเจล

การศึกษาการบวมน้ำของฟิล์ม CMC-hydrogel และ TiO₂/CMC-hydrogel ที่ความเข้มข้น 0.5%, 1% และ 2% ทดสอบโดยการนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างแช่น้ำที่เวลา 5, 10, 20, 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบวมน้ำของตัวอย่างมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลาเริ่มต้น และพบว่าฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีการบวมน้ำมากที่สุดที่เวลา 180 นาที เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิเลตที่อยู่บนโครงสร้างของ CMC สามารถดึงดูดโมเลกุลน้ำได้ดี จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO₂ ในวัสดูไฮโดรเจล ทำให้ประสิทธิภาพในการบวมน้ำลดลง เนื่องจากอนุภาคของ TiO₂ ที่อยู่ใน CMC-hydrogel เกิดแรงดึงดูดกับหมู่คาร์บอกซิเลต (ยืนยันจากผล ATR-FTIR) ส่งผลให้สายโซ่ CMC-hydrogel มีความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลน้ำได้น้อยลง แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9. การบวมน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาลอยตัว TiO₂/CMC-hydrogel

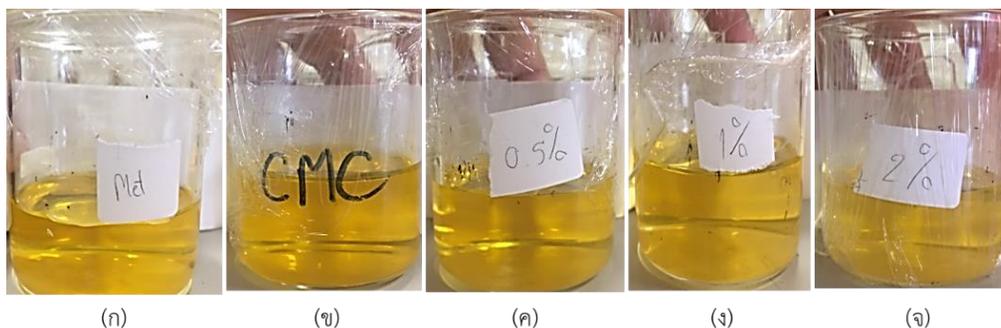
อย่างไรก็ตามการเติม TiO₂ ในปริมาณ 2wt% พบว่าวัสดุไฮโดรเจลยังคงมีความสามารถในการบวมน้ำได้ ซึ่งการบวมน้ำของไฮโดรเจลสามารถช่วยให้ TiO₂ สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลน้ำเพื่อสร้างสารอนุภาคอิสระในกำจัดสีย้อม นอกจากนี้การบวมตัวของแผ่นไฮโดรเจลยังช่วยดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้เข้ามาใกล้อนุภาค TiO₂ ส่งผลให้สามารถกำจัดสีย้อมอินทรีย์ได้ หากแผ่นไฮโดรเจลไม่สามารถบวมน้ำได้เนื่องจากอนุภาค TiO₂ ถูกเคลือบไว้โดยวัสดุรองรับ ทำให้อนุภาค TiO₂ ไม่สามารถสัมผัสโมเลกุลน้ำและสารอินทรีย์ได้

3.7 การศึกษาการสลายสีย้อม

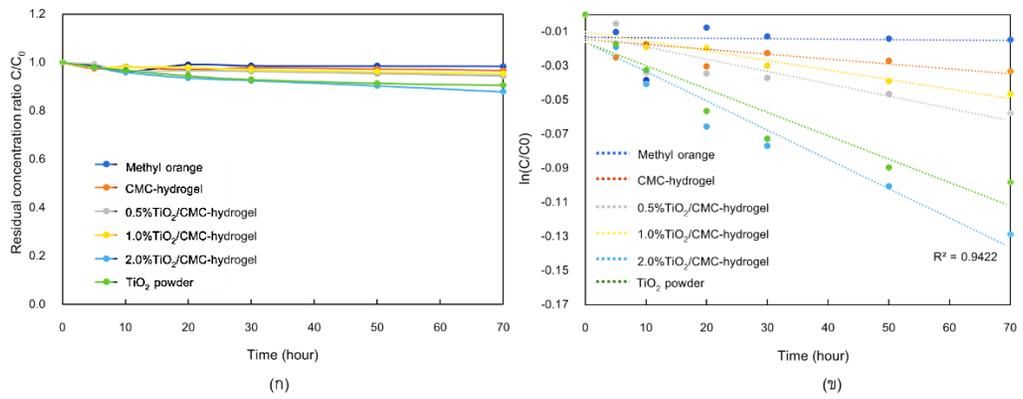
1) การสลายสีย้อมภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต

การเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัวทั้งสามชนิด ถูกทดสอบโดยการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ที่ความเข้มข้น 5 ppm ทำการศึกษาที่ช่วงเวลา 0, 5, 10, 20, 30, 50 และ 70 ชั่วโมงตามลำดับ ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (ความเข้มแสงเฉลี่ย 1910 ลักซ์) พบว่าสารละลายเมทิลออเรนจ์ที่ไม่ได้ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของเมทิลออเรนจ์ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ค่อนข้างคงที่หลังจากผ่านการทดสอบเป็นเวลา 30 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 10 ผลการทดลองที่ได้ปรากฏในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบด้วยแผ่นฟิล์ม CMC-hydrogel และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี TiO₂ ในปริมาณน้อย (0.5%TiO₂/CMC-hydrogel และ 1.0%TiO₂/CMC-hydrogel) อาจเนื่องมาจากความเข้มแสงยูวีในกล่องทดสอบมีปริมาณน้อยเกินไป จึงส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัวที่มีปริมาณ TiO₂ เป็นองค์ประกอบในปริมาณน้อย (0.5 และ 1.0wt%) ไม่สามารถสลายโมเลกุลของเมทิลออเรนจ์ได้ภายในระยะเวลา 70 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 เป็น 2.0wt% พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2 /CMC-hydrogel มีแนวโน้มในการสลายโมเลกุลของเมทิลออเรนจ์ได้เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 11(ก) และยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2 /CMC-hydrogel มีค่า C/C_0 ลดลงที่เวลาทดสอบ 10 ชั่วโมง เนื่องจากในช่วงเวลานี้อุณหภูมิ TiO_2 เริ่มกระบวนการดูดซับพลังงานแสงยูวีเพื่อสร้างอนุมูลอิสระในการกำจัดสีย้อม นอกจากนี้พบว่าค่า C/C_0 มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่ทดสอบ โดยมีประสิทธิภาพการสลายโมเลกุลของเมทิลออเรนจ์เท่ากับ 12% ภายในระยะเวลาทดสอบ 70 ชั่วโมง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยเมื่อปริมาณของ TiO_2 เพิ่มขึ้นจึงส่งผลทำให้ความสามารถในการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นเนื่องจาก 2% TiO_2 /CMC-hydrogel มีพื้นที่ผิวของอนุภาค TiO_2 มากกว่า (ยืนยันได้จากผล FE-SEM) จึงสามารถสร้างอนุมูลอิสระเพื่อกำจัดสีย้อมได้มากขึ้น และจากการศึกษาทางจลนศาสตร์การสลายตัวของเมทิลออเรนจ์ พบว่าการสลายตัวของเมทิลออเรนจ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2 /CMC-hydrogel สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับ 1 ตามโมเดลจลนศาสตร์ของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.94 แสดงดังรูปที่ 11(ข) นอกจากนี้ค่าคงที่อัตราที่ปรากฏ (k_{app}) ซึ่งหาได้จากความชันของกราฟจากรูป 11(ข) ถูกแสดงเพิ่มเติมในตารางที่ 4 โดยพบว่าค่า k_{app} ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2 /CMC-hydrogel มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.0017 cm^{-1} อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมภายใต้รังสียูวียังไม่มีประสิทธิภาพมากนัก เนื่องจากแสงยูวีที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มแสงน้อยเกินไป จึงส่งผลให้อุณหภูมิ TiO_2 สร้างอนุมูลอิสระเพื่อกำจัดสีย้อมได้น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว 2.0% TiO_2 /CMC-hydrogel มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงกว่าเล็กน้อยภายใต้ระยะเวลาทดสอบ 70 ชั่วโมง อาจเนื่องจากวัสดุรองรับไฮโดรเจลที่เป็นองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว ช่วยพยุงให้อนุภาค TiO_2 รับพลังงานจากแสงยูวีได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ชนิดผง ซึ่งจะเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคที่บริเวณก้นภาชนะเมื่อใช้เวลาในการทดสอบเป็นระยะเวลานาน



รูปที่ 10. การสลายสีย้อมภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตการสลายสีย้อม ณ เวลา 30 ชั่วโมง ของ (ก) Methylorange (ข) CMC (ค) 0.5% TiO_2 /CMC-hydrogel (ง) 1% TiO_2 /CMC-hydrogel และ (จ) 2% TiO_2 /CMC-hydrogel



รูปที่ 11. ผลการสลายสีของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (ก) ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสีของเมทิลออเรนจ์เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และ (ข) จลนศาสตร์ของการสลายเมทิลออเรนจ์เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต

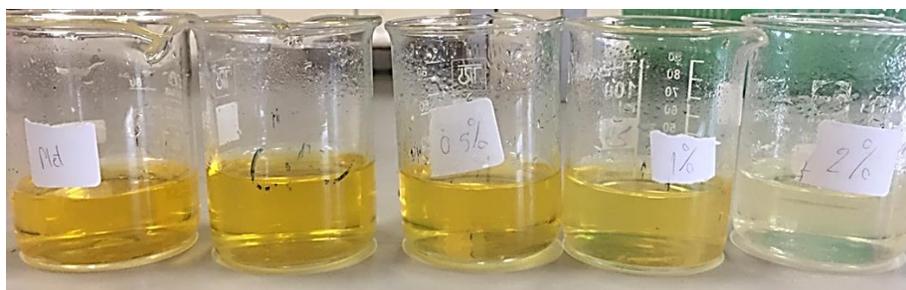
ตารางที่ 4. ค่าคงที่อัตราที่ปรากฏ (k_{app}) และค่า R^2 ของการสลายสีของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต

ตัวเร่งปฏิกิริยา	k_{app} (min ⁻¹)	R^2
Methyl orange (ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา)	0.0000	0.0044
CMC-hydrogel	0.0003	0.4516
0.5%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0007	0.7811
1.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0006	0.8814
2.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0017	0.9422
TiO ₂ powder	0.0014	0.8895

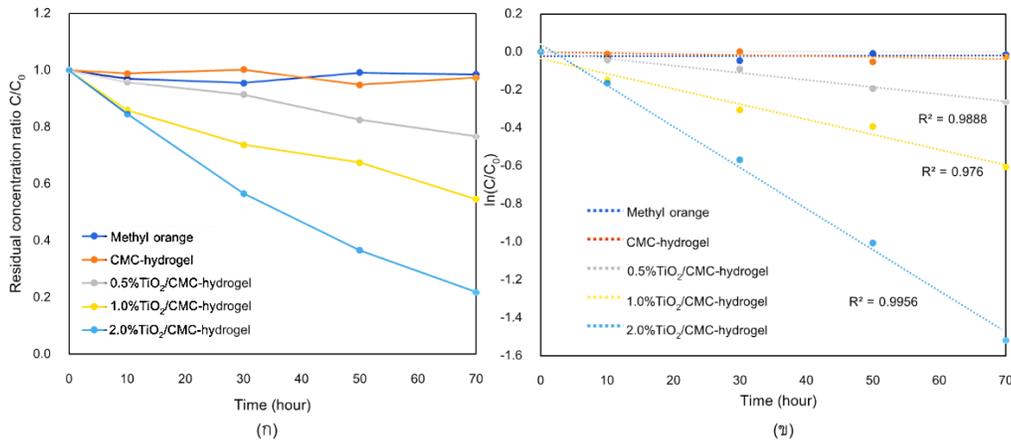
2) การสลายสีของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์

การสลายสีของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ ทดสอบโดยใช้แผ่นฟิล์มแบบลอยตัว CMC-hydrogel, 0.5%TiO₂/CMC-hydrogel, 1%TiO₂/CMC-hydrogel และ 2%TiO₂/CMC-hydrogel โดยทำการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์ (ความเข้มแสงเฉลี่ย 552,500 ลักซ์) เป็นเวลา 0, 10, 30, 50 และ 70 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า ค่า C/C_0 ของสารละลายเมทิลออเรนจ์ที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และแผ่น CMC-hydrogel ค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 70 ชั่วโมง เนื่องจากแผ่น CMC-hydrogel ที่ไม่มีอนุภาค TiO₂ ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ ประกอบกับในการทดลองได้มีการปิดภาชนะทดสอบอย่างมิดชิดทำให้ไม่มีผลจากการระเหยของโมเลกุลน้ำในสารละลายเมทิลออเรนจ์ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5%TiO₂/CMC-hydrogel, 1%TiO₂/CMC-hydrogel และ 2%TiO₂/CMC-hydrogel สามารถสลายสีของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ได้ แสดงดังรูปที่ 12 โดยพบว่า ค่า C/C_0 ของแผ่นฟิล์มทั้งสามชนิดมีแนวโน้มลดลงหลังจากใช้เวลาทดสอบ 10 ชั่วโมง ในช่วงเวลานี้อนุภาค TiO₂ เริ่มกระบวนการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสร้างอนุมูลอิสระในการกำจัดสีของเมทิลออเรนจ์ เมื่อใช้เวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่า C/C_0 ของแผ่นฟิล์มยังมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO₂ ในแผ่นฟิล์มแบบลอยตัว โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 2%TiO₂/CMC-hydrogel มีประสิทธิภาพในการสลายสีของเมทิลออเรนจ์ได้มากที่สุดถึง 78.11% ที่เวลา 70 ชั่วโมง ดังแสดงรูปที่ 13(ก) อธิบายได้จากเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO₂ ใน

วัสดุ CMC-hydrogel ทำให้มีพื้นที่ผิวของอนุภาค TiO_2 ในการถูกกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 บนวัสดุไฮโดรเจล จากผลการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์ (FE-SEM) ดังนั้น TiO_2 จึงสามารถสร้างอนุภาคลิโอสระเพื่อกำจัดสีย้อมได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์ในระยะเวลาสั้นๆ ยังส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดสีย้อมของ TiO_2/CMC -hydrogel เพิ่มขึ้น และพบว่าผลการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์ มีประสิทธิภาพมากกว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตในตู้ทดสอบภายใต้ระยะเวลาทดสอบ 70 ชั่วโมง เนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/CMC -hydrogel มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงวิซิเบิลได้ สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 ใน CMC-hydrogel ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการสร้างอนุภาคลิโอสระภายใต้แสงอาทิตย์ ประกอบกับความเข้มแสงที่ได้รับจากดวงอาทิตย์มีปริมาณมากกว่าตู้ทดสอบแสงยูวี ด้วยเหตุดังกล่าวข้างต้นจึงส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/CMC -hydrogel มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์ จากการศึกษาจลนศาสตร์ของการสลายเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ พบว่าการสลายตัวของเมทิลออเรนจ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/CMC -hydrogel สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับ 1 ตามโมเดลจลนศาสตร์ของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood) โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5% TiO_2/CMC -hydrogel, 1% TiO_2/CMC -hydrogel และ 2% TiO_2/CMC -hydrogel มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98, 0.97 และ 0.99 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 13(ข) ค่าคงที่อัตราที่ปรากฏ (k_{app}) ของการสลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ถูกแสดงในตารางที่ 5 จากตารางพบว่าค่า k_{app} ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2/CMC -hydrogel มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.0217 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2/CMC -hydrogel มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมได้ดีภายใต้แสงอาทิตย์ ดังแสดงในตารางที่ 6 ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยานี้ จึงมีศักยภาพในการถูกพัฒนาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมในแหล่งน้ำธรรมชาติได้



รูปที่ 12. การสลายสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์ ณ เวลา 70 ชั่วโมง (ก) Methylorange (ข) CMC (ง) 0.5% TiO_2/CMC -hydrogel (จ) 1% TiO_2/CMC -hydrogel และ (ฉ) 2% TiO_2/CMC -hydrogel



รูปที่ 13. ผลการสลายสีของเมทิลอเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ (ก) ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสีของเมทิลอเรนจ์เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และ (ข) จลนศาสตร์ของการสลายเมทิลอเรนจ์เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นภายใต้แสงอาทิตย์

ตารางที่ 5. ค่าคงที่อัตราที่ปรากฏ (k_{app}) และค่า R^2 ของการสลายสีของเมทิลอเรนจ์

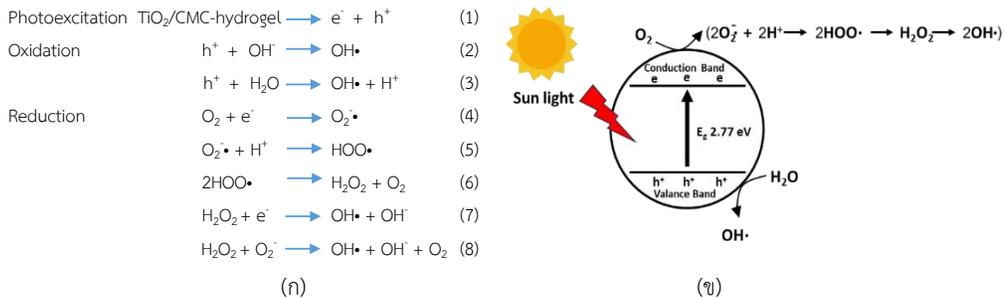
ตัวเร่งปฏิกิริยา	k_{app} (min^{-1})	R^2
Methyl orange (ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา)	0.0000	0.0017
CMC-hydrogel	0.0005	0.4201
0.5%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0038	0.9888
1.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0080	0.976
2.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0217	0.9956

ตารางที่ 6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	สารอินทรีย์ที่ใช้ทดสอบ	เวลาที่ทำการทดสอบ	ประสิทธิภาพการกำจัดสี
TiO ₂ /Polylactic acid [26]	เมทิลีนบลู	ปฏิกิริยาแบบมีแสง UVC 90 นาที	แผ่นฟิล์ม TiO ₂ /PLA สามารถกำจัดสารเมทิลีนบลูได้ 80%
0.1 % Ag/TiO ₂ [27]	เมทิลีนบลู	12 ชั่วโมง ภายใต้การฉายแสงยูวีช่วงที่ตามองเห็น	ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเงิน สลายสีของอินทรีย์ได้ 30%
TiO ₂ /Polyethylene terephthalate [28]	เมทิลีนบลู	12 ชั่วโมง ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์	แผ่น TiO ₂ /PET ที่มีประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู 28.36%
2%TiO ₂ /CMC-hydrogel (งานวิจัยนี้)	เมทิลอเรนจ์	70 ชั่วโมง ภายใต้แสงอาทิตย์	แผ่นไฮโดรเจลมีประสิทธิภาพการสลายสีได้ 78.11%

3) กลไกการสลายสีย้อม

กลไกการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบลอยตัว TiO₂/CMC-hydrogel ภายใต้แสงอาทิตย์ เริ่มจากเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ (Valence band) จะรับพลังงานและถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) และสร้าง hole ว่างที่แถบวาเลนซ์ ที่บริเวณแถบวาเลนซ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยโมเลกุลน้ำจะทำปฏิกิริยากับ hole เกิดเป็นสาร OH• ซึ่งมีความสามารถในการสลายโมเลกุลของสีย้อมให้กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น CO₂ และ H₂O ส่วนอิเล็กตรอนที่บริเวณแถบนำไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุล O₂ เกิดเป็น O₂^{-•} ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาต่อเป็น OH• [29] และมีความสามารถในการสลายสีย้อมได้เช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14. การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ (ก) ปฏิกิริยา photo-oxidation และ (ข) กลไกการสลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/CMC-hydrogel

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ นำขานอ้อมมาสังเคราะห์เป็นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลโดยใช้ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริก ได้ผลผลิตเท่ากับ 92.1% จากการศึกษการบวมน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/CMC-hydrogel พบว่าการเพิ่มปริมาณ TiO₂ ส่งผลให้การบวมน้ำของแผ่นไฮโดรเจลลดลง จากผลสัมฤทธิ์พบว่าการเพิ่มอนุภาค TiO₂ มีการกระจายตัวดีในวัสดุรองรับไฮโดรเจล ผลการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/CMC-hydrogel พบว่าวัสดุรองรับ CMC-hydrogel สามารถช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงในช่วงแสงวิซิเบิลได้ ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว 2%TiO₂/CMC-hydrogel มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมได้ถึง 78.11% ที่เวลา 70 ชั่วโมง โดยมีกลไกการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับ 1

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ที่สนับสนุนการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] อังศุมา ก้านจักร, รติกร แสงห้าว และเมตตา เก่งวงศ์. 2565. การบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือนและร้านอาหารโดยการใช้ถังดักไขมันร่วมกับวัสดุธรรมชาติท้องถิ่น. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 27(3), 1648-1665. [Angsuma Kanchak, Ratikorn Sanghaw and Metta Kengchuwong. 2022. Wastewater Treatments from Household and Canteen by Applying Grease Trap Combined with Locally Available Natural Materials. *Burapha Science Journal (BSJ)*, 27(3), 1648-1665. (in Thai)]
- [2] องค์การพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ (อพวช.). 2564. ปัญหาน้ำเน่าเสียในประเทศไทย. แหล่งข้อมูล: <https://www.nsm.or.th/nsm/th/node/6251>. ค้นเมื่อวันที่ 22 ตุลาคม 2567.
- [3] Simonic, M. 2021. Reverse Osmosis Treatment of Wastewater for Reuse as Process Water-A Case Study. *Membranes*, 11(976), 1-12, <https://doi.org/10.3390/membranes11120976>.
- [4] Sun, W. et al. 2017. Effective Treatment of High Phosphorus Pharmaceutical Wastewater by Chemical Precipitation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95(8), 1585-1593, <https://doi.org/10.1002/cjce.22799>.
- [5] Leiknes, T. 2009. The effect of coupling coagulation and flocculation with membrane filtration in water treatment: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 8-12, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60003-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60003-6).
- [6] Bhatnagar, A., Hogland, W., Marques, M. and Sillanpää, M. 2013. An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering*, 219, 499-511, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.038>.
- [7] Shin, D.C., Kim, J.S. and Park, C.H. 2019. Study on physical and chemical characteristics of microorganism immobilized media for advanced wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 29(100784), 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.wpe.2019.100784>.
- [8] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ และสิริรัตน์ พานิช. 2563. การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยตัวดูดซับจากวัสดุชีวภาพ. รายงานการวิจัย, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. [Woravith Chansuvarn and Sirirat Panich. 2020. Bioadsorbents for the removal of heavy metals from an aqueous solution. Research project report, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (in Thai)]
- [9] จุรีพร วงศ์จันดา. 2562. การกำจัดสีเขียวมรกตจากสารละลายด้วยกระบวนการดูดซับร่วมกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ตรึงบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. [Jureeporn Wongjunda. 2019. Removal of malachite green dye from aqueous

- solution by adsorption process with photocatalysis process using titanium dioxide immobilized montmorillonite clay. Thesis, Major in environmental engineering, Faculty of engineering, Ubon Ratchathani University. (in Thai)]
- [10] Jiang, D., Xu, Y., Hou, B., Wu, D. and Sun, Y. 2007. Synthesis of visible light-activated TiO₂ photocatalyst via surface organic modification. *Journal of Solid State Chemistry*, 180(5), 1787-1791, <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.03.010>.
- [11] Sugashini, S. et al. 2022. Nanochitosan/carboxymethyl cellulose/TiO₂ biocomposite for visible-light-induced photocatalytic degradation of crystal violet dye. *Environmental Research*, 204, 1-6, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112047>.
- [12] อัจฉมาน อาแดต ฮาซันดอปอ และสุรเดช มัจฉาเวช. 2564. การเตรียมแผ่นไฮโดรเจลเย็นเคลือบยางพาราสำหรับลดไข้. รายงานการวิจัย, คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา. [Ajaman Adair Hasan Daupor and Suradet Matchawet. 2021. Preparation of Cooling Pads Hydrogel Coated Natural Rubber for Reducing Temperature. Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University. (in Thai)]
- [13] Cui, L., Wang, Y., Niu, M., Chen, G. and Cheng, Y. 2009. Synthesis and visible light photocatalysis of Fe-doped TiO₂ mesoporous layers deposited on hollow glass microbeads. *Journal of Solid State Chemistry*, 182(10), 2785-2790, <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2009.07.045>.
- [14] Singh, S., Mahalingam, H. and Singh, P.H. 2013. Polymer-supported titanium dioxide photocatalysts for environmental remediation: A review. *Applied Catalysis A: General*, 462-463, 178-195, <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.04.039>.
- [15] Matias, M.L. et al. 2022. Floating TiO₂-Cork Nano-Photocatalysts for Water Purification Using Sunlight. *Sustainability*, 14(9645), 1-22, <https://doi.org/10.3390/su14159645>.
- [16] Wang, X. et al. 2018. Adsorption-photocatalysis Functional Expanded Graphite C/C Composite for In-Situ Photocatalytic Inactivation of *Microcystis aeruginosa*. *Chemical Engineering Journal*, 341, 516-525, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.054>.
- [17] Xing, Z. et al. 2018. Recent advances in floating TiO₂-based photocatalysts for environmental. *Applied Catalysis B: Environmental*, 225, 452-467, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.005>.
- [18] ทิชัมพร จันทร์สุข, เบญจวรรณ บุญยะสิงห์ และพิเชษฐ อนุรักษ์อุดม. 2562. การบอกลีเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด. การประชุมวิชาการระดับชาติของภาควิชาชีพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม วันที่ 3-4 ธันวาคม 2562, 3022-3027. [Tikhamporn Chansuk, Benjawan Boonyasing and Piched Anuragudom. 2019. Carboxymethyl Cellulose from Corn Peel. Proceedings of 16th National Academic Conference, Chemistry division, Faculty of Liberal Arts and

- Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, December 3-4, 3022-3027. (in Thai)]
- [19] นิภาพร แสงชู, ชุฬีพร พุฒนวล, วนิตา พงษ์ศักดิ์ชาติ, กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์ และอารักษ์รา แสงนาค. 2551. วิธีการและภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากฟางข้าว, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, 31(4), 797-809. [Nipaporn Saengchu, Chuleeporn Puttmual, Vanida Pongsakchat, Kullaya Limroongreungrat and Arpathsra Sangnark. 2007. Optimum Method and Conditions of Carboxymethyl Cellulose Production from Rice Straw. *KMUTT Research and Development Journal*. 31(4), 797-809. (in Thai)]
- [20] Scheufele, F.B. et al. 2015. Assessment of Drying Temperature of Sugarcane Bagasse on Sorption of Reactive Blue 5G Dye. *Fibers and Polymers*, 8, 1646–1656, <https://doi.org/10.1007/s12221-015-5087-2>.
- [21] Wulandari, W.T., Rochliadi, A. and Arcana, I.M. 2016. Nanocellulose prepared by acid hydrolysis of isolated cellulose from sugarcane bagasse. *Materials Science and Engineering*, 107, 1–7, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/107/1/012045>.
- [22] Abdel-Halim, E.S. 2013. Chemical modification of cellulose extracted from sugarcane bagasse: Preparation of hydroxyethyl cellulose. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(3), 362–371, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.05.006>.
- [23] Fattima, N. et. al. 2021. Carboxymethyl Cellulose Hydrogel from Biomass Waste of Oil Palm Empty Fruit Bunch Using Calcium Chloride as Crosslinking Agent. *Arabian Journal of Chemistry*, 13, 1–16, <https://doi.org/10.3390/polym13234056>.
- [24] Rozali, M.L.H., Ahmad, N.H. and Isa, M.I.N. 2015. Effect of Adipic Acid Composition on Structural and Conductivity Solid Biopolymer Electrolytes Based on Carboxy Methylcellulose Studies. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 9(2), 39–45.
- [25] Paris Junior J.A. et al. 2021. Chemical, spectroscopic characterization, molecular modeling and antibacterial activity assays of a silver (I) complex with succinic acid. *Eclética Química Journal*, 46(2), 26–35, <https://doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v46.2.2021.p26-35>.
- [26] สุปรีดา หอมกลิ่น. 2562. การกำจัดสารเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกโดยใช้แผ่นฟิล์ม TiO₂/PLA. วิทยานิพนธ์, หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยพะเยา. [Supeeda Homklin. 2018. Removal of methylene blue by photocatalytic process using TiO₂/PLA, Master of Engineering in Environmental Engineering, University of Phayao. (in Thai)]
- [27] ณัฐนันท์ รุ่งฟ้า. 2564. การพัฒนาอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเชื่อมเพื่อใช้เป็น ส่วนผสมในสารเคลือบผิว. วิทยานิพนธ์, หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

- ประยุกต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. [Nutthanun Rungfa. 2021. Co-doped Titanium Dioxide Nanoparticle Development for Additives in Surface Coated Solutions, Master of Science in Applied Chemistry, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)]
- [28] เกียรติกร ทองลิ้ม, สิริลักษณ์ เจียรารกร และประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล. 2558. ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของฟิล์มกรองแสงเคลือบด้วยฟิล์มไททาเนียและเงิน. การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 34 มหาวิทยาลัยขอนแก่น วันที่ 27 มีนาคม 2558 คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 165-171. [Kriangkrai Thonglim, Siriluk Chiarakorn and Prapat Pongkiatkul. 2015. Photocatalytic Reaction of Light Filter Film Coated by Silver doped Titania. Proceedings of 34th National Graduate Research Conference, Faculty of Medicine, Khon Kaen University March 27, 165-171. (in Thai)]
- [29] Ajmal, A., Majeed, I., Malik, R. N., Idriss, H. and Nadeem, M. A. 2014. Principles and mechanisms of photocatalytic dye degradation on TiO₂ based photocatalysts: a comparative overview. *RSC Advances*, 4, 37003–37026, <https://doi.org/10.1039/C4RA06658H>.

การวิเคราะห์ปัจจัยในทฤษฎีรวมของการยอมรับและการใช้เทคโนโลยี รุ่น 2 :
อิทธิพลการกำกับ การยอมรับและการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ
Factors Analysis of Unified Theory of Acceptance and Use of
Technology Version 2: Influence on the Regulation of Acceptance
and Use of Vending Machines

อภิญา อิงอาจ^{1*} และ สุพจน์ อิงอาจ²

Apinya Ingard^{1*} and Supot Ingard²

¹สาขาเทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อธุรกิจ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นนทบุรี ประเทศไทย

²ภาควิชาเทคโนโลยีการศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพฯ ประเทศไทย

¹Digital Technology for Business, Faculty of Information and Communication Technology,
Silpakorn University, Nonthaburi, Thailand

²Educational Technology Department, Faculty of Education, Ramkhamhaeng University, Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 3 สิงหาคม 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 23 ธันวาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 23 ธันวาคม 2567

Received: 3 August 2023, Revised: 23 December 2024, Accepted: 23 December 2024

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์งานวิจัยนี้เพื่อ 1) พัฒนาแบบวัดการยอมรับและการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติให้
เป็นไปตามมาตรฐาน 2) ศึกษาอิทธิพลของการยอมรับที่มีต่อการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ และ 3) ศึกษา
บทบาทของตัวแปรกำกับที่มีผลต่อระดับอิทธิพลของการยอมรับที่มีต่อการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ โดยมี
ตัวแปรกำกับ คือ เพศ อายุ และประสบการณ์ โดยศึกษากับ 406 หน่วยตัวอย่างที่มีประสบการณ์การใช้งาน
ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติไม่น้อยกว่า 2 ครั้งใน 1 เดือนที่ผ่านมา ในพื้นที่ให้บริการในเขตกรุงเทพมหานครและ
ปริมณฑล ด้วยการเลือกตัวอย่างแบบโควตา โดยใช้แบบสอบถามที่ผ่านการประเมินความตรงเชิงเนื้อหาทั้ง
รายข้อและรายฉบับ และค่าความเชื่อมั่นด้วยค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค วิเคราะห์ข้อมูลในเชิง
สถิติ ได้แก่ วิธีการ Mahalanobis d-Square วิธีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนที่สกัดได้กับ
การแบ่งปันความแปรปรวน การพัฒนาแบบจำลองสมการโครงสร้าง และวิเคราะห์กลุ่มพหุ ผลการวิจัย
พบว่า 1) แบบวัดที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีรวมของการยอมรับและการใช้เทคโนโลยี รุ่น 2 และผ่านเกณฑ์การ
ประเมินมาตรฐานด้านความตรง 2) ความคาดหวังในประสิทธิภาพ อิทธิพลของสังคม แรงจูงใจด้านอารมณ์
ความรู้สึกราคา และความเคยชินเป็นปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อความตั้งใจที่จะใช้งาน อีกทั้งความเคย
ชินและความตั้งใจที่จะใช้งานก็มีผลโดยตรงต่อการใช้งาน และ 3) เพศและอายุเป็นตัวแปรกำกับอิทธิพล
จำนวน 2 เส้นทาง และประสบการณ์เป็นตัวแปรกำกับอิทธิพลจำนวน 3 เส้นทาง

คำสำคัญ : ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ ความตรงเชิงโครงสร้าง ความตรงเชิงจำแนก ตัวแปรกำกับ การยอมรับเทคโนโลยี

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: apinya.i@hotmail.com

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.259934>

Abstract

The aims of research were 1) to develop a measure of acceptance and use of vending machines to meet the standard criteria, 2) to study the influence of acceptance on vending machines usage, and 3) to study the influence of moderator variables affecting acceptance on vending machines usage: gender, age, and experience. The study was conducted on 406 subjects who had used vending machines no less than twice in the past month, which serving the Bangkok and vicinity areas and derived by quota sampling method. A questionnaire was assessed for content validity index, both Item and Scale level method, and reliability by the Cronbach Alpha coefficient. Data were analyzed statistically, namely Mahalanobis d-Square, comparison of the average variance extracted with the shared variance, structural equation modeling, and multi-group analysis. The results reviewed that 1) the measurement instrument was met with the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology; version 2 and passed the criteria for assessing validity. 2) Factors directly influencing behavior intention with statistical significance include effort expectancy, social influence, hedonic motivation, price value, and habit. Moreover, the factors directly influencing the use behavior were statistically significant, namely, habit and behavior intention, and 3) gender, and age were the variable moderate influence for 2 routes, and experience was the variable moderate influencing for 3 paths.

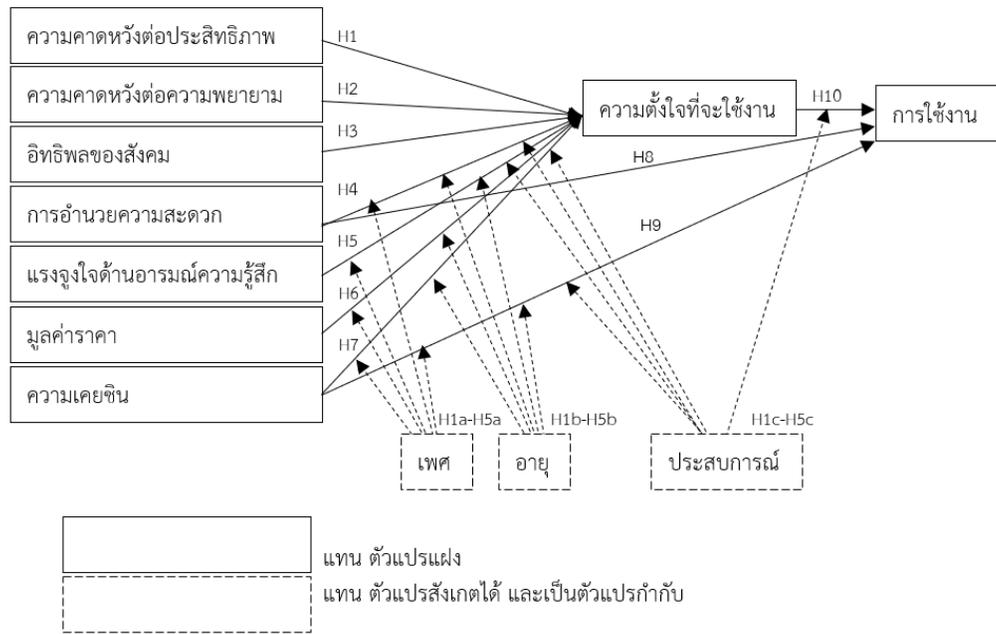
Keywords: Vending machines, Construct validity, Discriminant validity, Moderator variable, Technology acceptance

1. บทนำ

การอธิบายถึงเหตุและผลของการยอมรับการใช้เทคโนโลยี (Technology acceptance) ของมนุษย์ ได้มีนักวิชาการนำแนวคิดหรือทฤษฎีหลาย ๆ ทฤษฎีมาอธิบายถึงการยอมรับเทคโนโลยีใหม่ของมนุษย์ ซึ่งล้วนเป็นทฤษฎีที่ผ่านการพิสูจน์เพื่ออธิบายและศึกษาถึงพฤติกรรมมนุษย์ในลักษณะของความเป็นสาเหตุ และความเป็นผล แต่ละทฤษฎีมักจะมีปัจจัยหลักที่แสดงให้เห็นถึงสิ่งกำหนดที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อการเกิดการยอมรับและใช้งานเทคโนโลยี ทฤษฎีเหล่านี้ ได้แก่ 1) แบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี (Technology Acceptance Model: TAM) [1] 2) แบบจำลองการใช้ประโยชน์เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Model of PC Utilization: MPCU) [2] 3) ทฤษฎีการกระจายนวัตกรรม (Diffusion of Innovation theory: DOI) [3] 4) ทฤษฎีรวมระหว่าง TAM และ Theory of Planned Behavior (TPB) หรือเรียกว่า A Model Combining the Technology Acceptance Model and the Theory of Planned Behavior (C-TAM-TPB) [4] และ 5) ทฤษฎีรวมของการยอมรับและใช้งานเทคโนโลยี (Unified Theory of Acceptance and Use of Technology: UTAUT) [5] ทั้งนี้ทฤษฎีของ Venkatesh และคณะ

[5] เป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายปัจจัยหลัก 4 ตัวที่มีผลโดยตรงต่อความตั้งใจแสดงพฤติกรรมยอมรับ ได้แก่ ความคาดหวังในประสิทธิภาพ (Performance expectancy) ความคาดหวังในความพยายาม (Effort expectancy) อิทธิพลของสังคม (Social influence) และสิ่งอำนวยความสะดวก (Facilitating conditions) โดยมีปัจจัยส่วนบุคคลเป็นตัวแปรกำกับ ซึ่งต่อมา Venkatesh และคณะ [6] ได้ขยายขอบเขตของปัจจัยหลักเพิ่มขึ้นอีก 3 ปัจจัย เพื่อใช้อธิบายความตั้งใจทางพฤติกรรมและการใช้งานเทคโนโลยีอย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก (Hedonic motivation) มูลค่าราคา (Price value) และความเคยชิน (Habit) จึงทำให้ทฤษฎีของ Venkatesh และคณะ [6] ถูกเรียกเป็นทฤษฎีรวมของการยอมรับและการใช้เทคโนโลยี รุ่น 2 (UTAUT2) ที่ประกอบด้วยปัจจัยหลัก 7 ตัว ความตั้งใจเชิงพฤติกรรมเป็นตัวแปรต้นกลาง 1 ตัว และมีการใช้งานเทคโนโลยีเป็นตัวแปรผลลัพธ์จำนวน 1 ตัว โดยมีตัวแปรกำกับ ได้แก่ เพศ อายุ และประสบการณ์ของแต่ละบุคคลหรือองค์การ ซึ่งแบบจำลองทฤษฎี UTAUT2 ได้ถูกหยิบมาใช้ในงานวิจัยหลายงานเพื่ออธิบายความตั้งใจและพฤติกรรมการใช้เทคโนโลยีในบริบทที่แตกต่างกันของผู้บริโภค ซึ่งจะทำให้การอธิบายการเกิดความตั้งใจเชิงพฤติกรรมและการใช้งานเทคโนโลยีได้ครอบคลุมกว้างขวาง และกลุ่มเล็ก ดังเช่น งานวิจัยของ Chang และคณะ [7] ได้ใช้ทฤษฎี UTAUT2 ในการอธิบายการใช้งานระบบออนไลน์สำหรับการจองโรงแรม ต่อมา Arista และ Abbas [8] ใช้ทฤษฎี UTAUT2 ในบริบทของการยอมรับระบบประเมินผลการปฏิบัติงานของครู นอกจากนี้ Mishra และคณะ [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการยอมรับของโซเซียลมีเดียของนักศึกษาระดับอุดมศึกษา ทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Farsi [10] ที่ศึกษาการยอมรับของนักเรียนในการใช้เทคโนโลยีเสมือนจริง และในปีเดียวกัน Sharma [11] ได้ศึกษาวิจัยการยอมรับนวัตกรรมการจ่ายเงินด้วยโทรศัพท์มือถือผ่านแอปพลิเคชันของธนาคารของกลุ่มมิลเลนเนียล

ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (Vending machines) เป็นเทคโนโลยีที่ธุรกิจนำเข้ามาให้บริการเพื่อตอบสนองพฤติกรรมของผู้บริโภค และถือเป็นเครื่องมือในการสร้างยอดขายแบบใหม่ที่สามารถกระจายสินค้าได้รวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นการลดจำนวนพนักงานขายทำให้ต้นทุนของธุรกิจลดลงได้ แต่ต้องมีการคัดสรรเทคโนโลยีที่ทันสมัยที่สามารถตอบโจทย์ต่อความต้องการและพฤติกรรมของผู้บริโภคได้ จึงจะทำให้สามารถครองใจผู้บริโภคได้ดี ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติสามารถให้บริการได้ตลอดทั้งกลางวันและกลางคืน และลดการให้บริการของพนักงานขายซึ่งถือเป็นเทคโนโลยีบริการตนเอง (Self service) ทั้งนี้หากพิจารณาคุณลักษณะที่สำคัญของตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญก็จะสอดคล้องกับแนวคิด ทฤษฎีของการยอมรับเทคโนโลยีของ Venkatesh และคณะ [6] หรือ UTAUT2 ด้วยเหตุดังกล่าวจึงเป็นส่วนสำคัญที่ผู้วิจัยสนใจที่จะพัฒนาแบบวัดตัวแปรที่อยู่ในแบบจำลอง UTAUT2 ให้ได้ความตรงตามมาตรฐาน เพื่อใช้อธิบายเหตุและผลของการยอมรับเทคโนโลยีตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ ตลอดจนศึกษาอิทธิพลของตัวแปรเพศ อายุ และประสบการณ์การใช้งานว่ามีบทบาทเป็นตัวแปรกำกับอิทธิพลได้หรือไม่อย่างไร ซึ่งการทำให้ผลการวิจัยเกิดความตรงได้ดีจำเป็นต้องพัฒนาแบบวัดให้ได้มาตรฐานเป็นลำดับแรก ก่อนศึกษาอิทธิพลของตัวแปรตามแบบจำลองการวิจัย ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. แบบจำลองการวิจัย

แบบจำลองการวิจัยดังรูปที่ 1 เป็นการใช้ทฤษฎี UTAUT2 เพื่ออธิบายเหตุและผลของการยอมรับเทคโนโลยีดิจิทัลของอัตโนมัติของผู้ใช้งาน โดย Venkatesh และคณะ [6] พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความตั้งใจที่จะแสดงพฤติกรรม (Behavioral Intention) มีทั้งหมด 7 ปัจจัย ดังนี้ 1) ความคาดหวังต่อประสิทธิภาพ 2) ความคาดหวังในความพยายาม 3) อิทธิพลทางสังคม 4) การอำนวยความสะดวกในการใช้งาน 5) แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก 6) มูลค่าราคา และ 7) ความเคยชิน และตัวแปรการอำนวยความสะดวกและความเคยชินร่วมกับความตั้งใจที่จะแสดงพฤติกรรมเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิดการใช้งาน (Use behavior) โดยมีตัวแปรเพศ อายุ และประสบการณ์เป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างความตั้งใจที่จะแสดงพฤติกรรมกับการใช้งาน และปัจจัยภายนอกประกอบด้วยสิ่งอำนวยความสะดวกในการใช้งาน แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก มูลค่าราคา และความเคยชิน

โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ทฤษฎี UTAUT2 นอกเหนือจากงานวิจัย [7] - [11] ที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้วนั้น ยังมีที่น่าสนใจอีกหลายผลงาน ดังเช่น Hammouri และคณะ [12] ได้มีการขยายทฤษฎี UTAUT2 เพื่อตรวจสอบปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจของผู้ใช้ในการยอมรับ E-wallets ในประเทศจอร์แดน งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงปริมาณที่เก็บข้อมูลจากแบบสอบถามจำนวน 32 ข้อและมีผู้ตอบแบบสอบถามจำนวน 181 คน ผลการวิจัยพบว่ามูลค่าราคา แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก อิทธิพลทางสังคม ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ และการรับรู้ความไว้วางใจ เป็นตัวพยากรณ์หลักถึงความตั้งใจของผู้ใช้งาน E-wallets ในทางตรงกันข้าม การอำนวยความสะดวกและความคาดหวังของความพยายามไม่มีนัยสำคัญต่อกระบวนการใช้ E-wallets และ Ciftci และคณะ [13] ได้ทำวิจัยโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้และการยอมรับระบบการศึกษาทางไกลในช่วงการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ใน

ประเทศตุรกี ซึ่งผลการศึกษานี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีคุณค่าเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับ และการใช้ระบบการศึกษาทางไกลที่กลายเป็นสื่อการสอนที่สำคัญมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563 มีนักศึกษาแพทย์จำนวน 708 คนอาสาเข้าร่วมในการศึกษาครั้งนี้ ข้อมูลถูกรวบรวมด้วยมาตราส่วนที่ถูกพัฒนาตามแบบจำลอง UTAUT2 จำนวน 25 ข้อคำถามและแบบสอบถามมี 7 มิติ ตามแนวคิดและทฤษฎี UTAUT2 ผลการวิจัยระบุว่าความคาดหวังในการประสิทธิภาพ ความคาดหวังในความพยายาม อิทธิพลทางสังคม แรงจูงใจด้านอารมณ์ ความรู้สึก ความเคยชิน การอำนวยความสะดวก และความตั้งใจด้านพฤติกรรม ล้วนส่งผลเชิงบวกต่อนักศึกษาแพทย์ที่ใช้ระบบการศึกษาทางไกล

จากที่กล่าวมาจึงนำมาสู่สมมติฐานการวิจัยในครั้งนี้และเพื่อให้เข้าใจได้ตรงกัน ผู้วิจัยจึงกำหนดอักษรย่อแทนชื่อตัวแปร ดังต่อไปนี้

ตัวแปร	อักษรย่อ	ตัวแปร	อักษรย่อ
ความคาดหวังต่อประสิทธิภาพ	PREX	ความเคยชิน	HABI
ความคาดหวังต่อความพยายาม	EFEX	ความตั้งใจใช้งาน	BEIN
อิทธิพลของสังคม	SOIN	การใช้งาน	USBE
การอำนวยความสะดวก	FACO	เพศ	SEX
แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก	HEMO	อายุ	AGE
มูลค่าราคา	PRVR	ประสบการณ์	EXP

โดยมีสมมติฐานการวิจัย ดังนี้

- H1: ความคาดหวังต่อประสิทธิภาพส่งผลต่อความตั้งใจใช้งานของผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (PREX → BEIN)
- H2: ความคาดหวังต่อความพยายามส่งผลต่อความตั้งใจใช้งานของผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (EFEX → BEIN)
- H3: อิทธิพลของสังคมส่งผลต่อความตั้งใจใช้งานของผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (SOIN → BEIN)
- H4: การอำนวยความสะดวกส่งผลต่อความตั้งใจใช้งานของผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (FACO → BEIN)
- H5: แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึกส่งผลต่อความตั้งใจใช้งานของผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (HEMO → BEIN)
- H6: มูลค่าราคาส่งผลต่อความตั้งใจใช้งานของผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (PRVR → BEIN)
- H7: ความเคยชินส่งผลต่อความตั้งใจใช้งานของผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (HABI → BEIN)
- H8: การอำนวยความสะดวกส่งผลต่อการใช้งานของผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (FACO → USBE)
- H9: ความเคยชินส่งผลต่อการใช้งานของผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (HABI → USBE)
- H10: ความตั้งใจใช้งานส่งผลต่อการใช้งานของผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (BEIN → USBE)
- H1a: เพศเป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างการอำนวยความสะดวกและความตั้งใจใช้งาน
- H2a: เพศเป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างแรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึกและความตั้งใจใช้งาน
- H3a: เพศเป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างมูลค่าราคาและความตั้งใจใช้งาน
- H4a: เพศเป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างความเคยชินและความตั้งใจใช้งาน
- H5a: เพศเป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างความเคยชินและการใช้งาน
- H1b: อายุเป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างการอำนวยความสะดวกและความตั้งใจใช้งาน
- H2b: อายุเป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างแรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึกและความตั้งใจใช้งาน
- H3b: อายุเป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างมูลค่าราคาและความตั้งใจใช้งาน

- H4b: อายุเป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างความเคยชินและความตั้งใจใช้งาน
H5b: อายุเป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างความเคยชินและการใช้งาน
H1c: ประสบการณ์เป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างการอ่านยความสะดวกและความตั้งใจใช้งาน
H2c: ประสบการณ์เป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างแรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึกและความตั้งใจใช้งาน
H3c: ประสบการณ์เป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างมูลค่าราคาและความตั้งใจใช้งาน
H4c: ประสบการณ์เป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างความเคยชินและความตั้งใจใช้งาน
H5c: ประสบการณ์เป็นตัวกำกับอิทธิพลระหว่างความเคยชินและการใช้งาน

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อพัฒนาแบบวัดการยอมรับและการใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการยอมรับที่มีต่อการใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ
- 3) เพื่อศึกษาบทบาทของตัวแปรกำกับที่มีผลต่อระดับอิทธิพลของการยอมรับที่มีต่อการใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ โดยมีตัวแปรกำกับ คือ เพศ อายุ และประสบการณ์

2.2 ประชากรและตัวอย่าง

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ประชากรประกอบด้วยผู้ใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติที่วางให้บริการกระจายในสถานที่ต่าง ๆ ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งเป็นประชากรไม่จำกัด และงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling: SEM) ที่มีโปรแกรมช่วยนักวิจัยในการกำหนดจำนวนตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย SEM (Soper, 2022 อ้างใน [14]) ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยกำหนด 1) ขนาดผลกระทบที่คาดหวัง (Anticipated effect size) ในระดับปานกลาง คือ 0.30 2) อำนาจการทดสอบทางสถิติที่ต้องการ (Desired Statistical power) ซึ่งควรกำหนดไม่น้อยกว่า 0.80 สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยกำหนดที่ 0.90 3) จำนวนตัวแปรแฝง (Number of latent variables) ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรแฝงจำนวน 9 ตัว 4) จำนวนตัวแปรสังเกตได้ (Number of observed variables) ในงานวิจัยนี้มีจำนวน 29 ตัวแปรสังเกตได้ และ 5) ระดับนัยสำคัญทางสถิติหรือ Type I error (Probability level) เท่ากับ 0.001 ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวเป็นไปตามหลักการทดสอบแบบจำลองการวิจัยด้วยสถิติ SEM ผลที่ได้รับการแนะนำจากโปรแกรม คือ อย่างน้อยควรใช้ 337 หน่วยตัวอย่าง หลังจากนั้นผู้วิจัยจึงวางแผนการเลือกตัวอย่างโดยใช้วิธีการเลือกตัวอย่างตามโควตา (Quota sampling) โดยใช้เพศ อายุ และประสบการณ์การใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติเป็นสิ่งที่กำหนดโควตา

2.3 เครื่องมือการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามชนิดปลายปิด โดยจำแนกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลส่วนบุคคล เป็นคำถามแบบเลือกตอบ ส่วนที่ 2 ปัจจัยการยอมรับเทคโนโลยีจำนวนทั้งหมด 21 คำถาม จำแนกเป็น 7 ปัจจัยย่อย คือ ความคาดหวังต่อประสิทธิภาพ ความคาดหวังต่อความ

พยายาม อิทธิพลของสังคม เงื่อนไขการอำนวยความสะดวก แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก มูลค่าราคา และความเคยชิน โดยมีคำถาม 3 ข้อในแต่ละปัจจัยย่อย ส่วนที่ 3 ความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ มีคำถาม 4 ข้อ และส่วนที่ 4 การใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ มีคำถาม 4 ข้อ ทั้งนี้ทุกคำถามในส่วนที่ 2 – 4 เป็นแบบมาตราประมาณค่า 5 ระดับ โดยให้ 1 คือ น้อยที่สุด ถึง 5 คือ มากที่สุด โดยคำถามทุกข้อได้ผ่านการประเมินด้วยดัชนีความตรงตามเนื้อหา (Content Validity Index: CVI) จากผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาและด้านวิจัยจำนวน 5 คน ซึ่งผลการประเมินของคำถามทุกข้อมีค่าความตรงระดับข้อคำถาม (I-CVI) และค่าความตรงระดับแบบวัดทั้งฉบับ (S-CVI) มีค่าเท่ากับ 1.00 สะท้อนว่าเป็นคำถามที่มีความตรง [15] และนำไปทดลองใช้กับ 30 หน่วยตัวอย่าง เพื่อให้ได้ข้อมูลมาวิเคราะห์ความเชื่อมั่น โดยใช้วิธีการประเมินความเชื่อมั่นจากความสอดคล้องภายใน (Internal consistency) ด้วยสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha coefficients) ผลพบว่า ความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม มีค่าอยู่ในช่วง 0.749 – 0.928 บ่งชี้ว่าเป็นแบบสอบถามมีความสอดคล้องภายในที่เหมาะสม เนื่องจากมีค่าความเชื่อมั่นมากกว่า 0.70 [16]

2.4 เทคนิคการวิเคราะห์เชิงสถิติ

สถิติวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย 1) สถิติตรวจสอบค่าผิดปกติด้วยวิธีการ Mahalanobis d-Square 2) การวิเคราะห์ความตรงเชิงโครงสร้าง (Construct validity) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis: CFA) 3) การวิเคราะห์ความตรงเชิงจำแนก (Discriminant validity) ด้วยเกณฑ์ของ Fornell และ Larcker [17] 4) การทดสอบอิทธิพลทางตรง (Direct effect testing) ด้วยการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้าง (Structural Model: SM) และ 5) การทดสอบอิทธิพลของตัวแปรกำกับ (Moderator effect) ด้วยวิธี Multi-group และในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับบันทึกข้อมูล และโปรแกรม IBM SPSS AMOS v.28 สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ทั้งนี้การวิเคราะห์ CFA และ SM จะต้องเป็นไปตามดัชนีวัดความกลมกลืนดังนี้ $\text{Chi-square/df} \leq 3.00$, Comparative Fit Index (CFI) ≥ 0.90 , Tucker and Lewis Index (TLI) ≥ 0.90 , Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA) ≤ 0.08 และ Root Mean Square Residual (RMR) ≤ 0.05 [18] - [21] จึงจะบ่งชี้ว่าแบบจำลองเข้ากันดีกับข้อมูลเชิงประจักษ์

สำหรับการกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) ที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานการวิจัยในงานวิจัยนี้ กำหนดใช้ 3 ระดับ คือ 0.050, 0.010 และ 0.001 ทั้งนี้เนื่องจากในการคำนวณจำนวนตัวอย่างดังที่กล่าวแล้วก่อนหน้านี้ได้กำหนด Type I error หรือ Probability level ที่ 0.001 หากแต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปนักวิจัยมักกำหนดที่ระดับ 0.050 ซึ่งเป็นระดับปกติที่จะมีโอกาส 5% ที่จะเกิด Type I error และ Type I error จะลดลงเหลือ 1.000% และ 0.100% ถ้าหากกำหนดที่ระดับ 0.010 และ 0.001 ตามลำดับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดเกณฑ์การสรุปผลการทดสอบสมมติฐานการวิจัย 3 ระดับ คือ 1) p-value < 0.050 , 2) p-value < 0.01 และ 3) p-value < 0.001

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลการทดลอง

ข้อมูลจาก 427 หน่วยตัวอย่างที่เคยมีประสบการณ์การใช้ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมาไม่น้อยกว่า 2 ครั้ง ใน 1 เดือนที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้นำมาหาค่าผิดปกติด้วยวิธีการ Mahalanobis d-Square พบว่ามี 21 รายที่มีค่า Mahalanobis d-Square ต่างจากค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลทั้งหมด (Centroid) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 ผู้วิจัยจึงตัดหน่วยตัวอย่างเหล่านั้นออก จึงเหลือข้อมูลจำนวน 406 หน่วยตัวอย่างสำหรับใช้เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งเป็นจำนวนที่ได้ไม่น้อยกว่า 337 หน่วยตัวอย่างดังที่กำหนดในแผนการเลือกตัวอย่าง จึงนำมาวิเคราะห์ ดังนี้

1) ผลการพัฒนาแบบวัดการยอมรับและการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ ดังตารางที่ 1 – ตารางที่ 2

ตารางที่ 1. ความตรงเชิงโครงสร้างของตัวแปรแฝงภายนอกในแบบจำลองการวิจัย (n = 406)

ตัวแปรแฝงภายนอกและตัวแปรสังเกตได้	λ	R ²	CR	AVE
ความคาดหวังในประสิทธิภาพ (PREX)	-	-	0.851	0.659
ระบบของตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมีความเสถียร (PREX1)	0.653	0.426	-	-
ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติทำงานได้รวดเร็ว (PREX2)	0.883***	0.780	-	-
ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติให้บริการได้ถูกต้อง (PREX3)	0.878***	0.771	-	-
ความคาดหวังในความพยายาม (EFEX)	-	-	0.851	0.657
ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติขั้นตอนการใช้งานไม่ซับซ้อน (EFEX1)	0.829	0.687	-	-
ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมีช่องทางการชำระเงินหลากหลาย (EFEX2)	0.854***	0.729	-	-
ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติสามารถใช้งานได้ด้วยตัวท่านเอง (EFEX3)	0.745***	0.555	-	-
อิทธิพลของสังคม (SOIN)	-	-	0.848	0.677
ท่านใช้บริการตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติเนื่องจากเห็นจากสื่อ (SOIN1)	0.381	0.145	-	-
ท่านใช้บริการตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติตามบุคคลที่ท่านรู้จัก (SOIN2)	0.987***	0.974	-	-
ท่านใช้บริการตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติเพราะมีบุคคลแนะนำ (SOIN3)	0.955***	0.912	-	-
เงื่อนไขการอำนวยความสะดวก (FACO)	-	-	0.860	0.672
การใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติเรียบง่าย (FACO1)	0.854	0.729	-	-
ฟังก์ชันการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติใช้ได้โดยสะดวก (FACO2)	0.811***	0.658	-	-
การชำระค่าสินค้า/บริการทำได้อย่างสะดวก (FACO3)	0.793***	0.629	-	-
แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก (HEMO)	-	-	0.884	0.719
ท่านเพลิดเพลินต่อการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (HEMO1)	0.896	0.803	-	-
ท่านสนุกในการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (HEMO2)	0.873***	0.762	-	-
ท่านสนุกที่ได้ใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติที่ออกแบบใหม่ ๆ (HEMO3)	0.769***	0.591	-	-
มูลค่าราคา (PRVA)	-	-	0.901	0.752
สินค้าจากตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมีความคุ้มค่า (PRVA1)	0.859	0.738	-	-
สินค้าจากตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมีคุณภาพเหมาะสมราคา (PRVA2)	0.919***	0.845	-	-
ความคุ้มค่าของมูลค่าราคาของสินค้า (PRVA3)	0.820***	0.672	-	-
ความเคยชิน (HABI)	-	-	0.753	0.522
ท่านคุ้นเคยกับการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (HABI1)	0.438	0.192	-	-
ท่านใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติเป็นประจำ (HABI2)	0.878***	0.771	-	-
ทุกครั้งที่จะซื้อสินค้า ท่านมักนึกถึงตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (HABI3)	0.776***	0.602	-	-

Chi-square/df. \leq 2.165, CFI. \geq 0.963, TLI \geq 0.953, RMSEA \leq 0.054, RMR \leq 0.047, ***p-value $<$ 0.001

ผลการประเมินความตรงเชิงโครงสร้างของตัวแปรแฝงภายนอกในแบบจำลองการวิจัย ได้แก่ ความคาดหวังในประสิทธิภาพ ความคาดหวังในความพยายาม อิทธิพลของสังคม เงื่อนไขการอำนวยความสะดวก แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก มูลค่าราคา และความเคยชิน พบว่า ทุกตัวแปรดังกล่าวกลมกลืนกันดีกับข้อมูลเชิงประจักษ์โดยไม่ต้องปรับแต่งแบบจำลองตามเกณฑ์ดัชนีที่ใช้วัดความกลมกลืน [18] - [21] และผลการประเมินความตรงเชิงโครงสร้างตามแนวทางของ Hair และคณะ [22] ที่ใช้ 4 เกณฑ์สำหรับการพิจารณา ได้แก่ 1) น้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐาน (λ) > 0.70 และมีนัยสำคัญทางสถิติ 2) สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของตัวแปรสังเกตได้ (R^2) > 0.50 3) ความเชื่อมั่นเชิงองค์ประกอบ (Composite Reliability: CR) > 0.70 และ 4) ความแปรปรวนโดยเฉลี่ยที่สกัดได้ (Average Variance Extracted: AVE) > 0.50 แต่ทั้งนี้ถ้าหากมีตัวบ่งชี้ใดมีผลไม่ผ่านตามเกณฑ์ตามข้อ 1) และ 2) ให้พิจารณาต่อไปว่าผ่านเกณฑ์ข้อ 3) และ 4) หรือไม่ ถ้าผ่านเกณฑ์ข้อ 3) และ 4) ก็แสดงว่าตัวแปรสังเกตได้นั้นสามารถใช้วัดตัวแปรแฝงนั้นได้และตัวแปรแฝงนั้น มีความตรงเชิงโครงสร้าง

ดังนั้นเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ดังกล่าวแล้วพบว่า ตัวบ่งชี้ที่ใช้วัดตัวแปรแฝงภายนอกในแบบจำลองการวิจัยทั้งหมดสามารถใช้อัดตัวแปรแฝงนั้น ๆ ได้ และตัวแปรแฝงภายนอกทั้ง 7 ตัว ได้แก่ ความคาดหวังในประสิทธิภาพ ความคาดหวังในความพยายาม อิทธิพลของสังคม เงื่อนไขการอำนวยความสะดวก แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก มูลค่าราคา และความเคยชินมีความตรงเชิงโครงสร้างซึ่งมีความหมายว่า ตัวแปรสังเกตได้ที่ใช้วัดลักษณะของตัวแปรแต่ละตัวสามารถใช้อัดตัวแปรนั้น ๆ ได้ตรงตามที่ต้องการศึกษา

ตารางที่ 2. ความตรงเชิงโครงสร้างของตัวแปรแฝงภายในของแบบจำลองการวิจัย (n = 406)

ตัวแปรแฝงภายใน : ความตั้งใจที่จะใช้งาน	λ	R^2	CR	AVE
ความตั้งใจที่จะใช้งาน (BEIN)	-	-	0.874	0.635
ท่านจะใช้บริการตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติต่อไปในอนาคต (BEIN1)	0.687	0.472	-	-
ท่านจะซื้อสินค้าทุกครั้งจากตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (BEIN2)	0.873***	0.762	-	-
ท่านยินดีจะซื้อสินค้าจากตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (BEIN3)	0.855***	0.731	-	-
ท่านจะซื้อสินค้าทุกโอกาสจากตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (BEIN4)	0.759***	0.576	-	-
Chi-square/df. \leq 0.708, CFI. \geq 1.00, TLI \geq 1.002, RMSEA \leq 0.000, และ RMR \leq 0.007, ***p-value < 0.001				
ตัวแปรแฝงภายใน : การใช้งาน	λ	R^2	CR	AVE
การใช้งาน (USBE)	-	-	0.848	0.584
ท่านซื้อสินค้าจากตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (USBE1)	0.846	0.716	-	-
ท่านแนะนำผู้อื่นให้ซื้อสินค้าจากตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (USBE2)	0.702***	0.493	-	-
ท่านซื้อสินค้าทุกครั้งจากตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ (USBE3)	0.679***	0.461	-	-
ท่านบอกประโยชน์ของตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติกับผู้อื่น (USBE4)	0.816***	0.666	-	-
Chi-square /df. \leq 1.414, CFI. \geq 0.999, TLI \geq 0.996, RMSEA \leq 0.032, RMR \leq 0.014, ***p-value < 0.001				

ผลดังตารางที่ 2 แสดงให้เห็นผลว่า ตัวแปรแฝงภายใน ได้แก่ ความตั้งใจที่จะใช้งาน และ การใช้งาน มีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์โดยไม่ต้องปรับแต่งแบบจำลอง [18] - [21] นอกจากนี้ ผลการประเมินความตรงเชิงโครงสร้างตามแนวทางของ Hair และคณะ [22] ที่บ่งชี้ว่า ตัวแปรสังเกตได้ที่ใช้วัดลักษณะของตัวแปรแต่ละตัวสามารถใช้อัดตัวแปรนั้น ๆ ได้ตรงตามที่ต้องการศึกษา

ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 1 - ตารางที่ 2 พบว่าทุกตัวแปรแฝงมีลักษณะตรงกับเกณฑ์การประเมินความตรงเชิงโครงสร้าง จึงสรุปได้ว่าทุกตัวแปรแฝงได้รับการอธิบายจากตัวแปรสังเกตได้ที่ใช้วัดตัวแปรแฝงแต่ละตัวได้เหมาะสม [22] หรือกล่าวได้ว่าแบบวัดการยอมรับและการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติที่ประกอบด้วย ตัวแปรแฝงภายนอก 7 ตัว และตัวแปรแฝงภายในจำนวน 2 ตัวเป็นแบบวัดที่ใช้วัดตัวแปรในแบบจำลองการวิจัยได้ตรงและมีความสอดคล้องภายในเป็นไปตามเกณฑ์ดังกล่าว

ตารางที่ 3. ความตรงเชิงจำแนกของตัวแปรแฝงภายนอกในแบบจำลองการวิจัย (n = 406)

ตัวแปรภายนอก	CR	AVE	PREX	EFEX	SOIN	FACO	HEMO	PRVA	HABI
PREX	0.851	0.659	0.812	-	-	-	-	-	-
EFEX	0.851	0.657	0.410	0.811	-	-	-	-	-
SOIN	0.848	0.677	-0.032	-0.235	0.823	-	-	-	-
FACO	0.860	0.672	0.562	0.777	-0.258	0.820	-	-	-
HEMO	0.884	0.719	0.287	0.228	0.189	0.301	0.848	-	-
PRVA	0.901	0.752	0.393	0.24	0.062	0.308	0.315	0.867	-
HABI	0.753	0.522	0.434	0.679	-0.178	0.710	0.291	0.348	0.722

การประเมินความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแฝง ว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมหรือไม่ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแฝงควรที่จะสัมพันธ์กันในระดับไม่สูงเกินไปจนก่อให้เกิดปัญหาภาวะร่วมสัมพันธ์กันสูงหรือ ปัญหา Multi-collinearity ทั้งนี้การประเมินความตรงเชิงจำแนกด้วยวิธีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนที่สกัดได้กับการแบ่งปันความแปรปรวน (Average Variance Extracted vs Shared variance: AVE-SV) [17] โดยพิจารณาว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแฝงแต่ละคู่ต้องมีค่าต่ำกว่าค่ารากที่สองของ AVE ของตัวแปรแฝงคู่หนึ่ง ๆ ซึ่งผลการประเมินเป็นดังตารางที่ 3 ที่พบว่าเป็นไปตามเกณฑ์ของ Fornell และ Larcker [17] จึงสรุปได้ว่า ตัวแปรแฝงภายนอกทั้งหมดมีความตรงเชิงจำแนกต่อกัน เป็นการสะท้อนว่า แบบวัดที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นแบบวัดมาตรฐานที่ทำให้ได้ข้อมูลที่จะสามารถอธิบายผลลัพธ์ที่ได้มีความชัดเจนไม่คลุมเคลือและจะก่อให้เกิดความตรงได้สูง

2) ผลการศึกษาอิทธิพลของการยอมรับที่มีต่อการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ

หลังการประเมินความตรงเชิงโครงสร้างและความตรงเชิงจำแนกของตัวแปรแฝงในแบบจำลองการวิจัยให้เป็นไปตามเกณฑ์แล้ว ผู้วิจัยจึงทดสอบสมมติฐานการวิจัย โดยเฉพาะ การทดสอบอิทธิพลทางตรงดังนี้

ตารางที่ 4. ผลการทดสอบอิทธิพลทางตรง (n = 406)

Hypothesis	Unstandardized		Standardized	t-test	p-value	Results
	b	SE.	β			
1.PREX → BEIN	0.126	0.061	0.124	2.072	0.038*	สนับสนุน
2.EFEX → BEIN	-0.192	0.098	-0.175	-1.950	0.051	ไม่สนับสนุน
3.SOIN → BEIN	0.167	0.056	0.150	3.000	0.003**	สนับสนุน
4.FACO → BEIN	0.065	0.116	0.059	0.566	0.571	ไม่สนับสนุน
5.HEMO → BEIN	0.128	0.032	0.206	4.021	0.000***	สนับสนุน
6.PRVA → BEIN	0.287	0.041	0.387	6.946	0.000***	สนับสนุน
7.HABI → BEIN	0.315	0.107	0.255	2.937	0.003**	สนับสนุน
8.FACO → USBE	-0.104	0.094	-0.065	-1.108	0.268	ไม่สนับสนุน
9.HABI → USBE	0.623	0.131	0.351	4.758	0.000***	สนับสนุน
10.BEIN → USBE	1.067	0.084	0.742	12.633	0.000***	สนับสนุน

Chi-square/df. ≤ 2.415, CFI. ≥ 0.936, TLI ≥ 0.924, RMSEA ≤ 0.060, RMR ≤ 0.046

หมายเหตุ: *p-value < 0.050, **p-value < 0.010 และ ***p-value < 0.001

ผลดังตารางที่ 4 ชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองการวิจัยเข้ากันได้กับข้อมูลเชิงประจักษ์ตามเกณฑ์ดัชนีที่ใช้วัดความกลมกลืน [18] - [21] อีกทั้งแสดงให้เห็นผลการทดสอบสมมติฐานอิทธิพลทางตรงในเชิงประจักษ์ว่า ตัวแปรความคาดหวังต่อประสิทธิภาพ อิทธิพลของสังคม แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก มูลค่าราคา และความเคยชินของการใช้ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ มีผลโดยตรงและทิศทางเป็นบวกต่อความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติของผู้ใช้งานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ ถ้าผู้ใช้งานซื้อสินค้าอัตโนมัติมีความคาดหวังต่อประสิทธิภาพสูง ได้รับอิทธิพลทางสังคมสูง มีแรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึกสูง มีการเปรียบเทียบมูลค่าราคาสูง และมีความเคยชินในการใช้งานสูง ก็จะส่งผลให้เกิดความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติสูงตามไปด้วย และผลการทดสอบยังแสดงหลักฐานเชิงประจักษ์ว่า ความเคยชินและความตั้งใจที่จะใช้งานมีอิทธิพลทางตรงเชิงบวกต่อการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งให้ความหมายว่า ถ้าผู้ใช้งานมีความเคยชินกับการใช้ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมากและมีความตั้งใจมากที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติก็จะยิ่งส่งผลให้เกิดการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมากขึ้น

3) ผลการศึกษาบทบาทของตัวแปรกำกับที่มีผลต่ออิทธิพลของการยอมรับที่มีต่อการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติโดยมีตัวแปรกำกับ คือ เพศ อายุ และประสบการณ์

การศึกษารolesบทบาทของตัวแปรกำกับ ได้แก่ เพศ อายุ และประสบการณ์ของผู้ใช้งานที่จะมีผลต่อขนาดและทิศทางของอิทธิพลตัวแปรสาเหตุที่มีต่อตัวแปรตาม ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ Multi-group ได้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5. การทดสอบอิทธิพลของตัวแปรกำกับ (n = 406)

Model testing			Separate effect testing							
χ^2 (df.)	$\Delta\chi^2$ (Δ df.)	P value		Male (n = 176)		Female (n = 230)		t-test		
1,308.502 (692)	472.786 (346)	***	H1a	FACO	0.255	BEIN	FACO	-0.058	BEIN	-1.047
			H2a	HEMO	0.250	BEIN	HEMO	0.168**	BEIN	-0.222
			H3a	PRVA	0.204	BEIN	PRVA	0.417***	BEIN	1.968*
			H4a	HABI	-0.101	BEIN	HABI	0.321***	BEIN	2.508*
			H5a	HABI	0.353***	USBE	HABI	0.308***	USBE	0.223
1,333.416 (692)	497.700 (346)	***		Age ≤ 30 Years (n = 212)		Age > 30 Years (n = 194)		t-test		
			H1b	FACO	0.019	BEIN	FACO	0.313	BEIN	1.315
			H2b	HEMO	0.212***	BEIN	HEMO	0.053	BEIN	-1.973*
			H3b	PRVA	0.420***	BEIN	PRVA	0.116	BEIN	-1.998*
			H4b	HABI	0.255**	BEIN	HABI	0.328	BEIN	0.688
H5b	HABI	0.355***	USBE	HABI	0.292	USBE	0.330			
1,287.793 (692)	452.077 (346)	***		Exp. ≤ 15 D/M (n = 171)		Exp. > 15 D/M (n = 235)		t-test		
			H1c	FACO	0.090	BEIN	FACO	0.097	BEIN	0.075
			H2c	HEMO	0.214*	BEIN	HEMO	0.195**	BEIN	-0.285
			H3c	HABI	0.159	BEIN	HABI	0.300*	BEIN	1.973*
			H4c	HABI	0.289*	USBE	HABI	0.532***	USBE	1.980*
H5c	BEIN	0.756***	USBE	BEIN	0.613***	USBE	-2.008*			

หมายเหตุ: *p value < 0.050, **p value < 0.010 และ ***p value < 0.001

บทบาทของตัวแปรกำกับเป็นดังตารางที่ 5 ที่บ่งชี้ว่าข้อมูลจากผู้ชายจำนวน 176 คน และผู้หญิงจำนวน 230 คนที่เป็นผู้ใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ พบว่า ผู้ชายมีเพียงปัจจัยความเคยชินเท่านั้นที่มีอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ ในขณะที่ผู้หญิงพบว่า มีถึง 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก มูลค่าราคา และความเคยชิน อีกทั้งยังพบว่าความเคยชินของผู้หญิงมีอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ และเมื่อทดสอบอิทธิพลของการกำกับอิทธิพลระหว่างเพศชายและเพศหญิง พบว่า ตัวแปรเพศเป็นตัวแปรกำกับอิทธิพลระหว่าง 1) มูลค่าราคากับความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ และ 2) ความเคยชินกับความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ โดยเห็นได้ชัดเจนว่าผู้ใช้งานที่เป็นผู้หญิงมีขนาดอิทธิพลสูงกว่าผู้ชายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าผู้หญิงยังมีการพิจารณามูลค่าราคาสินค้า และมีความเคยชินในการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมากยิ่งขึ้น ยิ่งเพิ่มความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมากตามขึ้นไป

ผู้ใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติที่มีอายุไม่เกิน 30 ปี และเกิน 30 ปี มีจำนวน 212 คน และ 194 คน ตามลำดับ พบว่า ผู้ที่มีอายุน้อยกว่ามีปัจจัยที่มีอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ จำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก มูลค่าราคา และความเคยชิน อีกทั้งความเคยชินส่งผลเชิงบวกต่อการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่กลุ่มบุคคลที่มีอายุมากกว่ากลับไม่พบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติและการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ และเมื่อทดสอบอิทธิพลของการกำกับอิทธิพลระหว่างบุคคลที่มีอายุน้อยกว่าและกลุ่มบุคคลที่มีอายุมากกว่า พบว่า อายุเป็นตัวแปรกำกับขนาดอิทธิพลระหว่าง 1) แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึกกับความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ และ 2) มูลค่าราคากับความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ โดยที่ผู้ใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติที่มีอายุน้อยกว่า คือ อายุไม่เกิน 30 ปี จะมีขนาดอิทธิพลที่สูงกว่าผู้ใช้งานที่มีอายุมากกว่า 30 ปี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า ผู้ใช้งานอายุไม่เกิน 30 ปีจะมีอิทธิพลของแรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก และการเปรียบเทียบมูลค่าราคาสินค้าที่ส่งผลต่อความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติสูงกว่าผู้ที่มีอายุมากกว่า 30 ปี

ในส่วนของตัวแปรประสบการณ์การใช้ตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติที่มีผู้ใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติที่มีประสบการณ์น้อย (ใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติไม่เกิน 15 วัน/เดือน) มีจำนวน 171 คน และประสบการณ์มาก (ใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมากกว่า 15 วัน/เดือน) มีจำนวน 235 คน พบว่า ในส่วนของผู้ใช้งานที่เป็นกลุ่มบุคคลที่มีประสบการณ์น้อยกว่า มีเพียงปัจจัยเดียวที่มีอิทธิพลเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ คือ แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก และพบว่าความเคยชินและความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ เป็นปัจจัยที่ส่งอิทธิพลเชิงบวกต่อการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่กลุ่มบุคคลที่มีประสบการณ์มากกว่า พบว่ามี 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ ได้แก่ แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก และความเคยชิน และพบว่าความเคยชินและความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติเป็นปัจจัยที่ส่งอิทธิพลเชิงบวกต่อการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อทดสอบอิทธิพลของการกำกับอิทธิพลระหว่างบุคคลที่มีประสบการณ์น้อยและกลุ่มบุคคลที่มีประสบการณ์มาก พบว่า ประสบการณ์เป็นตัวแปรกำกับขนาดอิทธิพลระหว่าง 1) ความเคยชินกับความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ 2) ความเคยชินกับการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ และ 3) ความตั้งใจที่จะใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติกับการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ โดยพบว่า ผู้ที่มีประสบการณ์มากจะมีขนาดอิทธิพลของความเคยชินที่ส่งผลต่อความตั้งใจที่จะใช้งาน และส่งผลต่อการใช้งานที่สูงกว่ากลุ่มผู้ที่มีประสบการณ์น้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ความตั้งใจที่จะใช้งานของกลุ่มผู้ที่มีประสบการณ์น้อยกว่ามีขนาดอิทธิพลที่ส่งผลต่อการใช้งานสูงกว่ากลุ่มผู้ที่มีประสบการณ์มากกว่า

3.2 การวิจารณ์

1) แบบวัดที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วยแบบวัดปัจจัยการยอมรับการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติตามทฤษฎี UTAUT2 ของ Venkatesh และคณะ [6] จำนวน 9 ตัวแปรแฝง และ 29 ตัวแปรสังเกตได้ มีความตรงเชิงโครงสร้างและความตรงเชิงจำแนก เหตุที่เป็นผลเช่นนี้เป็นเพราะการพัฒนาแบบวัดในครั้งนี้ได้ดำเนินการตามหลักวิชาการเป็นขั้นเป็นตอน ตั้งแต่การทบทวนวรรณกรรมตัวแปรในกรอบ

แนวคิดทฤษฎีและนำไปสู่การนิยามศัพท์เชิงปฏิบัติการ ก่อนร่างข้อคำถามทั้งหมดเพื่อส่งให้ผู้เชี่ยวชาญที่ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหา และด้านวิจัยจำนวน 5 คน ทำการประเมินความตรงด้วยเกณฑ์ที่เคร่งครัด และใช้วิธีการประเมินด้วยดัชนี I-CVI ที่เป็นการประเมินความตรงรายข้อ แล้วจึงประเมินดัชนี S-CVI ที่เป็นการประเมินแบบวัดทั้งฉบับ ทั้งนี้ในกรณีที่ข้อคำถามใดไม่ผ่านการเห็นที่มีความสอดคล้องกันได้มีการนำมาปรับปรุงแล้วส่งประเมินใหม่กับผู้เชี่ยวชาญอีกครั้งจนกว่าจะได้รับผลการประเมิน I-CVI/S-CVI เป็นไปตามเกณฑ์ของ [15] ที่ได้เสนอแนะว่า ถ้าหากมีผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน จำเป็นให้ผู้เชี่ยวชาญทุกคนจะต้องเห็นสอดคล้องกันจึงจะนับได้ จึงทำให้ผลการประเมินในขั้นตอนนี้มีค่าประเมินเท่ากับ 1.00 แล้วจึงนำไปทดลองใช้กับกลุ่มบุคคลที่คล้ายคลึงกับกลุ่มตัวอย่างจริงจำนวน 30 คน เพื่อพิจารณาความเข้าใจในภาษาที่ใช้ ความชัดเจนของข้อคำถาม และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความเชื่อมั่น เพื่อพิจารณาความสอดคล้องภายในระหว่างข้อคำถามด้วยค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาคของตัวแปรแฝงที่ละตัวแปร ซึ่งผลที่ได้พบว่ามีความมากกว่า 0.70 ดังที่ Nunnally [16] กำหนด และเมื่อเก็บรวบรวมข้อมูลในภาคสนาม [23] เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์สำหรับประเมินความตรงเชิงโครงสร้างและความตรงเชิงจำแนก จึงพบว่าข้อมูลที่ได้จากแบบวัดดังกล่าวมีความตรงอยู่ในเกณฑ์ที่ได้มาตรฐาน

2) แบบจำลองการวิจัยมีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์โดยไม่ต้องปรับแต่งแบบจำลอง ซึ่งผลของอิทธิพลทางตรงพบว่า 1) ความตั้งใจที่จะใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติได้รับอิทธิพลจาก 5 ปัจจัย ได้แก่ ความคาดหวังในประสิทธิภาพ อิทธิพลของสังคม แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก มูลค่าราคา และความเคยชิน และ 2) การใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติได้รับผลโดยตรงจาก 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเคยชินและความตั้งใจที่จะใช้งาน ส่วนปัจจัยความคาดหวังในความพยายาม พบว่าไม่มีอิทธิพลทางตรงต่อความตั้งใจที่จะใช้งานและเงื่อนไขการอำนวยความสะดวก อีกทั้งยังไม่ส่งอิทธิพลทางตรงทั้งต่อความตั้งใจที่จะใช้งานและการใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ ซึ่งเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจจะเป็นเพราะการรับรู้ของบุคคลที่มีเทคโนโลยีและนวัตกรรมนั้นเป็นเรื่องปกติในปัจจุบันที่การสร้างเทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่ ๆ จะต้องมียุทธศาสตร์ที่ไม่ต้องพึ่งพาความพยายามที่จะใช้งาน รวมถึงการเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกของเทคโนโลยีและนวัตกรรม จึงทำให้บุคคลที่เป็นกลุ่มเป้าหมายโดยรวมของงานนี้จึงแสดงให้เห็นเชิงประจักษ์ว่า ปัจจัยทั้งสองดังกล่าวไม่ใช่ปัจจัยสำคัญที่จะก่อให้เกิดความตั้งใจที่จะใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ ซึ่งเป็นผลในแนวทางเดียวกับผลงานวิจัยของ Chang และคณะ [7] ที่พบว่า ความคาดหวังในความพยายามไม่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจใช้นวัตกรรมการจองโรงแรมของนักท่องเที่ยวที่เข้าพักโรงแรมในประเทศได้ทุกวัน และทำนองเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Arista และ Abbas [8] ที่พบว่าความคาดหวังในความพยายามไม่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจใช้ระบบการประเมินประสิทธิภาพการสอนของครูผู้สอน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sharma [11] ที่พบเช่นกันว่าความคาดหวังในความพยายามไม่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจใช้ระบบการชำระเงินบนมือถือของกลุ่มมิลลิเนียมในประเทศอินเดีย และงานวิจัยของ Hammouri และคณะ [12] ที่พบคล้าย ๆ กับผลการวิจัยในครั้งนี้ว่า การคาดหวังในความพยายามและเงื่อนไขการอำนวยความสะดวกไม่ได้ส่งผลโดยตรงทั้งต่อความตั้งใจที่จะใช้งาน E-wallets ในประเทศจอร์แดน อย่างไรก็ตามผลการวิจัยในงานครั้งนี้มีความขัดแย้งกับงานวิจัยในอดีตที่พบว่า เงื่อนไขการอำนวยความสะดวกมักมีอิทธิพลต่อความตั้งใจที่จะใช้งานและการใช้งานเทคโนโลยีหรือนวัตกรรม เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะเงื่อนไขการอำนวยความสะดวกไม่ใช่สาเหตุที่สำคัญต่อความตั้งใจที่จะใช้และการใช้งานเมื่อเทียบกับปัจจัยสำคัญอื่น ๆ เช่น ความคาดหวังต่อประสิทธิภาพ อิทธิพลของสังคม

แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก มูลค่าราคา และความเคยชินที่มีต่อผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ จึงทำให้ปัจจัยสำคัญอื่น ๆ มีผลที่เป็นไปทางเดียวกับทฤษฎี UTAUT2 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้ตรงกับบริบทจริง ยกเว้นปัจจัยสองปัจจัยดังที่อภิปรายไว้ข้างต้น

3) ผลการวิจัยในส่วนของการพบความสัมพันธ์แปรผกผัน อายุ และประสบการณ์ พบว่า

เพศเป็นตัวแปรกำกับอิทธิพลระหว่าง 1) มูลค่าราคา กับ ความตั้งใจที่จะใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ โดยพบว่าเพศหญิงยังมีการเปรียบเทียบมูลค่าราคาสินค้าจากผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมากจะยังมีความตั้งใจที่จะใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมากกว่าเพศชาย ที่เป็นเช่นนี้เพราะผู้หญิงให้ความสนใจเรื่องราคาสินค้าและความคุ้มค่าที่ได้รับจึงมีผลต่อระดับความตั้งใจสูงกว่าผู้ชายนั่นเอง ผลที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลงานวิจัยของ Ciftci และคณะ [13] ที่พบว่าเพศของนักเรียนแพทย์ในประเทศตุรกีเป็นตัวแปรกำกับอิทธิพลระหว่างมูลค่าราคากับความตั้งใจใช้ระบบการศึกษาทางไกล และ 2) ความเคยชิน กับ ความตั้งใจที่จะใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ โดยผลบ่งชี้ว่า ผู้ใช้งานผู้ชายมีค่าอิทธิพลทางตรงของความเคยชินในการใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมาก ยิ่งเพิ่มความตั้งใจที่จะใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมากตามขึ้นไปซึ่งเป็นค่าอิทธิพลที่สูงกว่าผู้หญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อาจจะเป็นเพราะลักษณะของผู้ชายเป็นเพศที่คุ้นเคยกับเทคโนโลยีมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามผลการวิจัยในครั้งนี้หักล้างผลการวิจัยของ Chang และคณะ [7] ที่พบว่า เพศไม่ได้เป็นตัวแปรกำกับระหว่างอิทธิพลในเส้นทางดังกล่าว หากแต่พบว่า เพศเป็นตัวแปรกำกับอิทธิพลของความคาดหวังในประสิทธิภาพ และอิทธิพลของสังคม ที่มีต่อความตั้งใจที่จะใช้งานนวัตกรรมการจองโรงแรมของนักท่องเที่ยวที่เข้าพักแรมในโรงแรมประเทศไต้หวัน

อายุ เป็นตัวแปรกำกับขนาดอิทธิพลระหว่าง 1) แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก กับ ความตั้งใจที่จะใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ และ 2) มูลค่าราคา กับ ความตั้งใจที่จะใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ โดยที่ผู้ใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติที่มีอายุน้อยกว่าจะมีขนาดอิทธิพลที่สูงกว่าผู้ใช้งานที่มีอายุมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่า ผู้ใช้งานอายุน้อยกว่าจะมีอิทธิพลของแรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก และการเปรียบเทียบมูลค่าราคาสินค้าที่ส่งผลต่อความตั้งใจที่จะใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติสูงกว่าผู้ที่มีอายุมากกว่า เหตุที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะบุคคลที่มีอายุน้อยกว่ายังคงให้ความสนใจและมีความตื่นตัวกับอารมณ์และความรู้สึกในการใช้งานเทคโนโลยีมากกว่ากลุ่มบุคคลที่มีอายุมากกว่านั่นเอง และเช่นเดียวกันกลุ่มบุคคลที่มีความอ่อนวัยกว่าก็ยิ่งให้ความสำคัญต่อการพิจารณาเกี่ยวกับราคาหรือต้นทุนของสินค้าที่จัดจำหน่ายในผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติมากกว่ากลุ่มสูงวัยกว่า ผลการวิจัยในส่วนนี้เหมือนกับผลงานวิจัยของ [13] และ [7] ที่พบว่าอายุเป็นตัวแปรกำกับระหว่างอิทธิพลในสองเส้นทางดังกล่าวเช่นเดียวกัน และไม่เหมือนกับงานของ [8] ที่พบว่าอายุไม่ได้เป็นตัวแปรกำกับอิทธิพลในสองเส้นทางดังกล่าว

ประสบการณ์เป็นตัวแปรกำกับขนาดอิทธิพลระหว่าง 1) ความเคยชิน กับ ความตั้งใจที่จะใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ 2) ความเคยชิน กับ การใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ และ 3) ความตั้งใจที่จะใช้งาน กับ การใช้งานผู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ โดยที่ผู้ที่มีประสบการณ์มากจะมีขนาดอิทธิพลของความเคยชินที่ส่งผลต่อความตั้งใจที่จะใช้งาน และส่งผลต่อการใช้งานที่สูงกว่ากลุ่มผู้ที่มีประสบการณ์น้อยกว่าซึ่งเป็นประเด็นสำคัญมากสำหรับการสร้างเทคโนโลยีหรือนวัตกรรมที่จะต้องทำให้กลุ่มเป้าหมายมีความเคยชินให้มากอาจจะด้วยการให้ใช้ให้เป็นกิจวัตรประจำวัน หรือ ถ้าการใช้งานครั้งแรกๆ อาจจะให้มีการส่งเสริมการใช้ด้วยการใช้ฟรีหรือมีการแจกรางวัลให้มาใช้บ่อยๆ เพื่อสร้างความคุ้นเคยให้เกิดขึ้น ซึ่งยิ่งคุ้นเคยมากก็จะมีการใช้งานสูง

ตั้งที่ปรากฏในผลการวิจัยนี้ ซึ่งมีคล้ายกับผลงานของ [7], [8] และ [13] ที่พบว่าประสบการณ์เป็นตัวแปรกำกับอิทธิพลในเส้นทางอิทธิพลดังกล่าว

4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการทดลอง

1) แบบวัดที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วยแบบวัดปัจจัยการยอมรับการใช้งานต่อซื้อสินค้าอัตโนมัติตามทฤษฎี UTAUT2 ของ Venkatesh และคณะ [6] ที่มีตัวแปรแฝงจำนวน 9 ตัวแปร และตัวแปรสังเกตได้จำนวน 29 ตัว ได้แก่ ตัวแปรแฝง 1) ความคาดหวังในประสิทธิภาพ มี 3 ตัวแปรสังเกตได้ 2) ความคาดหวังต่อความพยายาม มี 3 ตัวแปรสังเกตได้ 3) อิทธิพลของสังคม มี 3 ตัวแปรสังเกตได้ 4) การอำนวยความสะดวก มี 3 ตัวแปรสังเกตได้ 5) แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก มี 3 ตัวแปรสังเกตได้ 6) มูลค่าราคา มี 3 ตัวแปรสังเกตได้ 7) ความเคยชิน มี 3 ตัวแปรสังเกตได้ 8) ความตั้งใจที่จะใช้งาน มี 4 ตัวแปรสังเกตได้ และ 9) การใช้งาน มี 4 ตัวแปรสังเกตได้ โดยที่ตัวแปรแฝงทั้งหมดมีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ สรุปได้ว่า แบบวัดที่พัฒนาขึ้นมามีลักษณะที่ใช้วัดตัวแปรแฝงได้ตรงกับสิ่งที่ต้องการศึกษา

2) แบบจำลองการวิจัยมีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ซึ่งผลการทดสอบอิทธิพลทางตรงพบว่า 1) ความตั้งใจที่จะใช้งานต่อซื้อสินค้าอัตโนมัติได้รับอิทธิพลโดยตรงจาก 5 ปัจจัย ได้แก่ ความคาดหวังในประสิทธิภาพ อิทธิพลของสังคม แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก มูลค่าราคา และความเคยชิน และ 2) การใช้งานต่อซื้อสินค้าอัตโนมัติได้รับอิทธิพลโดยตรงจาก 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเคยชิน และความตั้งใจที่จะใช้งาน

3) ตัวแปรเพศเป็นตัวแปรกำกับอิทธิพลระหว่าง 1) มูลค่าราคา กับ ความตั้งใจที่จะใช้งาน และ 2) ความเคยชิน กับ ความตั้งใจที่จะใช้งาน สำหรับตัวแปรระดับอายุของผู้ใช้งานต่อซื้อสินค้าอัตโนมัติเป็นตัวแปรกำกับขนาดอิทธิพลระหว่าง 1) แรงจูงใจด้านอารมณ์ความรู้สึก กับ ความตั้งใจที่จะใช้งาน และ 2) มูลค่าราคา กับ ความตั้งใจที่จะใช้งาน และตัวแปรระดับประสบการณ์เป็นตัวแปรกำกับขนาดอิทธิพลระหว่าง 1) ความเคยชิน กับ ความตั้งใจที่จะใช้งาน 2) ความเคยชิน กับ การใช้งาน และ 3) ความตั้งใจที่จะใช้งาน กับ การใช้งานต่อซื้อสินค้าอัตโนมัติ

4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1) นักวิจัย หรือนักวิชาการสามารถนำแบบวัดจากงานนี้ไปใช้ได้เนื่องจากเป็นแบบวัดที่มีคุณภาพและความตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน หรือถ้าหากจะพัฒนาแบบวัดขึ้นมาใช้ด้วยตนเองก็ให้ทำตามขั้นตอนที่ได้เขียนแนะนำไว้ในหัวข้อการอภิปรายผลไปแล้ว

2) ผู้ที่เป็นนักวัดหรือผู้สร้างนวัตกรรมทั้งในระบบอินเทอร์เน็ตในสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) หรือการสร้างสรรคแอปพลิเคชันสำหรับการซื้อ-ขายสินค้าและบริการ ควรเพิ่มเติมให้นวัตกรรมที่สร้างมีลักษณะการตอบสนองที่มีตรงกับปัญหาและความต้องการของผู้ใช้บริการ ในประเด็นนี้หมายความว่า การจะสร้างนวัตกรรมใด ๆ ควรมีการศึกษาถึงสถานการณ์ของกลุ่มเป้าหมายก่อนการวางแผนและสร้างนวัตกรรมขึ้นมา รวมถึงคำนึงถึงการเลือกใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ ในการพัฒนานวัตกรรม

3) ผู้ให้บริการตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติควรมีการสร้างความคุ้นเคยให้เกิดขึ้นกับกลุ่มผู้ใช้งาน เป้าหมายให้มาก เช่น อาจกำหนดให้ผู้ใช้ให้เป็นกิจวัตรประจำวัน หรือถ้าการใช้งานครั้งแรก ๆ ก็สามารถจัดกิจกรรมทางการตลาด ด้วยการส่งเสริมการใช้งานฟรี มีการแจกรางวัลการใช้บ่อย การสะสมคะแนน หรือการสะสมสิทธิประโยชน์ เป็นต้น

4.2.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1) ควรเสาะหาแบบวัดที่มีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับใช้ในงานวิจัย หรือถ้าต้องสร้างขึ้นใหม่ให้ดำเนินการพัฒนาแบบวัดให้ได้มาตรฐานก่อนการเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม

2) เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ใช้เพียงทฤษฎี UTAUT2 เพื่ออธิบายปรากฏการณ์การเกิดการใช้งานตู้ซื้อสินค้าอัตโนมัติ การวิจัยครั้งต่อไปควรนำทฤษฎี UTAUT2 ร่วมกับตัวแปรอื่น เช่น ความไวใจ ความเสี่ยง หรือใช้ทฤษฎีการแพร่กระจายนวัตกรรมมาร่วมในการอธิบายปรากฏการณ์เพิ่มเติม และอาจเพิ่มเติมกระบวนการวิจัยเชิงคุณภาพร่วมด้วย เพื่อสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่ไม่อาจอธิบายได้ด้วยผลเชิงปริมาณ

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Davis, F.D. 1989. Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319-339, <https://doi.org/10.2307/249008>.
- [2] Triandis, H.C. 1977. *Interpersonal Behavior*. Brooke/Cole, Monterey, CA.
- [3] Roger, E. 1995. *Diffusion of Innovations*. Free Press, New York.
- [4] Taylor, S. and Todd, P.A. 1995. Understanding Information Technology usage: A test of competing model. *Information System Research*, 6(2), 144-176.
- [5] Venkatesh, V., Morris, M. and Davis, G.B. 2003. User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS Quarterly*, 27(3), 425-478, <https://doi.org/10.2307/30036540>.
- [6] Venkatesh, V., Thong, Y.L. and Xu, X. 2012. Consumer acceptance and use of information technology: Extending the unified theory of acceptance and use of technology. *MIS Quarterly*, 36(1), 157-178, <https://doi.org/10.2307/41410412>.
- [7] Chang, C-M., Liu, L-W., Huang, H-C. and Hsieh, H-H. 2019. Factors Influencing Online Hotel Booking: Extending UTAUT2 with Age, Gender, and Experience as Moderators. *Information*, 10(9), 1-18, <https://doi.org/10.3390/info10090281>.
- [8] Arista, A. and Abbas, B.S. 2022. Using the UTAUT2 model to explain teacher acceptance of work performance assessment system. *International Journal of Evaluation and Research in Education*, 11(4), 2200-2208, <http://doi.org/10.11591/ijere.v11i4.22561>.

- [9] Mishra, N., Gupta, S.L., Srivastava, P., Srivastava, S. and Kabir, M. 2022. Student Acceptance of Social Media in Higher Education: An application of UTAUT2 model. *Thailand and the world economy*, 40 (1), 88-108.
- [10] Farsi, G.A. 2023. The Efficiency of UTAUT2 Model in Predicting Student's Acceptance of Using Virtual Reality Technology. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 17(12), 17-27, <https://doi.org/10.3991/ijim.v17i12.36951>.
- [11] Sharma, D. 2023. Factors affecting M-payment adoption in millennials: Testing extended UTAUT2 model. *Thailand and the world economy*, 41(2), 40-61.
- [12] Hammouri, Q. et al. 2023. An empirical investigation on acceptance of e-wallets in the fintech era in Jordan: Extending UTAUT2 model with perceived trust. *International Journal of Data and Network Science*, 7(3), 1249-1258, <https://dx.doi.org/10.5267/j.ijdns.2023.4.013>.
- [13] Ciftci, S.K., Gok, R. and Karadag, E. 2023. Acceptance and use of the distance education systems of Turkish medical educators during COVID-19 pandemic: an analysis of contextual factors with the UTAUT2. *BMC Medical Education*, 23(36), 1-12, <https://doi.org/10.1186/s12909-023-04024-7>.
- [14] อภิญญา อิงอาจ. 2565. หลักการ ทฤษฎี และแนวปฏิบัติ: การพัฒนาแบบจำลองสมการโครงสร้าง. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. [Ingard, A. (2022). Principles theories and practices: structural equation modeling. Chulalongkorn University Press, Bangkok. (in Thai)]
- [15] Lynn, M. 1986. Determination and Quantification of Content Validity Index. *Nursing Research*, 35(6), 382-386, <https://doi.org/10.1097/00006199-198611000-00017>.
- [16] Nunnally, J.C. 1978. Psychometric Theory. 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
- [17] Fornell, C. and Larcker, D.F. 1981. Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of Marketing Research*, 18(1), 39-50, <https://doi.org/10.2307/3151312>.
- [18] Browne, M.W. and Cudeck, R. 1992. Alternative ways of assessing model fit. *Sociological Methods and Research*, 21, 230-258, <https://doi.org/10.1177/0049124192021002005>.
- [19] Kline, R.B. 1998. Principles and Practice of Structural Equation Modeling. The Guilford Press, New York.
- [20] Hu, L.T. and Bentler, P.M. 1999. Cutoff Criteria for Fit Indexes in Covariance Structure Analysis: Conventional Criteria Versus New Alternatives. *Structural Equation Modeling*, 6(1), 1-5, <https://doi.org/10.1080/10705519909540118>.

- [21] Schumacker, R.E. and Lomax, R.G. 2004. A beginner's guide to structural equation modeling. 2nd ed., Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- [22] Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J. and Anderson, R.E. 2010. Multivariate Data Analysis. 7th ed., Pearson, New York.
- [23] บุญใจ ศรีสถิตย์นรากร. 2555. การพัฒนาและตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัย : คุณสมบัติการวัดเชิงจิตวิทยา. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. [Srisatidharakul, B. (2012). Development and Validation of Research Instruments: Psychometric Properties. Chulalongkorn University Printing House, Bangkok. (in Thai)]

คู่มือการเขียนบทความ วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

1. ใช้ตัวอักษรแบบ TH Sarabun PSK และระยะห่างระหว่างบรรทัด 1 เท่า (Single Space)
2. จัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์ ตั้งค่าน้ำกระดาษ ขอบบน 1.58 นิ้ว และล่าง 1.58 นิ้ว ขอบซ้ายและขวา 1.58 นิ้ว จัดขนาดกระดาษแบบ Letter
3. ชื่อเรื่องพิมพ์ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาด 18 ตัวหนา ชื่อภาษาอังกฤษเฉพาะคำขึ้นต้น ให้พิมพ์เป็นตัวพิมพ์ใหญ่ จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์
4. ชื่อผู้แต่งและผู้แต่งร่วม ที่อยู่หน่วยงานผู้แต่ง ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวปกติ จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์
5. เนื้อหา
 - บทคัดย่อ และ Abstract ใช้ตัวอักษรขนาด 16 ตัวหนา จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ คำว่า Abstract เฉพาะตัวอักษรนำ A ให้ใช้ตัวพิมพ์ใหญ่ ส่วนเนื้อความใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวปกติ โดยจัดรูปแบบ Thai Justify และจัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์
 - คำสำคัญ (Keywords) ให้พิมพ์ต่อจากส่วนของบทคัดย่อก่อนขึ้นบทนำ หัวข้อใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวหนา ควรเลือกคำสำคัญที่เกี่ยวข้องกับบทความประมาณ 3-5 คำ ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวปกติ
 - หัวข้อใหญ่ใช้ตัวอักษร 16 ตัวหนา **บทความวิจัย** เนื้อหาประกอบด้วย 1. บทนำ 2. วิธีการทดลอง/วิธีดำเนินการวิจัย (รวมถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง) 3. ผลการทดลองและวิจารณ์/ผลการวิจัยและอภิปรายผล และ 4. สรุปผลการทดลอง/สรุปผลการวิจัย ส่วน**บทความวิชาการ** เนื้อหาประกอบด้วย 1. บทนำ 2. เนื้อหาสาระ 3. เนื้อหาสาระ (ถ้ามีเพิ่ม) และ 4. บทสรุป โดยหัวข้อย่อยใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวหนา จัดชิดซ้ายคอลัมน์ ส่วนเนื้อความใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวปกติ จัดรูปแบบ Thai justify
 - กิตติกรรมประกาศ ไม่ต้องใส่หมายเลขกำกับ หน้าหัวข้อใหญ่ ใช้ตัวอักษรขนาด 16 ตัวหนา ส่วนเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวปกติ
 - เอกสารอ้างอิง (References) หัวข้อใหญ่ใช้ตัวอักษรขนาด 16 ตัวหนา ส่วนเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวปกติ
6. ตาราง ให้ใช้คำว่า ตารางที่ ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวหนา ในส่วนชื่อตาราง เนื้อหาในตาราง ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ปกติ โดยที่หัวตารางให้จัดวางชิดซ้ายของคอลัมน์ ชื่อตารางอยู่ด้านบนของตาราง ระยะห่างระหว่างบรรทัด 1 เท่า (Single Space)
7. รูป (ภาพ) ให้ใช้คำว่า รูปที่ ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวหนา ในส่วนชื่อรูปพร้อมคำบรรยาย ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ปกติ โดยที่รูปให้จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์ ชื่อและคำบรรยายรูปให้อยู่ใต้รูป ระยะห่างระหว่างบรรทัด 1 เท่า (Single Space)
8. สมการ ให้ใช้สมการที่ (x) ใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวปกติ
9. จำนวนหน้าบทความ ไม่ได้มีการกำหนด

การเขียนเอกสารอ้างอิง (References)

1. วารสาร

ก. วารสารภาษาไทย

ชื่อผู้แต่ง (ชื่อเต็ม ตามด้วยชื่อสกุล). ปีที่พิมพ์. ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร (*ตัวเอียง*), ฉบับที่ (เล่มที่ ถ้ามี), หน้าแรก-หน้าสุดท้าย. [แปลเป็นภาษาอังกฤษ แล้ววงเล็บ (in Thai)]

ตัวอย่าง

- [1] มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์, จิรวดี มหาปทุม และวาสนา แสนบัวหลวง. 2552. ผลของเศษด้ายไหมต่อสัณฐานวิทยาและสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 18(1), 67-79. [Malinee Chaisupakitsin, Chirawadi Mahaprathum and Vassana Saenbualuang. 2009. Effect of silk yarn residues on morphology and properties of rigid polyurethane foam. *Journal of Science Ladkrabang*, 18(1), 67-79. (in Thai)]

ข. วารสารภาษาอังกฤษ

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้นต้น. อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). ปีที่พิมพ์. ชื่อบทความ. ชื่อวารสารที่เป็นชื่อเต็ม (*ตัวเอียง*), ฉบับที่ (เล่มที่ ถ้ามี), หน้าแรก-หน้าสุดท้าย, DOI.

ตัวอย่าง

- [2] Boughton, J.M. 2002. The bretton woods proposal: A brief look. *Political Science Quarterly*, 42(6), 564-570.
- [3] Boughton, J.M., Kirk, J. and Munday, R.J. 2002. The Bretton woods proposal: A brief look. *Political Science Quarterly*, 42(6), 564-570.
- [4] Palananda, A. and Kimpan, W. 2022. Classification of Adulterated Particle Images in Coconut Oil Using Deep Learning Approaches. *Applied Sciences*, 12, 1-16, <https://doi.org/10.3390/app12020656>.
- [5] Kruekaew, B. and Kimpan, W. 2022. Multi-Objective Task Scheduling Optimization for Load Balancing in Cloud Computing Environment Using Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm With Reinforcement Learning. *IEEE Access*, 10, 17803-17818, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3149955>.

2. หนังสือหรือตำรา

ก. หนังสือภาษาไทย

ชื่อผู้แต่ง. ปีที่พิมพ์. ชื่อหนังสือ. พิมพ์ครั้งที่, สำนักพิมพ์, สถานที่พิมพ์. [แปลเป็นภาษาอังกฤษ แล้ววงเล็บคำว่า in Thai]

ตัวอย่าง

- [1] ดุษณี ธนะบริพัฒน์. 2534. จุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1, โรงพิมพ์โคราชไทยรุ่งกิจ, นครราชสีมา. [Dusanee Thanaboripat. 1991. *Industrial Microbiology*. 1st ed., Korat Thai Roongkit Publisher, Nakhonratchasima. (in Thai)]

ข. หนังสือภาษาอังกฤษ

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้นต้น. อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). ปีที่พิมพ์. ชื่อหนังสือ. พิมพ์ครั้งที่, สำนักพิมพ์, สถานที่พิมพ์.

ตัวอย่าง

[2] Barker, R., Kirk, J. and Munday, R.J. 1988. Narrative Analysis. 3rd ed., Bloomington. Indiana publishing, Indiana University Press.

3. วิทยานิพนธ์

ก. โครงการพิเศษ/วิทยานิพนธ์ภาษาไทย

ชื่อผู้แต่ง (ชื่อเต็ม ตามด้วยชื่อสกุล). ปีที่พิมพ์. ชื่อวิทยานิพนธ์. ระดับการศึกษา, ชื่อหลักสูตร, ชื่อสถานศึกษา. [แปลเป็นภาษาอังกฤษแล้ว (in Thai)]

ตัวอย่าง

[1] วิวัฒน์ หันบุญญิตี และเอกภพ สกุลกิจกาญจน์. 2549. การตรวจสอบลักษณะของเชื้อแอคติโนมัยซีส์ที่คัดแยกจากป่าชายเลน. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. [Vipat Hanbanyat and Ekaphop Sakunkijkan. 2006. Characterization of actinomycetes isolated from mangrove forest soils. B.Sc. Special Project, Biotechnology Program, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai)]

ข. โครงการพิเศษ/วิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้นต้น. อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). ปีที่พิมพ์. ชื่อวิทยานิพนธ์. ระดับการศึกษา, หลักสูตร, ชื่อสถานศึกษา.

ตัวอย่าง

[2] Richmond, J. 2005. Customer expectations in the world of electronic banking: a case study of the Bank of Britain. Ph.D. Thesis, Anglia Ruskin University.

4. บทความในงานประชุมวิชาการ (Proceedings)

ก. บทความภาษาไทย

ชื่อผู้แต่ง (ชื่อเต็ม ตามด้วยชื่อสกุล). ปีที่พิมพ์. ชื่อบทความ. ชื่องานประชุมวิชาการ, ครั้งที่จัด, ชื่อผู้จัดงานประชุม, สถานที่, เลขหน้าที่อ้างอิง. [แปลเป็นภาษาอังกฤษแล้ว (in Thai)]

ตัวอย่าง

[1] มงคล รักษาพัชรวงศ์. 2542. บทบาทการเชื่อมต่อเชิงแสงในระบบคอมพิวเตอร์. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ครั้งที่ 37, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, 511-518. [Mongkol Raksapatecharawong. 1999. A role of optical interconnects in computer systems. The Proceedings of 37th Kasetsart University Annual Conference, Bangkok. 511-518. (in Thai)]

ข. บทความภาษาอังกฤษ

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้นต้น. อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). ปีที่พิมพ์. ชื่อบทความ.
ชื่อรายงานการประชุม, หน้า

ตัวอย่าง

- [2] Book, W.J. 1990. Modeling design and control of flexible manipulator arms: A tutorial review. Proceedings 29th IEEE Conference on Decision and Control, San Francisco, CA, 500-506.

5. แหล่งข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์

ก. ของผู้แต่งภาษาไทย

ชื่อผู้แต่ง(ชื่อเต็ม ตามด้วยชื่อสกุล). ตัวเลข ปี พ.ศ.ที่ตีพิมพ์. ชื่อบทความ. แหล่งข้อมูล : URL ของเว็บไซต์ที่อ้างอิงข้อมูล. ค้นเมื่อวันที่ เดือน ปี พ.ศ. .

ตัวอย่าง

- [1] ธีฎกร เอี้ยวชีโป และวิไลลักษณ์ เลิศเมธากุล. 2560. การพัฒนาระบบคิวงานผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลทุ่งหว่า จังหวัดสตูล. กระทรวงสาธารณสุข, แหล่งข้อมูล : <http://km.stno.moph.go.th/>. ค้นเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2563.

ข. ของผู้แต่งภาษาอังกฤษ

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้น. อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). ตัวเลข ปี ค.ศ.ที่ตีพิมพ์. ชื่อบทความ. แหล่งข้อมูล : (Available at:) URL ของเว็บไซต์ที่อ้างอิงข้อมูล. ค้นเมื่อ (Retrieved) วันที่ เดือน ปี ค.ศ. .

ตัวอย่าง

- [2] Simone, G. and Jean-Paul, V.B. 2003. Customer Expectations of Internet Banking in South Africa. Available at: https://www.researchgate.net/publication/251446751_Customer_Expectations_of_Internet_Banking_in_South_Africa. Retrieved 19 May 2020.

หมายเหตุ รายการอ้างอิงที่มีผู้แต่งมากกว่า 5 คนขึ้นไป ให้ใช้ชื่อผู้แต่งลำดับที่ 1 ตามด้วย et al. (สำหรับรายการภาษาอังกฤษ) และชื่อผู้แต่งลำดับที่ 1 ตามด้วย และคณะ (สำหรับรายการภาษาไทย)

ระยะขอบบน (หัวกระดาษ) ให้เว้น 1.58 นิ้ว หรือ 4.01 เซนติเมตร

ชื่อเรื่องภาษาไทย (ขนาดอักษร 18 ตัวหนา)
ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ (ขนาดอักษร 18 ตัวหนา)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

ชื่อผู้วิจัย^{1*} ผู้วิจัยร่วม² ภาษาไทย (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

ชื่อผู้วิจัย¹ ผู้วิจัยร่วม² ภาษาอังกฤษ (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

¹ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัย ภาษาไทย (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

²ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัยร่วม ภาษาไทย (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

¹ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัย ภาษาอังกฤษ (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

²ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัยร่วม ภาษาอังกฤษ (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

วันที่ส่งบทความ : วันที่แก้ไขบทความ : วันที่ตอบรับบทความ : (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

Received:, Revised:, Accepted: ภาษาอังกฤษ (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

บทคัดย่อ (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

เว้นเข้า 1 ซม.
ทุกย่อหน้าแรก

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai justify).....

ระยะห่างระหว่าง
บรรทัด 1 เท่า

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

คำสำคัญ : (ขนาดอักษร 12 ตัวหนา) อักษรภาษาไทย อ่านหนังสือ ชอบมากกว่า (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

Abstract (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai justify).....

1.58"

1.58"

ระยะขอบ

ระยะขอบ

ขวากระดาษ

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

ซ้ายกระดาษ

ให้เว้น 1.58

Keywords: (ขนาดอักษร 12 ตัวหนา) Thai font, Readability, Preferable style, Computer display (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

ให้เว้น 1.58

นิ้ว หรือ

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

นิ้ว หรือ

4.01

1. บทนำ (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

4.01

เซนติเมตร

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai justify).....

เซนติเมตร

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ, Thai justify ให้ทำแบบการแทรกเชิงอรรถ (Footnote) มาจากผู้วิจัยหลัก)

เว้นเข้า 1 ซม.
ทุกย่อหน้าแรก

2. วิธีการทดลอง (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

2.1 หัวข้อย่อย (ขนาดอักษร 14 ตัวหนา)

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai justify).....

.....

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

3.1 หัวข้อย่อย (ขนาดอักษร 14 ตัวหนา)

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai justify).....

.....

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

4. สรุปผลการทดลอง (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai justify).....

.....

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

กิตติกรรมประกาศ (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai justify).....

.....

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

เอกสารอ้างอิง (References) (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

[1](ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง (References) เป็นไปตามคู่มือการเขียนบทความของวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง).....

[2]

[3]

จัดตัวอักษรเยื้องเท่ากันทุกบรรทัด เว้นเข้า 1 ซม.

การจัดตาราง หัวตารางให้จัดวางชิดซ้ายของคอลัมน์

ตารางที่ 1. (ขนาดอักษร 12 ตัวหนา) (ชื่อตารางและเนื้อหาในตาราง ใช้อักษรขนาด 12 ตัวปกติ, Thai justify)

ตัวอย่าง

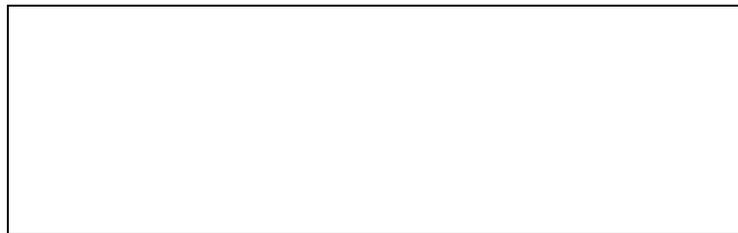
{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

ตารางที่ 1. จำนวนและร้อยละของนักศึกษาที่รับเข้ามาศึกษาในปีการศึกษา 2558 – 2561 จำแนกตามระบบการรับเข้า

ปีการศึกษา	ระบบการรับเข้า			รวม
	แอดมิชชั่น	โควตา	รับตรง	
2558	27 (15.4%)	99 (56.6%)	49 (28.0%)	175 (100%)
2559	26 (17.3%)	81 (54.0%)	43 (28.7%)	150 (100%)
2560	30 (22.1%)	58 (42.5%)	48 (35.3%)	136 (100%)
2561	18 (14.9%)	43 (35.5%)	60 (49.6%)	121 (100%)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

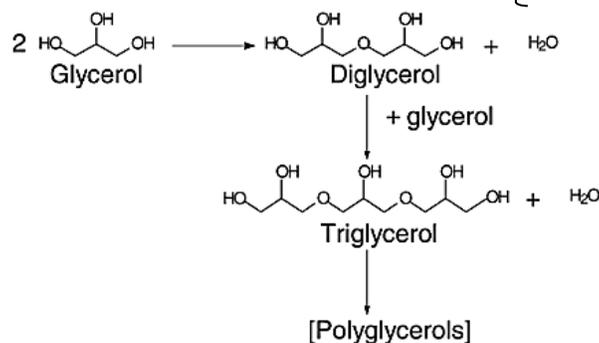
การจัดรูป (ภาพ) ให้จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์



รูปที่ 1. (ขนาดอักษร 12 ตัวหนา) (ชื่อรูปและคำบรรยาย ใช้ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ, Thai justify)

ตัวอย่าง

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ



รูปที่ 1. แสดงปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชันของกลีเซอรอล

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

การเขียน ชื่อผู้วิจัย* ผู้วิจัยร่วม (ถ้ามี) ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัย ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัยร่วม (ถ้ามี) ภาษาไทย และภาษาอังกฤษ รวมถึงการใส่ข้อมูล วันที่ส่ง วันที่แก้ไข วันที่ตอบรับ (ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวปกติ จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์)

กรณีผู้วิจัย และ ผู้วิจัยร่วม ที่อยู่หน่วยงานคนละที่กัน

ตัวอย่าง

พิมพ์ อ่อนละออ¹ และ กรกช อ่อนละออ^{2*}

Pimporn Onla-or¹ and Korakot Onla-or^{2*}

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ประเทศไทย

²วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพฯ ประเทศไทย

¹Department of Physics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

²College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 11 มีนาคม 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 11 มีนาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 13 เมษายน 2567

Received: 11 March 2024, Revised: 11 March 2024, Accepted: 13 April 2024

กรณีผู้วิจัย และ ผู้วิจัยร่วม ที่อยู่หน่วยงานเดียวกัน

ตัวอย่าง

อัจฉรา แผ้วบาง* และ สายชล สินสมบุญทอง

Achara Phaeobang* and Saichon Sinsomboonthong

ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ประเทศไทย

Department of Statistics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 20 มกราคม 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 18 มีนาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 13 เมษายน 2567

Received: 20 January 2024, Revised: 18 March 2024, Accepted: 13 April 2024

ธนภรณ์ ลาพรม ปณิตตา จันทร์พา พรชิตา ชันทอง มณิสรา คำงาม และ ภิชะก รุ่งโรจน์ชัยพร*

Thanaphron Laphrom Panthita Janpa Ponchita Khuntong Manisara Kome-ngan*

and Pesak Rungrojchaipon

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ประเทศไทย

Department of Chemistry, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 7 มกราคม 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 14 พฤษภาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 22 พฤษภาคม 2567

Received: 7 January 2024, Revised: 14 May 2024, Accepted: 22 May 2024

หมายเหตุ 1) ให้ใส่สัญลักษณ์ดอกจัน (*) ที่ผู้วิจัยหลักเท่านั้น 2) กรณีที่ผู้เขียนสังกัดหน่วยงานที่ไม่ได้อยู่ใน กรุงเทพฯ ให้ใส่ “จ.” ด้วย ตัวอย่างเช่น จ.ภูเก็ต

การใส่ข้อมูล วันที่ส่งบทความ วันที่แก้ไขบทความ วันที่ตอบรับบทความ

วันที่ส่งบทความ กับ วันที่แก้ไขบทความ โดยวันที่ส่งให้ใส่วันที่จากบทความได้ถูกส่งเข้ามาในระบบการจัดการวารสารออนไลน์ (Thai Journals Online: ThaiJO) วันที่แก้ไขให้ใส่วันที่ได้ส่งบทความที่แก้ไขแล้วหลังจากได้รับ e-mail จากหัวหน้ากองบรรณาธิการ และวันที่ตอบรับบทความ จะใส่วันที่จากหัวหน้ากองบรรณาธิการได้ตรวจสอบบทความเป็นที่เรียบร้อยแล้ว พร้อมกับเห็นเหมาะสมที่จะได้รับ การเผยแพร่บทความลงในวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ซึ่งทั้งหมดนี้ทางวารสารจะ เป็นผู้ใส่ข้อมูลวันที่ดังกล่าวไว้ในภายหลัง

การใช้เครื่องหมายทวิภาค (:) หรือ colon

สำหรับวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ขอแจ้งแนวทางการใช้เครื่องหมายทวิภาค (:) หรือ colon ประโยคภาษาไทยให้เว้นระยะ 1 ววรรค ประโยคภาษาอังกฤษให้เขียนติดกับตัวอักษรเลยไม่ต้องเว้นวรรค ตัวอย่าง

คำสำคัญ :

Keywords:

วันที่ส่งบทความ :

Received:

การจัดสมดุลสายการผลิต : กรณีศึกษา

Assembly Line Balancing: a Case Study