



FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

VOLUME 24 | ISSUE 01 | YEAR 2026

JANUARY - JUNE

FEiR

FRONTIERS IN ENGINEERING
INNOVATION RESEARCH

แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม

ISSN 3056-9273 (Online)



แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม

Frontiers in Engineering Innovation Research

ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2569

วารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม ถูกจัดตั้งอยู่ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งเป็นคณะหนึ่งเริ่มต้นจากที่จัดการศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมศาสตร์ โดยวารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม ได้ถูกปรับปรุงเปลี่ยนแปลงชื่อ ในปี พ.ศ. 2567 จากชื่อวารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมงคล ธัญบุรี ที่ถูกจัดตั้งเมื่อปี พ.ศ. 2545 วารสารฯ มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัย และพัฒนาส่งเสริมงานวิจัยพื้นฐานด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและงานวิจัยในงานพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศไทย เพื่อยกระดับความรู้ทางวิชาการให้สอดคล้องกับความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีสมัยใหม่

วัตถุประสงค์และขอบเขต

วารสารแนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม เป็นวารสารวิชาการที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer-reviewed) มุ่งเน้นเผยแพร่ผลงานวิจัยคุณภาพสูงในระดับทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ เพื่อขับเคลื่อนนวัตกรรมและอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน โดยมีขอบเขตครอบคลุมเนื้อหา ดังนี้

- **ด้านวิศวกรรมศาสตร์** ครอบคลุมวิศวกรรมไฟฟ้า เครื่องกล เคมี เกษตรโยธาและสิ่งแวดล้อม อุตสาหการ คอมพิวเตอร์ พลังงาน วัสดุ เมคคาทรอนิกส์ อิเล็กทรอนิกส์ และนวัตกรรมที่เกี่ยวข้อง
- **ด้านวิทยาศาสตร์กายภาพและประยุกต์** เน้นฟิสิกส์และเคมีประยุกต์ คณิตศาสตร์และสถิติวิศวกรรม รวมถึงวัสดุศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี
- **ด้านงานสหสาขาและนวัตกรรม** มุ่งเน้นงานวิจัยบูรณาการที่สามารถต่อยอดเชิงพาณิชย์ หรือการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริง

วารสารพร้อมเป็นเวทีกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ระหว่างนักวิจัย นักวิชาการ และผู้เชี่ยวชาญ ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ เพื่อสร้างมาตรฐานทางวิชาการที่น่าเชื่อถือและก้าวทันต่อความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี

กระบวนการพิจารณาและรูปแบบบทความ

บทความที่ส่งเข้ารับการพิจารณาจะผ่านกระบวนการประเมินคุณภาพโดยผู้ทรงคุณวุฒิมีความเชี่ยวชาญอย่างน้อย 3 ท่าน ในรูปแบบ Double-Blinded Peer Review (ไม่เปิดเผยชื่อผู้เขียนและผู้ประเมิน) เพื่อรักษามาตรฐานทางวิชาการระดับสากล โดยวารสารเปิดรับบทความทั้ง ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ที่มีความยาวระหว่าง 8 - 12 หน้า การอ้างอิงตามรูปแบบของแวนคูเวอร์ (ตามรูปแบบวารสารกำหนด) เพื่อการนำเสนอเนื้อหาที่สมบูรณ์และทรงคุณค่าสูงสุด

วารสารตีพิมพ์ 2 ฉบับต่อปี

- ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน
- ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม

ค่าธรรมเนียม:

ไม่มีการเก็บค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์ในทุกขั้นตอน

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ที่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

เว็บไซต์ www.engineering.rmutt.ac.th และ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt>

อีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th

**คณะกรรมการจัดทำวารสาร
แนวหน้าวิจัยนวัตกรรมทางวิศวกรรม****คณะกรรมการที่ปรึกษา**

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองอธิการบดีด้านวิชาการ
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศ. ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ. ดร.ประยุทธ์ อัครเอกมาลิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศ. ดร.อลงกลด แทนอมมทอง	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ. ดร.ตรีเทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ. ดร.ปรัชญนันท์ นิลสุข	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ. ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ. ดร.สมเจตน์ พิชร์พันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ. ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ศ. ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ. ดร.สุนนมาลย์ เนียมกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ. ดร.ศิริชัย แดงเอม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ. ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.ปานรวี รุ่งสกุลโรจน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รศ. ดร.ศศิริดี จันทลี

เลขานุการ

นางสาวอมรรัตน์ ยิ้มอยู่

Editorial Board Members

Consultant Board Members

President of Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Vice President of Academic Affairs
Dean of the Faculty of Engineering

Editorial Board

Prof. Dr. Pichet Limsuwan	Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi
Prof. Dr. Prayoot Akkaraekthalin	Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Prof. Dr. Alongklod Tanomtong	Faculty of Science, Khon Kaen University
Prof. Dr. Tritos Laosirihongthong	Faculty of Engineering, Thammasat University
Prof. Dr. Prachyanun Nilsook	Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc. Prof. Dr. Pathomthat Chiradeja	Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University
Assoc. Prof. Dr. Somjate Patcharaphan	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Asst. Prof. Dr. Ankana Punlor	College of Engineering, Rangsit University
Prof. Dr. Krischonme Bhumkittipich	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc. Prof. Dr. Sumonman Niamlang	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc. Prof. Dr. Sirichai Dangeam	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc. Prof. Dr. Nathabhat Phankong	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst. Prof. Dr. Panrawee Rungskunroch	Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Editor in Chief

Assoc. Prof. Dr. Sasiradee Jantasee

Secretary

Miss Amonrat Yimyoo

บทบรรณาธิการ

วารสารแนวหน้าวิจัยและนวัตกรรมทางวิศวกรรม ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม-มิถุนายน 2569 ดำเนินการโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับมาอย่างต่อเนื่อง เป็นปีที่ 24 วารสารมีความมุ่งมั่นในการเป็นเวทีกลางเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยที่มีคุณภาพ ตลอดจนส่งเสริมการบูรณาการองค์ความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ เพื่อขับเคลื่อนนวัตกรรมอย่างยั่งยืน

ท่ามกลางสถานการณ์ปัจจุบันที่ทั่วโลกให้ความสำคัญกับการขับเคลื่อนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาด การจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน และการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยในงานโครงสร้างพื้นฐาน วารสารฉบับนี้จึงนำเสนอบทความวิจัยจำนวน 6 เรื่อง ที่ตอบสนองต่อแนวโน้มดังกล่าว เริ่มจากการวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงและการใช้เทคโนโลยีระบบเฝ้าระวังอุบัติเหตุในพื้นที่งานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม ตามด้วยกลุ่มกระบวนการเคมีสีเขียวที่เน้นการเพิ่มมูลค่าลิเชอรอลด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาจากแร่ลูโคซีนธรรมชาติในประเทศเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน และการศึกษาจลนศาสตร์เคมีอันดับสองเพื่อการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ในระดับอุตสาหกรรม ตลอดจนเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อสิ่งแวดล้อม ทั้งการปรับปรุงสมบัติเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงแข็ง และการแปรรูปส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวเป็นถ่านกัมมันต์ประสิทธิภาพสูงสำหรับงานด้านการดูดซับ ซึ่งสะท้อนถึงความหลากหลายและศักยภาพของงานวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ในการพัฒนาองค์ความรู้ การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรภายในประเทศ และการสร้างนวัตกรรมที่ตอบโจทย์ความยั่งยืนในหลากหลายมิติ

กองบรรณาธิการขอขอบพระคุณคณะผู้เขียนทุกท่านที่ได้ทุ่มเทสร้างสรรค์ผลงานวิจัยอันทรงคุณค่า และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่สละเวลาในการกลั่นกรองและประเมินบทความด้วยความเข้มงวด กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าองค์ความรู้และนวัตกรรมที่เผยแพร่ในวารสารฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อนักวิชาการ นักวิจัย นักศึกษา ตลอดจนภาคอุตสาหกรรม ในการนำไปต่อยอดและประยุกต์ใช้เพื่อร่วมกันพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนต่อไป

กองบรรณาธิการ

วารสารแนวหน้าวิจัยและนวัตกรรมทางวิศวกรรม

สารบัญ

การศึกษาปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี The study of risk factors associated with accidents in industrial factory construction projects in Chonburi province โดย สิริพงศ์ สุทธิสาโรช และ กฤษฎา อนันตกาลต์	1
การเพิ่มมูลค่ากลีเซอรอลผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกและ กลีเซอรอลภายใต้การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟโดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Valorization of glycerol via esterification of oleic acid and glycerol under microwave heating using zinc oxide as a catalyst โดย พุทธิพร เทียมสินสังวร ละอองทิพย์ ยุววรรณศรี ชญานุตม์ โฆษิตานนท์ และ วีรินทร์ดา เมนส์	11
การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์จากแร่ลูโคซีนของไทยสำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทน Development of nickel catalysts supported on titanium dioxide derived from Thai leucoxene for hydrogen production via methane decomposition โดย วีรินทร์ดา เมนส์ สรพงษ์ ภาสุปรีย์ และ ชญานุตม์ โฆษิตานนท์	22
การศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลและกรดลอริกโดยใช้กรด 12-ทังสโตฟอสฟอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Kinetic study of glycerol-lauric acid esterification using 12-tungstophosphoric acid as a catalyst โดย ละอองทิพย์ ยุววรรณศรี	32
การปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งของเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกล Enhancing the solid fuel properties of durian peel through torrefaction under mechanical pressure โดย วริชรา จำยอ้น พลอยไพลิน ชุมเมฆ กิตติภา หนูเลี้ยง และ สุพาชัย เจษฎาเจิม	41
การแปรรูปส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวเป็นถ่านกัมมันต์อย่างยั่งยืนโดยใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำ Sustainable conversion of coconut tree residues into activated carbon using steam activation โดย ไชยยันต์ ไชยยะ และ เอกดนัย จันทร์ศรี	51

การศึกษาปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี

สิริพงศ์ สุทธิสารโรช^{1*} และ กฤษฎา อนันตกาลต์²

¹ ภาควิชาการบริหารงานก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย

* ผู้ประพันธ์บทความ

ที่อยู่อีเมล: suttisaroj70@hotmail.com

Received: March 27, 2026 Revised: May 20, 2026 Accepted: May 21, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดอุบัติเหตุ และแนวทางการแก้ไขปัญหาปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ โดยใช้แบบสอบถามในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากบุคลากรและแรงงานก่อสร้างในโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี ประกอบด้วย ผู้จัดการโครงการ (วิศวกรสนาม) หัวหน้าช่างคุมงาน (Foreman) ช่างไม้ ช่างเชื่อม ช่างปูน พนักงานขับ Backhoe และกรรมกร จำนวน 132 ราย ผลจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยจากสาเหตุเกิดจากการบริหารจัดการความปลอดภัยในงานก่อสร้างมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.10) โดยปัจจัยอื่น ๆ มีความสำคัญรองลงมา อันได้แก่ ปัจจัยสาเหตุเกิดจากพฤติกรรมความปลอดภัยในการก่อสร้าง แรงงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรมให้ความสำคัญเป็นอันดับสองที่จะส่งผลต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรม คือ ปัจจัยด้านการใช้เทคโนโลยีกล้องวงจรปิดเพื่อเฝ้าระวังและป้องกันอุบัติเหตุในโรงงานอุตสาหกรรม (ค่าเฉลี่ย 3.71) ปัจจัยสาเหตุเกิดจากความบกพร่องของเครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องจักรกล (ค่าเฉลี่ย 3.40) ปัจจัยสาเหตุเกิดจากสภาพแวดล้อมในการทำงาน (ค่าเฉลี่ย 3.01) ส่วนปัจจัยสาเหตุเกิดจากความบกพร่องจากแบบและรายการก่อสร้าง ได้คะแนนเฉลี่ยมาเป็นลำดับสุดท้ายจากความคิดเห็นของแรงงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรม (ค่าเฉลี่ย 3.00) ซึ่งจากการศึกษาในครั้งนี้จะช่วยให้สามารถระบุถึงปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญในการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างได้อย่างชัดเจน และสามารถนำไปสู่การกำหนดแนวทางในการป้องกันอุบัติเหตุได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ปัจจัยเสี่ยง การเกิดอุบัติเหตุ งานก่อสร้าง โรงงานอุตสาหกรรม

The study of risk factors associated with accidents in industrial factory construction projects in Chonburi province

Siripong Suttisaroj^{1*} and Kritsada Anantakarn²

¹ Construction Management, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

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

* Corresponding author.

Email address: suttisaroj70@hotmail.com

Received: March 27, 2026 Revised: May 20, 2026 Accepted: May 21, 2026

Abstract

This study aims to investigate the factors influencing construction accidents and to propose guidelines for mitigating risk factors associated with accidents in industrial construction projects in Chonburi Province. This research adopts a quantitative approach, using a questionnaire as the primary tool for data collection from personnel and construction workers in industrial factories in Chonburi Province. The sample consists of 132 respondents, including project managers (site engineers), foremen, carpenters, welders, masons, backhoe operators, and general laborers. Data were analyzed using descriptive statistics, including frequency, percentage, mean, and standard deviation. The results indicate that safety management factors have the highest influence on construction accidents (Mean = 4.10). Other contributing factors, ranked in descending order, include safety behavior in construction work, the use of surveillance technology such as closed-circuit television (CCTV) for accident prevention (Mean = 3.71), deficiencies in tools, equipment, and machinery (Mean = 3.40), and workplace environmental conditions (Mean = 3.01). The lowest-ranked factor is deficiencies in construction design and specifications (Mean = 3.00), based on the perceptions of industrial construction workers. The findings of this study contribute to the clear identification of key risk factors associated with construction accidents and can be utilized to develop effective accident prevention measures and safety management guidelines.

Keywords: Risk factors, Accidents, Construction work, Industrial factories

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยอยู่ในช่วงของการขยายตัวทางเศรษฐกิจและการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างต่อเนื่อง ทั้งในภาคอุตสาหกรรม การพัฒนาเมือง และระบบการคมนาคม ซึ่งมีบทบาทที่สำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศให้เติบโตอย่างมั่นคง [1] จึงส่งผลให้อุตสาหกรรมการก่อสร้างมีความสำคัญมากยิ่งขึ้นในฐานะกลไกสนับสนุนการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทั้งในภาครัฐและภาคเอกชน เช่น โครงการพัฒนาเขตพัฒนาเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) การก่อสร้างนิคมอุตสาหกรรม และโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ [2] ดังนั้นอุตสาหกรรมก่อสร้างจึงจำเป็นต้องอาศัยการบริหารจัดการทรัพยากรทั้งด้านแรงงาน เครื่องจักรและเทคโนโลยี

จังหวัดชลบุรี เป็นพื้นที่ที่มีบทบาทสำคัญในด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศ และเป็นพื้นที่ที่มีการขยายตัวของการก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นหนึ่งในพื้นที่หลักของโครงการพัฒนาเขตพัฒนาเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ทำให้มีการลงทุนด้านโครงสร้างเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม การขยายตัวของอุตสาหกรรมก่อสร้างมักจะมาพร้อมกับความเสี่ยงด้านความปลอดภัยในการทำงาน ซึ่งสิ่งเหล่านี้ยังคงเป็นหาที่สำคัญอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะงานก่อสร้างในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักร วัสดุอันตราย และสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงสูง [1] ข้อมูลจากกระทรวงแรงงานระบุไว้ว่า ในงานอุตสาหกรรมมีอัตราการเกิดอุบัติเหตุในระดับสูง โดยมีผู้เสียชีวิตและบาดเจ็บจากอุบัติเหตุจำนวนมาก ถึงแม้ว่าจะมีการออกกฎหมายและมาตรการด้านความปลอดภัยในการทำงานหลายฉบับ แต่ในการบังคับใช้และการปฏิบัติยังขาดความครอบคลุมและความต่อเนื่อง [3]

สาเหตุของปัญหาการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างนั้นมักเกิดจากหลายปัจจัยร่วมกัน ทั้งในด้านพฤติกรรมของแรงงานอย่างเช่น ความประมาท การไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนด และการไม่ใช้อุปกรณ์กันส่วนบุคคล รวมถึงปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม เช่น พื้นที่ทำงานไม่ปลอดภัย หรือเครื่องจักรที่ขาดการบำรุงรักษา ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อชีวิต ทรัพย์สิน และระยะเวลาดำเนินโครงการ [3] แต่หากเมื่อพิจารณาแล้วในพื้นที่ภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดชลบุรี ระยอง และจังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งเป็นพื้นที่หลักของภาคอุตสาหกรรม พบว่า ในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมมีอุบัติเหตุเป็นจำนวนมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งสะท้อนถึงข้อจำกัดของระบบ

การบริหารจัดการความปลอดภัยที่ยังขาดการบูรณาการระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงปัญหาการขาดแคลนแรงงานฝีมือและขาดความรู้ทางด้านความปลอดภัยของแรงงาน

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าในงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการศึกษาความปลอดภัยในงานก่อสร้างทั่วไป หรือวิเคราะห์อุบัติเหตุในภาครวมของอุตสาหกรรม เช่น สิทธิโชค และทวีศักดิ์ [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้าง ทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยด้านพฤติกรรมของคนงานเกี่ยวกับงานก่อสร้าง ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมในการทำงาน ปัจจัยด้านความปลอดภัยในการทำงานก่อสร้าง ปัจจัยด้านการบริหารจัดการความปลอดภัยในการทำงานก่อสร้าง โดยปัจจัยด้านความปลอดภัยในการทำงานก่อสร้างที่ส่งผลให้เกิดความไม่ปลอดภัยในโครงการก่อสร้างที่เกิดจากปัจจัยด้านความปลอดภัยในการทำงานเป็นส่วนใหญ่

สุรเดช และวรรณวิทย์ [5] ได้ศึกษาเกี่ยวกับสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยการเกิดอุบัติเหตุจากในก่อสร้าง ซึ่งอุบัติเหตุจากงานก่อสร้างยังคงเป็นปัญหาที่สร้างความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินอย่างมากและสูงกว่าอุตสาหกรรมประเภทอื่นถึงแม้ว่าแต่ละบริษัทจะมีการนำระบบบริหารจัดการด้านความปลอดภัยมาใช้บริหารจัดการเพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้นในการทำงานก่อสร้างแต่ก็ยังคงมีข้อบกพร่องทำให้ไม่สามารถบริหารจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้าง ได้แก่ ปัจจัยด้านข้อบกพร่องอยู่ในอันดับที่ 1 ปัจจัยด้านการบริหารจัดการด้านคนงบประมาณ อยู่ในอันดับ 2 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมอยู่ในอันดับ 3 ปัจจัยด้านเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์อยู่ในอันดับ 4 ซึ่งปัจจัยทั้งหมดมีแนวทางในการป้องกันอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้นกับคนงานก่อสร้างควรมีการอบรมด้านความปลอดภัยให้แก่คนงานอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง การสร้างขวัญและกำลังใจให้แก่คนงานก่อสร้างซึ่งจะทำให้คนงานเกิดความรู้สึกและให้ความร่วมมือในการป้องกันอุบัติเหตุในการทำงานได้เป็นอย่างดียิ่งขึ้น

จากการศึกษาเกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม พบว่างานวิจัยที่ผ่านมา ได้ศึกษาปัจจัยในจำนวนจำกัดและอาจจะยังไม่ครอบคลุมกับบริบทที่หลากหลายของพื้นที่ โดยเฉพาะในพื้นที่จังหวัดชลบุรีซึ่งเป็นพื้นที่อุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศ นอกจากนี้ งานวิจัยที่มีอยู่ยังมีจำนวนไม่มาก และส่วนใหญ่แล้วให้ความสำคัญ

กับปัจจัยด้านบุคคลหรือด้านเทคนิคเป็นหลัก ขณะที่ปัจจัยด้านความปลอดภัยในเชิงระบบ ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม ปัจจัยด้านการบริหารจัดการ ปัจจัยในการทำงานก่อสร้างปัจจัยด้านการใช้เทคโนโลยีกล้องวงจรปิดเพื่อเฝ้าระวังและป้องกันอุบัติเหตุในโรงงานอุตสาหกรรม ยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างครอบคลุม ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรีอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ได้องค์ความรู้ที่สอดคล้องกับบริบทในพื้นที่และสามารถนำไปใช้กำหนดเป็นแนวทางในการป้องกันอุบัติเหตุได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างในความคิดเห็นของผู้เกี่ยวข้อง เนื่องจากข้อคิดเห็นของผู้ปฏิบัติงานและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงจะสะท้อนถึงสภาพปัญหา ข้อจำกัด และบริบทของการทำงานที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งอาจจะแตกต่างจากข้อมูลเชิงเอกสาร อันจะนำไปสู่การระบุปัจจัยเสี่ยงที่ครอบคลุมและสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมในการทำงานได้อย่างแท้จริง

งานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี โดยอาศัยความคิดเห็นของผู้ที่เกี่ยวข้อง เพื่อระบุถึงปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญ ดังนั้น การศึกษาปัจจัยเสี่ยงดังกล่าวมีความสำคัญต่อการบริหารจัดการความเสี่ยงในงานก่อสร้างเป็นอย่างยิ่ง ตลอดจนนำไปสู่แนวทางในการป้องกันอุบัติเหตุอย่างมีประสิทธิภาพ

2. วัตถุประสงค์

2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี

2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยเรื่อง การศึกษาปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรีเป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) ด้วยการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถาม

3.1 ประชากร

ประชากรเป็นบุคลากรหรือแรงงานในหน่วยงานก่อสร้างเป็นบุคคลที่มีหน้าที่ปฏิบัติงานในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี จำนวน

200 คน ข้อมูลจากรายงานสถานการณ์แรงงานจังหวัดชลบุรี [2]

3.2 กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างเป็นบุคลากรหรือแรงงานในหน่วยงานก่อสร้างเป็นบุคคลที่มีหน้าที่ปฏิบัติงานในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี ประกอบด้วยผู้จัดการโครงการ (วิศวกรสนาม) หัวหน้าช่างคุมงาน (Foreman) ช่างไม้ ช่างเชื่อม ช่างปูน พนักงานขับ Backhoe และกรรมกร โดยวิธีการสุ่มตัวอย่างง่าย (Simple Random Sampling) ซึ่งเป็นการเลือกกลุ่มตัวอย่างโดยให้โอกาสการถูกเลือกกับประชากรทั้งหมดอย่างเท่าเทียมด้วยวิธีการใช้ตารางเลขสุ่มโดยมีเลขกำกับรายชื่อทั้งหมดของประชากร คำนวณกลุ่มตัวอย่างที่ต้องใช้ด้วยสมการของทาโร่ ยามาเน่ (Taro Yamane) ใช้ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และกำหนดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ร้อยละ 5 จนได้กลุ่มตัวอย่างที่จะสอบถามทั้งหมดจำนวน 132 ราย ดังสมการที่ 1 ดังนี้

$$n = \frac{N}{1+N(e)^2} \quad (1)$$

โดยที่ n คือ จำนวนของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย
 N คือ จำนวนประชากรทั้งหมดที่ใช้ในการวิจัย
 e คือ ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (กำหนดให้ $e = 0.05$)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นแบบสอบถามปลายปิด (Close Ended Questionnaire) ซึ่งเป็นข้อมูลทั่วไปกับผู้ตอบแบบสอบถาม โดยให้เลือกตอบข้อมูลเกี่ยวกับ เพศ อายุ ระดับการศึกษา สถานภาพ ประสบการณ์การทำงาน และตำแหน่งหน้าที่ความรับผิดชอบ

ส่วนที่ 2 เป็นแบบสอบถามปลายปิด (Close Ended Questionnaire) เพื่อให้ผู้ตอบแบบสอบถามแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับสาเหตุของปัจจัยเสี่ยงต่างๆ ที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีลักษณะคำถามเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Likert Scale) มีเกณฑ์การประเมินระดับความคิดเห็น 5 ระดับ ดังนี้ 1 หมายถึง สาเหตุของปัจจัยเสี่ยงที่เกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมในระดับน้อยที่สุด 2 หมายถึง สาเหตุของปัจจัยเสี่ยงที่เกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมในระดับ

น้อย 3 หมายถึง สาเหตุของปัจจัยเสี่ยงที่เกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมในระดับปานกลาง 4 หมายถึง สาเหตุของปัจจัยเสี่ยงที่เกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมในระดับมาก และ 5 หมายถึง สาเหตุของปัจจัยเสี่ยงที่เกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมในระดับมากที่สุด

ส่วนที่ 3 เป็นแบบสอบถามปลายเปิดเพื่อให้ผู้ตอบแบบสอบถามเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหาปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี

3.4 วิธีสร้างเครื่องมือการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิจัยครั้งนี้จากแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรม จำนวน 5 ด้าน จากนั้นนำมาปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าวไปสร้างเครื่องมือหรือแบบสอบถาม แล้วนำไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ประกอบไปด้วยอาจารย์ภาควิชาการบริหารงานก่อสร้างจำนวน 3 ท่าน และผู้จัดการโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างจำนวน 2 ท่าน เพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้อง และเพื่อความครอบคลุมเชิงเนื้อหา และความเหมาะสมกับข้อคำถาม (Content Validity) แล้วนำแบบสอบถามที่ผ่านความเห็นชอบจากผู้เชี่ยวชาญมาคำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Index of Item-Objective Congruence หรือ IOC) โดยผู้เชี่ยวชาญจะพิจารณาว่าข้อคำถามมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์แต่ละข้ออย่างไร โดยให้คะแนน +1 หรือ 0 หรือ -1 ดังนี้ +1 หมายถึง แน่ใจว่าข้อคำถามนั้นสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัย 0 หมายถึง ไม่แน่ว่าข้อคำถามนั้นสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัย -1 หมายถึง แน่ใจว่าข้อคำถามไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัย โดยค่า IOC ดังสมการที่ 2 ดังนี้

$$IOC = \frac{\sum R}{N} \quad (2)$$

โดยที่ IOC คือ ดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย

R คือ ผลรวมของคะแนนความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ

N คือ จำนวนของผู้เชี่ยวชาญ

โดยเกณฑ์ของการพิจารณาค่า IOC ได้มากกว่าหรือเท่ากับ 0.50 แสดงว่าข้อคำถามสอดคล้องกับข้อคำถามและวัตถุประสงค์ของการวิจัย แต่ถ้าหากค่า IOC ได้น้อยกว่า 0.50 แสดงได้ว่าข้อคำถามของการวิจัยไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ ต้องปรับปรุงแก้ไขต่อไป ผู้วิจัยได้นำเสนอแบบสอบถามที่มีข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญและนำไปปรับปรุงแก้ไขแล้วนำไปสอบถามกับกลุ่มตัวอย่างใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างจริงเพื่อมาทดลองจำนวน 30 ชุด แล้วนำผลที่ได้มาคำนวณหาความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม (Reliability) โดยหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค เท่ากับ 0.74 ซึ่งมากกว่า 0.70 ทำให้เครื่องมือดังกล่าวมีความเชื่อมั่นและสามารถนำแบบสอบถามไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลต่อไปได้

3.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการเก็บรวบรวมข้อมูลครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากแรงงานในโครงการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี จำนวน 200 ชุด โดยแบ่งประชากรกลุ่มบุคลากรหรือแรงงานในหน่วยงานก่อสร้างเป็นบุคคลที่มีหน้าที่ปฏิบัติงาน ประกอบด้วย ผู้จัดการโครงการ (วิศวกรสนาม) หัวหน้าช่างคุมงาน (Foreman) ช่างไม้ ช่างเชื่อม ช่างปูน พนักงานขับ Backhoe และกรรมกร และได้แบบตอบรับจำนวน 132 ชุด

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) ในการประมวลผลของข้อมูล โดยได้ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลตามการวิเคราะห์ทางสถิติ 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยใช้สถิติความถี่ (Frequency) และร้อยละ (Percentage)

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงที่เกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี โดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์เหมือนหรือแตกต่างของปัจจัยเสี่ยงที่เกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี โดยใช้การทดสอบทางสถิติ t-test การวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-way ANOVA) หรือการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation)

ตามความเหมาะสมของข้อมูลโดยกำหนดค่านัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 แล้วนำผลของค่าสถิติของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์จากองค์ประกอบนำมาเปรียบเทียบกับปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและตั้งชื่อองค์ประกอบที่ได้พร้อมทั้งวิเคราะห์หาค่าของความเชื่อมั่นในแต่ละองค์ประกอบ และทำการวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบเพื่อนำไปจัดกลุ่มปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี

4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การศึกษาปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี ผู้วิจัยได้ส่งแบบสอบถามไปทั้งหมด 132 ชุด และได้รับแบบสอบถามกลับมาคิดเป็นร้อยละ 100 โดยผู้วิจัยได้นำมาวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์ข้อมูลลักษณะทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามโดยใช้สถิติความถี่ (Frequency) และร้อยละ (Percentage) พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นชาย จำนวน 95 ราย คิดเป็นร้อยละ 71.97 มีอายุระหว่าง 31-40 ปี จำนวน 25 ราย คิดเป็นร้อยละ 49.24 ระดับการศึกษาจบ ปวส. จำนวน 43 ราย คิดเป็นร้อยละ 31.06 สถานภาพสมรส จำนวน 75 ราย ร้อยละ 48.48 มีประสบการณ์การทำงาน 6 - 10 ปี ร้อยละ 36.36 ส่วนใหญ่เป็นกรรมกร จำนวน 49 คิดเป็นร้อยละ 37.12 และแรงงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เคยเข้าร่วมการฝึกอบรม จำนวน 85 คน คิดเป็นร้อยละ 64.39

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี เมื่อพิจารณาปัจจัยรายด้าน มีข้อสรุปดังนี้

1. ปัจจัยด้านการบริหารจัดการความปลอดภัยในงานก่อสร้าง พบว่า ระดับปัจจัยด้านการบริหารจัดการความปลอดภัยในงานก่อสร้าง มีระดับความคิดเห็นในระดับมาก มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 4.10 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.56 เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ พบว่า ในลำดับแรก ได้แก่ ปัจจัยการตรวจสอบและติดตามความปลอดภัยในการทำงานอย่างสม่ำเสมอ มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 4.70 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.47 รองลงมาได้แก่ ปัจจัยการปฏิบัติงานโดยยึดหลักความปลอดภัยเป็นสำคัญ มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 4.63 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบน

มาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.67 และในลำดับสุดท้าย ได้แก่ ปัจจัยการบริหารงานโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานเป็นหลัก มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับมากที่สุดมีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 3.31 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.60 ตามลำดับ

2. ปัจจัยด้านพฤติกรรมความปลอดภัยในการก่อสร้าง พบว่า ระดับปัจจัยที่เกิดจากพฤติกรรมความปลอดภัยในการก่อสร้างมีระดับความคิดเห็นในระดับมาก มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 3.72 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.48 เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ พบว่า ในลำดับแรก ได้แก่ ปัจจัยการปฏิบัติงานในที่สูงโดยไม่สวมเข็มขัดนิรภัยหรืออุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 4.52 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.50 รองลงมาได้แก่ ปัจจัยการไม่ตรวจสอบสภาพความพร้อมของเครื่องมือและเครื่องจักรก่อนใช้งาน มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 4.51 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.50 และในลำดับสุดท้าย ปัจจัยการโยนวัสดุหรืออุปกรณ์ให้เพื่อนร่วมงานแทนการส่งมอบอย่างปลอดภัย มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับน้อย มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 2.00 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.43 ตามลำดับ

3. ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมในการทำงานก่อสร้าง พบว่า ระดับปัจจัยที่เกิดจากสภาพแวดล้อมในการทำงานก่อสร้างมีระดับความคิดเห็นในระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 3.01 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.43 เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ พบว่า ในลำดับแรก ได้แก่ ปัจจัยการทำงานในบริเวณที่มีควัน ฝุ่น หรือไอระเหยหนาแน่น โดยไม่มีอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 4.39 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.48 รองลงมา ได้แก่ การทำงานในพื้นที่ที่มีเครื่องจักรขนาดใหญ่หรืออุปกรณ์ทุนแรงจำนวนมาก มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 3.84 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.68 และในลำดับสุดท้าย การทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีเสียงดังโดยไม่มีอุปกรณ์ป้องกันการได้ยิน มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับน้อย มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 2.24 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.57 ตามลำดับ

4. ปัจจัยด้านความบกพร่องจากแบบและรายการก่อสร้าง พบว่า ระดับปัจจัยที่เหตุเกิดจากความบกพร่องจากแบบและรายการก่อสร้างมีระดับความคิดเห็นในระดับน้อย มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 3.00 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.26 เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ พบว่า ในลำดับแรก ได้แก่ การออกแบบองค์ประกอบด้านความปลอดภัย เช่น รวากันตก ไม่เป็นไปตามระยะหรือข้อกำหนดมาตรฐาน มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 3.31 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.28 รองลงมา ได้แก่ การปฏิบัติงานที่ไม่เป็นไปตามแบบหรือแผนงานที่ได้รับอนุมัติ มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 3.21 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.40 และในลำดับสุดท้าย ปัจจัยการจัดทำ Shop Drawing ที่ขาดความละเอียด ชัดเจน หรือมีความคลุมเครือ มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับน้อย มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 2.01 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.12 ตามลำดับ

5. ปัจจัยด้านการใช้เทคโนโลยีกล้องวงจรปิดเพื่อเฝ้าระวังและป้องกันอุบัติเหตุในโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ระดับปัจจัยที่เกิดจากความบกพร่องของเครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องจักรกล มีระดับความคิดเห็นในระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 3.40 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.57 เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ พบว่า ในลำดับแรก ได้แก่ ปัจจัยของเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติงานไม่ได้มาตรฐานด้านความปลอดภัย มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 4.50 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.58 รองลงมา ได้แก่ ปัจจัยของเครื่องจักรมีสภาพชำรุด เสื่อมสภาพ หรือไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 4.01 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.62 และในลำดับสุดท้ายปัจจัยไม่มีการฝึกอบรมการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์แก่คนงานก่อสร้างอย่างเหมาะสม มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 3.21 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.97 ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงที่เกิดอุบัติเหตุในโรงงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี ในภาพรวม พบว่า ปัจจัยด้านการบริหารจัดการความปลอดภัยในงานก่อสร้างมีค่าเฉลี่ยสูงสุด (Mean = 4.10, SD = 0.56) รองลงมา คือ ปัจจัยด้านพฤติกรรม

ความปลอดภัย (Mean = 3.72, SD = 0.48) และปัจจัยด้านเทคโนโลยี/เครื่องจักร (Mean = 3.40, SD = 0.57) ตามลำดับ ขณะที่ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม (Mean = 3.01, SD = 0.43) และด้านแบบก่อสร้าง (Mean = 3.00, SD = 0.57) มีค่าเฉลี่ยในระดับใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และระดับความสำคัญของปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี ในภาพรวม

ลำดับ	ปัจจัย	ความสำคัญ		
		Mean	SD	ระดับ
1	ปัจจัยด้านการบริหารจัดการความปลอดภัยในงานก่อสร้าง	4.10	0.56	มาก
2	ปัจจัยด้านพฤติกรรมความปลอดภัยในการก่อสร้าง	3.72	0.48	มาก
3	ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมในการทำงานก่อสร้าง	3.01	0.43	มาก
4	ด้านความบกพร่องจากแบบและรายการก่อสร้าง	3.00	0.57	มาก
5	ด้านการใช้เทคโนโลยีกล้องวงจรปิดเพื่อเฝ้าระวังและป้องกันอุบัติเหตุในโรงงานอุตสาหกรรม	3.40	0.57	ปานกลาง
รวม		3.41	0.48	มาก

SD = Standard Deviation

จากตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ พบว่า ปัจจัยด้านการบริหารจัดการความปลอดภัยในงานก่อสร้าง เป็นปัจจัยหลักที่มีระดับสูงที่สุด สะท้อนให้เห็นว่าการกำกับดูแลด้านความปลอดภัยการวางแผนงาน การควบคุมมาตรฐานความปลอดภัยในงานก่อสร้างมีบทบาทที่สำคัญในการเกิดอุบัติเหตุในก่อสร้าง และอาจเนื่องจากการดำเนินงานก่อสร้างในโรงงานอุตสาหกรรมมีลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนมีการใช้เครื่องจักรหนัก และมีผู้ปฏิบัติงานหลายฝ่ายร่วมกัน จึงจำเป็นต้องอาศัยระบบการบริหารความปลอดภัยที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมและลดความเสี่ยงในการทำงานด้านความปลอดภัย ทั้งนี้ ผลจากการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ

ทฤษฎี และคณะ [6] ที่พบว่า ปัจจัยด้านการจัดการความปลอดภัยในงานก่อสร้างเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อการลดอุบัติเหตุในงานก่อสร้าง และสอดคล้องกับการศึกษาวิจัยของ จตุพล และคณะ [7] ที่ระบุว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดอุบัติเหตุในการก่อสร้าง คือ พฤติกรรมของที่ส่งผลต่อความปลอดภัยในการทำงานก่อสร้างและในการจัดการด้านความปลอดภัยของเครื่องจักรหรือเครื่องมือและสภาพหรือสิ่งแวดล้อมที่เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้าง อย่างไรก็ตามหากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในต่างประเทศ พบว่า มีการศึกษาหลายงานที่มักให้ความสำคัญกับปัจจัยทางด้านอุปกรณ์ ด้านเทคนิค และด้านสภาพแวดล้อมในการทำงาน เช่น เครื่องจักร หรือมาตรฐานอุปกรณ์ และการใช้เทคโนโลยีด้านความปลอดภัย เนื่องจากประเทศพัฒนาแล้วจะมีระบบของการบริหารจัดการแรงงานและกฎหมายความปลอดภัยที่เข้มงวดกว่า ขณะที่บริบทของจังหวัดชลบุรีที่เป็นพื้นที่อุตสาหกรรมและเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (EEC) มีการขยายตัวของโครงการก่อสร้างอย่างรวดเร็วและมีแรงงานจำนวนมาก ส่งผลให้การบริหารจัดการด้านความปลอดภัยในงานก่อสร้าง และการควบคุมมาตรฐานการปฏิบัติงาน กลายเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการป้องกันอุบัติเหตุในการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าว

6. ผลการทดสอบสมมติฐาน ที่ว่าปัจจัยด้านประชากรศาสตร์ของบุคลากรหรือแรงงานในหน่วยงานก่อสร้างเป็นบุคคลที่มีหน้าที่ปฏิบัติงานในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี ที่แตกต่างกันมีผลต่อระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี สรุปได้ดังนี้ 1) เพศ พบว่า เพศที่ต่างกันมีผลต่อระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.05$) 2) อายุ พบว่า อายุที่ต่างกันมีผลต่อระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.05$) 3) ระดับการศึกษา พบว่า ระดับการศึกษาที่ต่างกันมีผลต่อระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.05$) 4) ประสบการณ์การทำงาน พบว่า ประสบการณ์ที่ต่างกันมีผลต่อระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.05$) 5) การเข้ารับการฝึกอบรม พบว่า การได้รับการฝึกอบรมด้าน

ความปลอดภัยที่ต่างกันมีผลต่อระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.05$)

7. การวิเคราะห์ตัวแปรจัดประเภทของตัวแปรที่มีความเหมือนกันให้อยู่ในกลุ่มด้วยกัน โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยวิธีสกัดปัจจัย (Principal Component Analysis: PCA) และตรวจสอบความถูกต้องด้วย ค่า Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) ซึ่งถ้าค่า KMO สูงกว่า 0.5 แสดงว่าข้อมูลมีความเหมาะสมในกลุ่ม ผลการตรวจสอบข้อมูลเบื้องต้น พบว่า ตัวแปรทุกตัวมีการแจกแจงปกติ และมีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ที่คำนวณจากสูตรของเพียร์สัน จำนวน 40 ตัวแปร

จากการศึกษา พบว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบของปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี ด้วยวิธีสกัดปัจจัย (Principal Component Analysis : PCA) ค่า Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลพบว่า ค่า KMO มีค่าเท่ากับ 0.925 ซึ่งมากกว่า 0.50 แสดงว่าข้อมูลมีความเหมาะสมในระดับที่ดีมากสำหรับการวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบ ขณะที่ผลการทดสอบ Bartlett's test of Sphericity พบว่า มีค่าไคสแควร์เท่ากับ 9217.241 และมีค่า นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ($p < 0.01$) แสดงให้เห็นว่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์ไม่เป็นไปตามเมทริกซ์เอกภาพ ซึ่งหมายความว่าตัวแปรทั้ง 40 ตัวแปร มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ และเหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของเมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

ตัวแปร	KMO		Bartlett's test	
	ค่าที่เหมาะสม	ค่าที่ได้	ค่าที่เหมาะสม	ค่าที่ได้
40 ตัวแปร	มากกว่า 0.05 (> 0.9 = ดีมาก)	0.925	p-Value) < 0.05	< 0.01

8. แนวทางในการแก้ไขปัญหา ปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี จากการศึกษาค้นคว้า พบว่า แนวทางที่สำคัญในการแก้ไขปัญหาปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรม เป็นการลดอุบัติเหตุหรือเป็นการบริหารจัดการทางด้านความปลอดภัย

อย่างเป็นระบบ นอกจากนี้ในการแก้ไขปัญหาการเกิดอุบัติเหตุจำเป็นจะต้องมีการกำหนดนโยบายและการจัดทำแผนงานก่อสร้างเพื่อสร้างความพร้อมในการควบคุมความเสี่ยงที่เหมาะสมกับลักษณะของงาน เช่น การตรวจสอบและการบำรุงรักษาเครื่องจักร การจัดระเบียบพื้นที่ในงานก่อสร้างเพื่อให้เกิดความปลอดภัยและจำเป็นต้องมีการฝึกอบรมให้กับผู้ปฏิบัติงานก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานมีความรู้ความเข้าใจและสามารถนำไปปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้องตามหลักของความปลอดภัย จึงจะช่วยลดความเสี่ยงและป้องกันการเกิดอุบัติเหตุในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยสรุป ในการแก้ไขปัญหาการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องอาศัยการบูรณาการทั้งด้านการบริหารจัดการความปลอดภัย มาตรการควบคุมเชิงป้องกัน การฝึกอบรมบุคลากร และการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันอุบัติเหตุและยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยในการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดชลบุรีอย่างยั่งยืน

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี พบว่าปัจจัยเสี่ยงที่เกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรีมากที่สุดคือ ปัจจัยด้านการบริหารจัดการความปลอดภัยในงานก่อสร้าง และปัจจัยด้านพฤติกรรมความปลอดภัยในการก่อสร้างตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าตัวแปรที่มีน้ำหนักองค์ประกอบสูงสุด สำหรับปัจจัยด้านความบกพร่องจากแบบและรายการก่อสร้าง การกำหนดและส่งเสริมให้ใช้วิธีการทำงานที่ปลอดภัยตามมาตรฐานที่กำหนด และการตรวจสอบและติดตามความปลอดภัยในการทำงานอย่างสม่ำเสมอ และแนวทางการแก้ไขปัญหาปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างของโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดชลบุรี ควรมีการลดปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องอาศัยการบูรณาการทั้งด้านการบริหารจัดการความปลอดภัย มาตรการควบคุมเชิงป้องกัน การฝึกอบรมบุคลากร และการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันอุบัติเหตุและยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยในการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดชลบุรีอย่างยั่งยืน

6. ข้อเสนอแนะที่ได้จากการศึกษาข้อมูล

จากผลการวิจัยศึกษาผลการวิเคราะห์ข้อมูลระดับความสำคัญของปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้าง กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมภาคตะวันออก ผลการวิจัยโดยสรุปแนวทางในการบริหารจัดการงานด้านความปลอดภัยในงานก่อสร้าง โดยการกำหนดกรอบนโยบายงานด้านความปลอดภัยในการกำหนดบทบาทหน้าที่ที่กรอบพระราชกำหนดที่เกี่ยวข้องกับนโยบายในสายงานด้านการบริหารความปลอดภัย มาตรการการจัดฝึกอบรมงานด้านอาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อม การประกาศกรอบแนวทางหรือนโยบายด้านความปลอดภัยที่ชัดเจน รวมถึงสุขภาพอนามัย การกำหนดเป้าหมายของงานในด้านความปลอดภัย การตรวจสอบและประเมินประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน เช่น การปฏิบัติตามกฎหมาย ระเบียบข้อบังคับ และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย การสร้างวัฒนธรรมองค์กรให้เกิดความเข้าใจต่อการบริหารจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน การอบรมงานด้านความปลอดภัยก่อนเวลาทำงานและการนำเทคโนโลยีหรือแอปพลิเคชันต่างๆ ในปัจจุบันมีหลายโปรแกรมที่แพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งนี้เพื่อใช้ในการประมวลผล การเก็บสถิติ การติดตามข่าวสาร การติดตามแผนพัฒนาระบบความปลอดภัย ในการปรับแผนการบริหารจัดการให้เหมาะสมกับสถานการณ์ในโลกปัจจุบัน

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือจากโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี ที่สนับสนุนการเก็บรวบรวมข้อมูลและให้ความช่วยเหลือในส่วนที่ผู้วิจัยยังขาดประสบการณ์ รวมถึงความช่วยเหลือจากผู้เชี่ยวชาญที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการความช่วยเหลือจากผู้เชี่ยวชาญที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในงานก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี อันเป็นข้อมูลสำคัญต่อการดำเนินการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Eastern Economic Corridor (EEC). Progress report on the eastern economic corridor (EEC) development project. Bangkok: Eastern Economic Corridor Office (EECO); 2022.
- [2] Provincial Labour Office Chonburi. Chonburi labour situation report, quarter 3, 2024. Chonburi: Provincial Labour Office Chonburi; 2024.
- [3] Department of Labour Protection and Welfare. Report on the occupational accident situation in Thailand. Bangkok: Ministry of Labour; 2023.
- [4] Sunthomopas S, Wongyuen T. Factors affecting quality control of high-rise building construction in Bangkok: a case study in huai khwang district. in Huai Khwang District. The 26th National Convention on Civil Engineering. 2021;26(0):CEM-07.
- [5] Nosungnoen S, Taemthong W. Causes of accident of large building construction projects. The 26th National Convention on Civil Engineering. 2021;26(0):CEM-15.
- [6] Khunasangiamporn H, Kongsong W, Snongtaweeporn T, Pooworakulchai C, Charoenrien S. Preventive measures and safety management in construction a case study of construction work in nonthaburi municipality. *Journal of Dhamma for Life*. 2024;30(2):234-55
- [7] Phisitsak J, Phromsila M, Kittisuntaropas K. Factors enhancing safety and safety behavior in the work of construction workers. *Ladkrabang Engineering Journal*. 2018;35(1):8-15.

การเพิ่มมูลค่าลิกซ์เซอรอลผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกและ ลิกซ์เซอรอลภายใต้การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟโดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

พทุธิพร เทียมสินสังวร¹ ละอองทิพย์ ยุววรรณศรี¹ ชญานุตม์ โฆษิตานนท์² และ วีรินทร์ดา เมณส์^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ.

ที่อยู่อีเมล: weerinda.a@en.rmutt.ac.th

Received: April 22, 2026 Revised: June 4, 2026 Accepted: June 9, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกกับลิกซ์เซอรอลเพื่อผลิตลิกซ์เซอไรด์มูลค่าเพิ่มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยมีมุ่งประเมินผลของรูปแบบการให้ความร้อน อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น และอุณหภูมิ ต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกและร้อยละผลได้ของโมโนลิกซ์เซอไรด์ (MG yield) ผลการทดลองพบว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของ MG ได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไป โดยสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโมโนลิกซ์เซอไรด์คือ อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อลิกซ์เซอรอล เท่ากับ 1:4 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO เท่ากับ 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก 63.1% ค่าการเลือกเกิดของ MG 75.4% และค่า MG yield 47.6% ภายใต้สภาวะเดียวกัน ซึ่งระบบกวนเชิงกลทั่วไปให้ค่า MG yield เพียง 28.1% นอกจากนี้ อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อลิกซ์เซอรอล 1:4 ให้ค่า MG yield สูงกว่าอัตราส่วนอื่นที่ศึกษา สะท้อนว่าการใช้ลิกซ์เซอรอลส่วนเกินในระดับที่เหมาะสมช่วยส่งเสริมการเกิดผลิตภัณฑ์เป้าหมาย ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิเป็น 180 และ 200 °C แม้ช่วยเพิ่มค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก แต่ทำให้ค่า MG yield ลดลงเหลือ 40.5 และ 38.9% ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากการเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องของ MG ไปเป็น DG และ TG ดังนั้น การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อัตราส่วนโมล 1:4 อุณหภูมิ 160 °C และเวลา 30 นาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโมโนลิกซ์เซอไรด์จากลิกซ์เซอรอลภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา

คำสำคัญ: ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน กรดโอเลอิก ลิกซ์เซอรอล ซิงค์ออกไซด์ โมโนลิกซ์เซอไรด์

Valorization of glycerol via esterification of oleic acid and glycerol under microwave heating using zinc oxide as a catalyst

Puttiporn Thiamsinsangwon¹, La-ongthip Yuwansri¹, Chayanoot Kositanont² and Weerinda Mens^{1*}

¹ Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² National Metal and Materials Technology Center (MTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA)

* Corresponding author.

Email address: weerinda.a@en.rmutt.ac.th

Received: April 22, 2026 Revised: June 4, 2026 Accepted: June 9, 2026

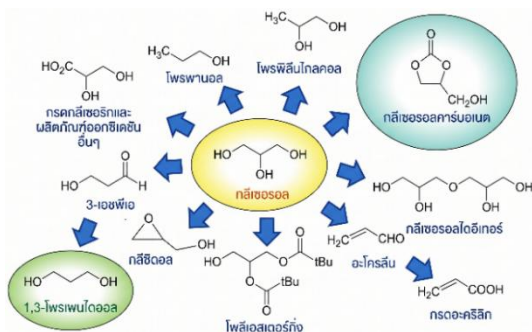
Abstract

This study investigated the esterification of oleic acid with glycerol for value-added glycerides production of using zinc oxide as the catalyst, with emphasis on evaluating the effects of heating mode, reactant molar ratio, and reaction temperature on oleic acid conversion and monoglyceride yield (MG yield) were evaluated. The results showed that microwave heating clearly enhanced MG yield compared with a conventional mechanically stirred reactor. The suitable condition for monoglyceride production was an oleic acid-to-glycerol molar ratio of 1:4, a ZnO catalyst loading of 0.5 wt.% based on oleic acid, a reaction temperature of 160 °C, and a reaction time of 30 min. Under this condition, oleic acid conversion, MG selectivity and MG yield were 63.1%, 75.4%, and 47.6%, respectively. In contrast, the conventional mechanically stirred reactor provided an MG yield of only 28.1% under the same condition. In addition, the oleic acid-to-glycerol molar ratio of 1:4 gave a higher MG yield than the other investigated molar ratios, indicating that an appropriate excess of glycerol promoted the formation of the target product. Although increasing the reaction temperature to 180 and 200 °C enhanced oleic acid conversion, the MG yield decreased to 40.5% and 38.9%, respectively, possibly due to the acceleration of consecutive reactions from MG to diglyceride (DG) and triglyceride (TG). Therefore, microwave-assisted esterification at a molar ratio of 1:4, 160 °C, and 30 min was identified as a suitable condition for monoglyceride production from glycerol under the investigated conditions.

Keywords: Esterification, Oleic acid, Glycerol, Zinc oxide, Monoglyceride

1. บทนำ

กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้สำคัญจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล และมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวภาพ ทำให้การนำกลีเซอรอลไปใช้ประโยชน์ในรูปของผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มกลายเป็นประเด็นวิจัยที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์ กระบวนการและการพัฒนาแนวทางผลิตภัณฑ์ชีวภาพชนิดใหม่ [1] เส้นทางการเพิ่มมูลค่ากลีเซอรอลมีความหลากหลาย ครอบคลุมทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดีไฮเดรชัน คาร์บอนเนชัน และเอสเทอริฟิเคชัน ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยกลีเซอรอลสามารถเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มหลายชนิด เช่น 1,3-propanediol, glycerol carbonate, glycidol, acrolein และสารกลุ่มกลีเซอไรด์ ทั้งนี้เส้นทางการแต่ละแบบให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติและการใช้งานแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา สภาพการดำเนินปฏิกิริยา และวิธีการให้ความร้อนที่ใช้ ดังนั้น การเลือกเส้นทางปฏิกิริยาที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเพิ่มมูลค่ากลีเซอรอลในเชิงอุตสาหกรรม หนึ่งในแนวทางที่มีศักยภาพคือการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้เป็นโมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride, MG) ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมัน เนื่องจากโมโนกลีเซอไรด์เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอาง เกษษณภัณฑ์ และระบบอิมัลชันต่าง ๆ โดยเฉพาะในฐานะอิมัลซิไฟเออร์ [2, 3]



รูปที่ 1 เส้นทางหลักของการเปลี่ยนกลีเซอรอลไปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มผ่านปฏิกิริยาประเภทต่าง ๆ

อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์จากกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลยังมีข้อจำกัดหลายประการ ทั้งจากลักษณะของระบบที่มีความหนืดสูง ปัญหาเรื่องการถ่ายโอนมวล การถ่ายเทความร้อนที่ไม่

รวดเร็ว และการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็นไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ซึ่งทำให้การควบคุมค่าการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (selectivity) ไปยังผลิตภัณฑ์เป้าหมายทำได้ยาก งานก่อนหน้ารายงานว่า การเกิดโมโนกลีเซอไรด์ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา ความเป็นกรด-เบสของพื้นผิว สัดส่วนสารตั้งต้น และเวลาการทำปฏิกิริยา [4, 5]

ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ชนิดเนื้อผสมและตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของสังกะสีได้รับความสนใจในปฏิกิริยานี้ เนื่องจากมีความเสถียรเชิงความร้อน แยกออกจากระบบได้ง่าย และสามารถให้ตำแหน่งออกฤทธิ์ที่ช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของกรดไขมันกับหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มีรายงานว่าตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO รองรับบนตัวพาสามารถให้ค่าการเปลี่ยนแปลง (conversion) ของกรดโอเลอิกในระดับสูงและให้ค่า selectivity ต่อโมโนกลีเซอไรด์ที่น่าสนใจ จึงสะท้อนว่า ZnO เป็นตัวเร่งที่มีศักยภาพสำหรับระบบกรดโอเลอิก-กลีเซอรอล [6, 7] นอกจากชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว วิธีการให้ความร้อนยังเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพของกระบวนการให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟได้รับความสนใจมากขึ้นในงานแปรรูปกลีเซอรอลและปฏิกิริยาอินทรีย์หลายประเภท เนื่องจากสามารถถ่ายเทพลังงานสู่สารตั้งต้นได้อย่างรวดเร็ว ให้ความร้อนเชิงปริมาตร ลดเวลาที่ระบบต้องใช้เพื่อเข้าสู่สภาวะปฏิกิริยา และในหลายกรณีช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาตลอดจนปรับปรุงผลได้ผลิตภัณฑ์ (yield) และ selectivity ของผลิตภัณฑ์ ในปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระสูง [8] Gole และ Gogate รายงานว่าการใช้ไมโครเวฟช่วยเร่งปฏิกิริยาและลดเวลาการดำเนินกระบวนการได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบทั่วไป [9] อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวมุ่งเน้นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าการเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นหลัก ขณะที่ข้อมูลเกี่ยวกับการควบคุมการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์กลีเซอไรด์แต่ละชนิด โดยเฉพาะ MG และ DG ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง ยังมีรายงานงานวิจัยค่อนข้างจำกัด นอกจากนี้ยังไม่พบการศึกษาที่เปรียบเทียบผลของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟและการให้ความร้อนแบบกวนเชิงกลทั่วไปภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO สำหรับระบบกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลอย่างเป็นระบบ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO

ต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์กลีเซอรอล เพื่อประเมินศักยภาพในการควบคุมการเกิด MG และ DG ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เป้าหมายที่มีมูลค่าสูง

จากข้อมูลดังกล่าว การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับกลีเซอรอล โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่ม conversion และส่งเสริมการเกิดผลิตภัณฑ์โมโนกลีเซอรอล ขณะเดียวกันก็ชะลอการเกิดผลิตภัณฑ์ขั้นสูงอย่างไตรกลีเซอรอล งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาปฏิกิริยาระหว่างกรดโอเลอิกกับกลีเซอรอลภายใต้คลื่นไมโครเวฟโดยใช้ ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พร้อมเปรียบเทียบกับระบบให้ความร้อนแบบทั่วไป และประเมินผลของสภาวะปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่า conversion ค่า selectivity และ ค่า yield ของผลิตภัณฑ์ MG ที่ได้

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและสารเคมี

กรดโอเลอิก (Oleic acid, $C_{18}H_{34}O_2$, Daejung) กลีเซอรอล (Glycerol, $C_3H_8O_3$, Daejung) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO 99%, Sigma-Aldrich) นอกจากนี้สารที่ใช้ในการไทเทรตเพื่อหาความเป็นกรดประกอบด้วยเอทานอล (Ethanol, Labscan) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH, KemAus) และฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein, $C_{20}H_{14}O_4$) และตัวทำละลายสำหรับการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ด้วยโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High-performance liquid chromatography, HPLC) ได้แก่ อะซีโตน เมทานอล อะซีโตนไทรล์ และน้ำ ซึ่งทั้งหมดเป็นเกรด HPLC จาก Honeywell Systems (Thailand) Ltd. นอกจากนี้ สารมาตรฐานเชิงปริมาณสำหรับ HPLC ได้แก่ 1-glycerol monononadecanoate ($\geq 99.0\%$), 1,3-glycerol dinonadecanoate ($\geq 99.0\%$) และ glycerol trinonadecanoate ($\geq 97.0\%$) จาก Sigma-Aldrich

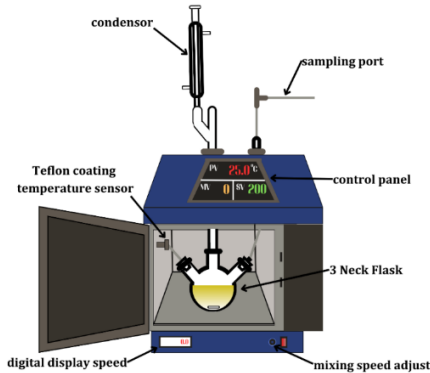
2.2 การทดสอบปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลภายใต้คลื่นไมโครเวฟ

การศึกษานี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์คลื่นไมโครเวฟรุ่น MCR-3SX ผลิตโดยบริษัท ZOIBKD ประเทศจีน ดังแสดงในรูปที่ 2 เครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วยขวดก้นกลมสามคอ ชุดควบคุมอุณหภูมิ หัววัดอุณหภูมิชนิดใยแก้วนำแสง เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และเซนเซอร์วัดกำลังไฟฟ้าในช่วง 0–900 W ในการทดลอง

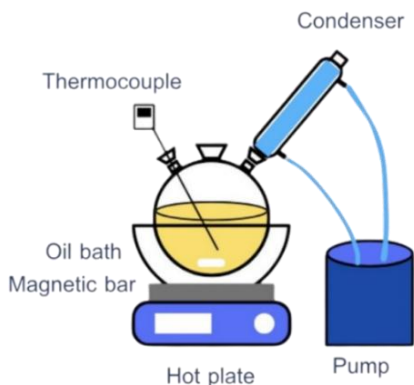
ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ใช้ขวดก้นกลมสามคอขนาด 250 mL บรรจุกลีเซอรอล (GLY) และกรดโอเลอิก (OA) ตามอัตราส่วนที่กำหนด ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO โดยไม่เติมตัวทำละลายเพื่อช่วยปฏิกิริยา และกำหนดความเร็วรอบในการกวนไว้ที่ 700 รอบต่อนาที (rpm) ระบบถูกเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิเริ่มต้นไปยังอุณหภูมิเป้าหมายภายในเวลา 4 นาที การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟดำเนินการภายใต้โหมดควบคุมอุณหภูมิ (temperature-controlled mode) โดยใช้หัววัดอุณหภูมิชนิดใยแก้วนำแสงในการติดตามอุณหภูมิของปฏิกิริยาแบบเวลาจริง และใช้ระบบควบคุมแบบ PID ในการปรับกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟโดยอัตโนมัติให้สอดคล้องกับอุณหภูมิที่กำหนด เครื่องปฏิกรณ์สามารถให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 900 W ซึ่งกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟไม่ได้ถูกจ่ายที่ค่าสูงสุดตลอดการทดลอง แต่จะถูกปรับเพิ่มหรือลดตามอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้เพื่อรักษาอุณหภูมิของปฏิกิริยาให้คงที่ตลอดช่วงเวลากการทดลองและมีการกวนอย่างต่อเนื่องที่ 700 rpm ช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในระบบและลดโอกาสการเกิดจุดร้อนเฉพาะที่ ในการทดลองเปรียบเทียบรูปแบบการให้ความร้อนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟและเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไป ใช้อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก และอุณหภูมิ 160 °C โดยไม่เติมตัวทำละลาย จากนั้นการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟโดยแปรผันอัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1:1 ถึง 1:6 และอุณหภูมิระหว่าง 160–180 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก การทดลองดำเนินการเป็นเวลา 0–120 นาที โดยเก็บตัวอย่างปริมาตรประมาณ 1.5 mL เป็นช่วง ๆ ตามเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงแยกชั้นและแยกชั้นอินทรีย์ส่วนบนเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับการให้ความร้อนแบบทั่วไป (การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไป, Conventional mechanically stirred reactor; CSR) โดยการทดลองในระบบ CSR ใช้ขวดปฏิกิริยาแก้วสามคอติดตั้งรีฟลักซ์คอนเดนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลสำหรับติดตามอุณหภูมิอย่างแม่นยำ และช่องเก็บตัวอย่างสำหรับการถอนตัวอย่างเป็นช่วง ๆ คอนเดนเซอร์ถูกทำให้เย็นด้วยน้ำเย็นหมุนเวียนเพื่อป้องกันการสูญเสียจากการระเหยระหว่างปฏิกิริยา

การกวนถูกควบคุมให้คงที่ที่ 700 rpm และควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาโดยการหมุนเวียนน้ำมันซิลิโคนที่ให้ความร้อนผ่านอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิภายนอกที่ตั้งแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทดสอบปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลภายใต้คลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทดสอบปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไป

2.3 วิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณของผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์เชิงปริมาณของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาดำเนินการด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High-performance liquid chromatography; HPLC) โดยใช้เครื่อง HPLC รุ่น Surveyor Plus ผลิตโดยบริษัท Thermo Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งติดตั้งตัวตรวจวัดชนิดโฟโตไดโอดอาร์เรย์ (Photodiode array; PDA) การแยกสารใช้คอลัมน์ InertSustain C18 (4.6 mm × 250 mm, 5 µm) โดยควบคุมอุณหภูมิคอลัมน์ไว้ที่ 40 °C

สำหรับการหาปริมาณกรดโอเลอิก (OA) และ MG ใช้วิธีแยกแบบไอโซครีติก โดยใช้วัฏภาคเคลื่อนที่ประกอบด้วยอะซิโตน/ไตรคลอโรเอทรีน ในอัตราส่วน 87:13 โดยปริมาตร และเติมกรดไตรฟลูออโรอะซิติก (Trifluoroacetic acid; TFA) 0.1% โดยปริมาตร อัตราการไหลกำหนดไว้ที่ 0.7 mL/min และตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 210 nm สำหรับการแยก DG และ TG ใช้ วัฏภาคเคลื่อนที่แบบไอโซครีติกอีกระบบหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยอะซิโตน/อะซิโตน/ไตรคลอโรเอทรีน ในอัตราส่วน 40:60 โดยปริมาตร อัตราการไหลคงไว้ที่ 0.8 mL/min ใช้เวลาวิเคราะห์รวม 40 นาที และตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 210 nm

2.4 การคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก ค่าการเลือกเกิด และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ (Selectivity) หมายถึง สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์กลุ่มกลีเซอไรด์ทั้งหมด โดยพิจารณาจำนวนหมู่กรดไขมันที่อยู่ในโมเลกุลของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ได้แก่ MG DG และ TG

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (Yield) หมายถึง ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจริงจากกรดโอเลอิกที่เข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งคำนวณจากผลคูณระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกและค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก (X_{OA}) ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์โมโนกลีเซอไรด์ (S_{MG}) ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ไดกลีเซอไรด์ (S_{DG}) ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ไตรกลีเซอไรด์ (S_{TG}) ร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ (Y_{MG}) ร้อยละผลได้ของไดกลีเซอไรด์ (Y_{DG}) ร้อยละผลได้ของไตรกลีเซอไรด์ (Y_{TG}) แสดงในสมการที่ (1) - (5)

$$X_{OA} (\%) = \left(1 - \frac{C_{OA}}{C_{OA,0}}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$S_{MG} = \frac{C_{MG}}{C_{MG} + 2C_{DG} + 3C_{TG}} \quad (2)$$

$$S_{DG} = \frac{2C_{DG}}{C_{MG} + 2C_{DG} + 3C_{TG}} \quad (3)$$

$$S_{TG} = \frac{3C_{TG}}{C_{MG} + 2C_{DG} + 3C_{TG}} \quad (4)$$

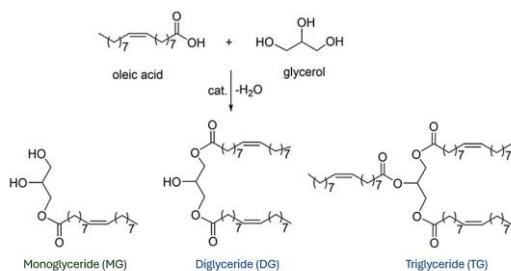
$$Y_{MG} (\%) = X_{OA} (\%) \times S_{MG} \quad (5)$$

เมื่อ $C_{OA,0}$ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดโอเลอิก, C_{OA} คือ ความเข้มข้นของกรดโอเลอิก ณ เวลาใด ๆ, C_{MG} , C_{DG} และ C_{TG} คือ ความเข้มข้นของ MG DG และ TG ตามลำดับ S_{MG} , S_{DG} และ S_{TG} แสดงในรูปเศษส่วน

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ผลของรูปแบบการให้ความร้อนต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกกับกลีเซอรอลเป็นปฏิกิริยาแบบลำดับขั้น โดยกลีเซอรอลสามารถทำปฏิกิริยากับกรดไขมันเพื่อให้ได้ MG ก่อน จากนั้น MG สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเป็น DG และ TG ตามลำดับ ดังสมการในรูปที่ 4 ดังนั้น แม้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกจะสะท้อนความก้าวหน้าของปฏิกิริยาโดยรวม แต่การประเมินสมรรถนะของระบบจำเป็นต้องพิจารณาพร้อมกับค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เนื่องจากผลิตภัณฑ์เป้าหมายในงานนี้คือ MG และ DG ในขณะที่ TG เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการซึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาต่อเนื่องในลำดับถัดไป



รูปที่ 4 เส้นทางการปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับกลีเซอรอล (ดัดแปลงจาก [10])

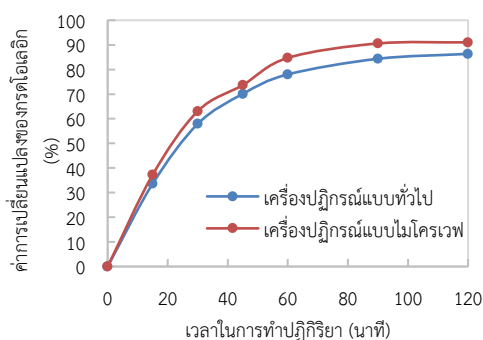
รูปที่ 5 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกและกลีเซอรอล โดยเปรียบเทียบระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไปและเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟภายใต้สภาวะอัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO เท่ากับ 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C ผลการทดลองพบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของปฏิกิริยาในทั้งสองระบบ โดยเฉพาะในช่วง 0–30 นาทีแรก ซึ่งสะท้อนว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้รวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นยังสูงและตำแหน่งออกฤทธิ์ของตัวเร่งปฏิกิริยายังสามารถเข้าถึงได้ดี

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการให้ความร้อน พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไปตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา โดยที่เวลา 30 นาที ระบบไมโครเวฟให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกเท่ากับ 63.1% ขณะที่ระบบกวนเชิงกลทั่วไปให้ค่า 57.9% และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาที่ 120 นาที ระบบไมโครเวฟให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก 91.0% สูงกว่าระบบกวนเชิงกลทั่วไปซึ่งให้ค่า 86.4% ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีแนวโน้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนกรดโอเลอิกภายใต้สภาวะที่ศึกษา ซึ่งอาจจะมาเกิดจากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟซึ่งเป็นการถ่ายเทพลังงานอย่างรวดเร็วและเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร อาจช่วยลดข้อจำกัดด้านการถ่ายเทความร้อน เพิ่มความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ และส่งเสริมการสัมผัสระหว่างสารตั้งต้นกับตำแหน่งออกฤทธิ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO ได้ดีกว่าการให้ความร้อนแบบกวนเชิงกลทั่วไปที่อาศัยการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ระบบ อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกในทั้งสองระบบมีแนวโน้มเข้าใกล้สภาวะสมดุล โดยระบบไมโครเวฟยังคงให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงกว่าระบบกวนเชิงกลทั่วไปตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม การเพิ่มเวลาปฏิกิริยาให้นานขึ้นควรพิจารณาพร้อมกับค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ MG, DG และ TG เนื่องจาก MG สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็น DG และ TG ได้

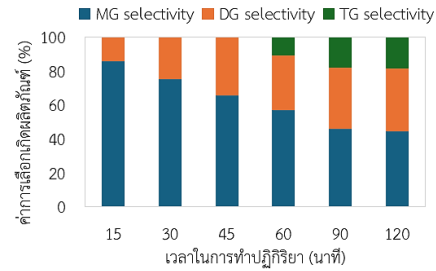
เมื่อพิจารณาค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก-ข) พบว่ารูปแบบการให้ความร้อนมีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์กลีเซอไรด์อย่างชัดเจน โดยระบบไมโครเวฟให้ค่าการเลือกเกิดของ MG สูงกว่าระบบกวนเชิงกลทั่วไปที่เวลา 15, 30 และ 45 นาที โดยมีค่าเท่ากับ 85.7, 75.4 และ 65.7% ตามลำดับ ขณะที่ระบบกวนเชิงกลทั่วไปให้ค่าเท่ากับ 64.6, 46.2 และ 40.5% ที่เวลาเดียวกัน นอกจากนี้ ระบบไมโครเวฟยังไม่พบการเกิด TG ที่เวลา 15–45 นาที ในขณะที่ระบบกวนเชิงกลทั่วไปเริ่มพบ TG ตั้งแต่วเวลา 30 นาที และมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 15–20% ตั้งแต่วเวลา 30 ถึง 120 นาที แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เกิดปฏิกิริยาแบบลำดับขั้น (series reaction) โดย MG เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งกลาง (intermediate product) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับกรดโอเลอิกเพื่อเปลี่ยนเป็น DG และ TG ได้ ดังนั้น การที่ระบบไมโครเวฟให้ค่า

การเลือกเกิดของ MG สูง และยังไม่พบ TG ที่เวลา 15–45 นาที แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟภายใต้สภาวะที่ศึกษามีแนวโน้มช่วยส่งเสริมการคงอยู่ของ MG และชะลอการเกิดผลิตภัณฑ์ขั้นสูงอย่าง TG เมื่อเปรียบเทียบกับ การให้ความร้อนแบบกวนเชิงกลทั่วไป

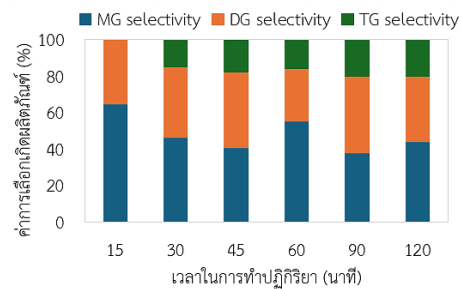
เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ (MG yield) ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าระบบไมโครเวฟให้ค่า MG yield สูงกว่าระบบกวนเชิงกลทั่วไปในทุกช่วงเวลาการศึกษา โดยที่เวลา 15, 30 และ 45 นาที ระบบไมโครเวฟให้ค่า MG yield เท่ากับ 32.0, 47.6 และ 48.4% ตามลำดับ ขณะที่ระบบกวนเชิงกลทั่วไปให้ค่า 24.4, 28.1 และ 30.0% ตามลำดับ แม้ค่า MG yield ของระบบไมโครเวฟที่เวลา 45 นาทีจะสูงที่สุด แต่มีค่าใกล้เคียงกับที่เวลา 30 นาที โดยแตกต่างกันเพียงประมาณ 0.85% เท่านั้น ดังนั้น เมื่อพิจารณาร่วมกันระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก ค่าการเลือกเกิดของ MG ค่า MG yield และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เวลา 30 นาที ภายใต้ระบบไมโครเวฟจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิต MG ภายใต้เงื่อนไขการศึกษา เนื่องจากให้ค่า MG yield สูงใกล้เคียงกับค่าสูงสุด ใช้เวลาปฏิกิริยาสั้นกว่าเวลา 45 นาที และยังไม่พบการเกิด TG แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เกิดขึ้นแบบลำดับขั้น โดย MG เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งกลาง (intermediate product) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับกรดโอเลอิกเพื่อเกิดเป็น DG และ TG ตามลำดับ



รูปที่ 5 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟและแบบกวนเชิงกล ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C

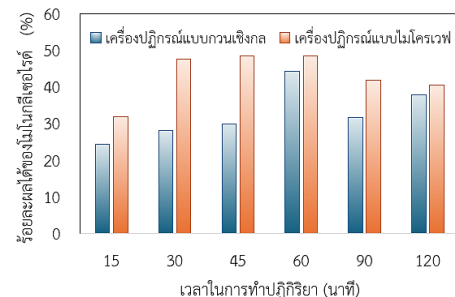


(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันใน (ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟและ (ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกล (ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C)



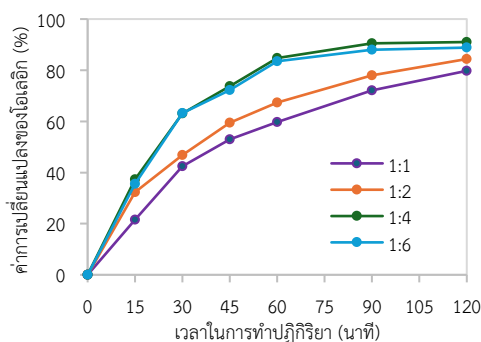
รูปที่ 7 ร้อยละผลได้โมโนกลีเซอไรด์ (MG yield, %) ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C

3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ผลการทดลองดังรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลมีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันอย่างชัดเจน โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรอลจาก 1:1 เป็น 1:4 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกช่วงเวลาของปฏิกิริยา และอัตราส่วน 1:4 ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงที่สุดภายใต้สภาวะที่ศึกษา สะท้อนว่า

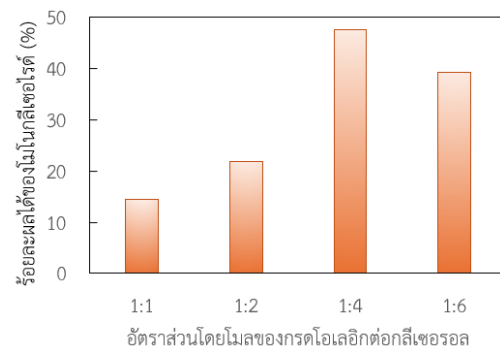
การมีกลีเซอรอลส่วนเกินช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาไปข้างหน้าและเพิ่มโอกาสในการเกิดผลิตภัณฑ์กลีเซอรอลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในระบบนี้ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดขึ้นเป็นลำดับขั้น โดยกรดโอเลอิกทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลเพื่อให้นโมโนกลีเซอรอล จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นไดกลีเซอรอลและไตรกลีเซอรอลตามลำดับ ดังนั้น การเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลในระบบจึงมีส่วนช่วยขับเคลื่อนปฏิกิริยาขั้นต้นและเพิ่มการเกิดผลิตภัณฑ์กึ่งกลาง โดยเฉพาะโมโนกลีเซอรอลและไดกลีเซอรอล นอกจากนี้ เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นระบบสองเฟส การเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรอลให้เหมาะสมย่อมช่วยเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลที่สามารถละลายหรือกระจายตัวในเฟสกรดโอเลอิกได้มากขึ้น จึงช่วยให้การสัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นและตำแหน่งออกฤทธิ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น [5] อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรอลเป็นอัตราส่วน 1:6 พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับอัตราส่วน 1:4 แสดงให้เห็นว่าการใช้กลีเซอรอลเกินระดับที่เหมาะสมไม่ได้ช่วยเพิ่มสมรรถนะของปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง พฤติกรรมดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับข้อจำกัดด้านสมดุลเฟสและการถ่ายโอนมวลของระบบ เนื่องจากกลีเซอรอลมีความสามารถในการละลายหรือกระจายตัวในเฟสกรดโอเลอิกอย่างจำกัด การเพิ่มกลีเซอรอลมากเกินไปจึงอาจไม่เพิ่มปริมาณกลีเซอรอลที่พร้อมเข้าทำปฏิกิริยาในเฟสอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังอาจทำให้ความหนืดของระบบสูงขึ้น ส่งผลต่อการกวนผสมและการถ่ายโอนมวลระหว่างเฟส



รูปที่ 8 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลต่างๆ (ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C)

อย่างไรก็ตาม ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสะท้อนเพียงความก้าวหน้าของปฏิกิริยาโดยรวม แต่ยังไม่สามารถบ่งชี้ปริมาณของผลิตภัณฑ์เป้าหมายได้โดยตรง เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับกลีเซอรอลเกิดแบบลำดับขั้น โดย MG เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งกลางที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับกรดโอเลอิกเพื่อเกิดเป็น DG และ TG ตามลำดับ ดังนั้น เพื่อประเมินว่าอัตราส่วนโดยโมลที่ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงและสามารถส่งเสริมการเกิดผลิตภัณฑ์ MG งานวิจัยนี้จึงพิจารณาค่า MG yield ที่เวลา 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ให้ค่า MG yield สูงภายใต้ระบบไมโครเวฟ โดยจากผลการศึกษาในหัวข้อก่อนหน้า เมื่อพิจารณาค่า MG yield ที่เวลา 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าอัตราส่วนกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลที่ 1:4 ให้ค่า MG yield สูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 47.6% ขณะที่อัตราส่วนอื่นให้ค่า MG yield ต่ำกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราส่วนกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลที่ 1:4 ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันต่อไป



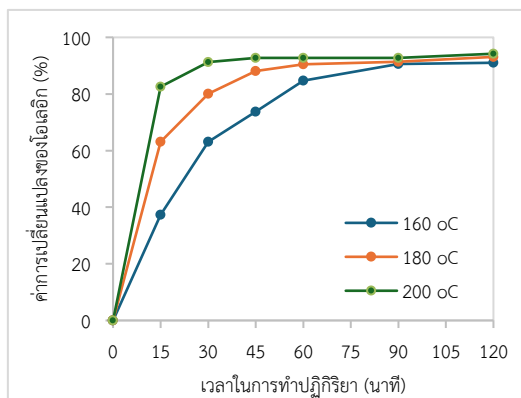
รูปที่ 9 ร้อยละผลได้โมโนกลีเซอรอล (MG yield, %)

ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลต่างๆ (ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% ที่อุณหภูมิ 160 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที)

3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิ 160, 180 และ 200 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO ปริมาณ 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อ

ค่าการเปลี่ยนของกรดโอเลอิกอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการเปลี่ยนของกรดโอเลอิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเกิดขึ้นได้รวดเร็วมากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงต้นของปฏิกิริยา (0–30 นาที) ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้โมเลกุลในระบบมีพลังงานจลน์สูงขึ้น ทำให้ความถี่และประสิทธิภาพของการชนกันระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น จึงช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามหลักของอาร์เรเนียสและทฤษฎีการชน [6, 11, 12]

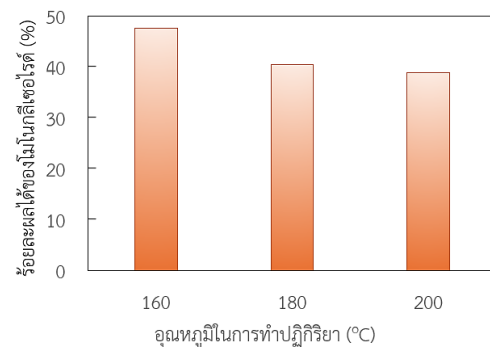


รูปที่ 10 ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.%)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 200 °C ระบบให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงที่สุดในทุกช่วงเวลาการศึกษา สะท้อนว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสะท้อนเพียงความก้าวหน้าของปฏิกิริยาโดยรวม แต่ยังไม่สามารถบ่งชี้การเกิดผลิตภัณฑ์เป้าหมายได้โดยตรง เนื่องจาก MG เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งกลางที่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็น DG และ TG ได้ ดังนั้น จึงพิจารณาร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ (MG yield) ที่เวลา 30 นาที ร่วมด้วย ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าอุณหภูมิ 160 °C ให้ค่า MG yield สูงที่สุดที่ 47.6% ขณะที่อุณหภูมิ 180 และ 200 °C ให้ค่า MG yield ลดลงเหลือ 40.5 และ 38.9% ตามลำดับ แม้อุณหภูมิ 180 และ 200 °C จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงกว่า 160 °C แต่ค่า MG yield ที่ลดลงแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่อง

ของ MG ไปเป็น DG และ TG ดังนั้น การพิจารณาอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงไม่ควรพิจารณาจากค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกเพียงอย่างเดียว แต่ควรพิจารณาพร้อมกับค่า MG yield ซึ่งสะท้อนปริมาณ MG ที่เกิดขึ้นจริง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ร่วมด้วยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่ 200 °C มีสีเข้มกว่าสภาวะอื่นอย่างชัดเจนจากการสังเกตด้วยตาเปล่า ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์บางส่วนภายใต้อุณหภูมิสูง [13, 14] ดังนั้น แม้อุณหภูมิ 200 °C จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงสุด แต่พบการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน ดังนั้นการทำการปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 160 °C จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิต MG ภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา



รูปที่ 11 ร้อยละผลได้โมโนกลีเซอไรด์ (MG yield, %) ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt.% เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที)

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาพบว่า การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟช่วยเพิ่มสมรรถนะของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกและกลีเซอรอลเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนเชิงกลทั่วไป ภายใต้สภาวะอัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก ที่อุณหภูมิ 160 °C ระบบไมโครเวฟให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิก 63.1% ที่เวลา 30 นาที สูงกว่าระบบกวนเชิงกลทั่วไปซึ่งให้ค่า 57.9% ภายใต้สภาวะเดียวกัน นอกจากนี้ ระบบไมโครเวฟยังให้ค่าการเลือกเกิดของ MG สูงกว่า และไม่พบการเกิด TG ในช่วงเวลา 15–45 นาที แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมี

แนวโน้มช่วยส่งเสริมการเกิด MG และชะลอการเกิดผลิตภัณฑ์ชั้นสูงอย่าง TG

เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ (MG yield) พบว่าระบบไมโครเวฟให้ค่า MG yield 47.6% ที่เวลา 30 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสูงสุด 48.4% ที่เวลา 45 นาที แต่ใช้เวลาปฏิกิริยาน้อยกว่า จึงเลือกเวลา 30 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการผลิต MG ภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา สำหรับอัตราส่วนโดยโมล พบว่าอัตราส่วนกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอล 1:4 ให้ค่า MG yield สูงกว่าอัตราส่วนอื่น ขณะที่ผลของอุณหภูมิพบว่าแม้อุณหภูมิ 180 และ 200 °C จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงขึ้น แต่ค่า MG yield ลดลงเหลือ 40.5 และ 38.9% ตามลำดับ และที่ 200 °C พบการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโมโนกลีเซอไรด์จากกลีเซอรอลภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา คือ การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟที่อัตราส่วนโมลกรดโอเลอิกต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1:4 ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO 0.5 wt.% ของกรดโอเลอิก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 160 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการพัฒนาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 (รหัสโครงการวิจัย FRB68E0719) (รหัสคำรับรอง FRB680045/0168)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yenchan J, Putivisutisak S, Weeranoppanant N, Ngaosuwan K, Chanthon N, Zullakiah S, Phan AN, Assabumrungrat S, Mens W. Intensified glycerolysis of palm oil in a spinning disc reactor for continuous monoglyceride production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2025;13(29):11301-14.
- [2] Size FCM. Share & trends analysis report by application (plastics & fibers, industrial), by product (organic acids, alcohols), by region (Asia Pacific, North America), and segment forecasts, 2023–2030. San Francisco (CA) USA: Grand View Research; 2023.
- [3] Menalla E, Serna JG, Cantero D, Cocero MJ. Hydrothermal hydrolysis of triglycerides: tunable and intensified production of diglycerides, monoglycerides, and fatty acids. *Chemical Engineering Journal*. 2024;493: 152391.
- [4] Díaz I, Márquez-Alvarez C, Mohino F, Pérez-Pariente Jn, Sastre E. Combined alkyl and sulfonic acid functionalization of MCM-41-type silica: part 2. esterification of glycerol with fatty acids. *Journal of Catalysis*. 2000; 193(2):295-302.
- [5] Chanthon N, Ngaosuwan K, Kiatkittipong W, Wongsawaeng D, Mens W, Weeranoppanant N, Soottitantawa A, Charoensuppanimit P, Rokhum SL, Assabumrungrat S. Intensified modified fruit blender reactor for emulsifier synthesis via glycerol esterification of free fatty acids at mild conditions. *Bioresource Technology*. 2025;429:132510.
- [6] Singh D, Patidar P, Ganesh A, Mahajani S. Esterification of oleic acid with glycerol in the presence of supported zinc oxide as catalyst. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013;52(42):14776-86.
- [7] Bombos D, Bombos M, Bolocan I, Vasilievici G, Zaharia E. Esterification of glycerol with technical olein in heterogeneous catalysis. *Rev Chim*. 2010;61:784-7.
- [8] Tarigan JB, Barus AF, Simamora NT, Tarigan RS, Perangin-angin S, Ginting J, Sitepu EK, Taufiq-Yap Y. Microwave-intensified esterification of high-free fatty acid feedstock into biodiesel using waste chicken eggshells as a heterogeneous catalyst. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2025;11:101107.
- [9] Gole VL, Gogate PR. Intensification of glycerolysis reaction of higher free fatty acid containing sustainable feedstock using microwave irradiation. *Fuel processing technology*. 2014;118:110-6.

- [10] Esposito R, Melchiorre M, Annunziata A, Cucciolito ME, Ruffo F. Emerging catalysis in biomass valorisation: simple Zn (II) catalysts for fatty acids esterification and transesterification. *ChemCatChem*. 2020;12(23): 5858-79.
- [11] Yusuff AS. Kinetic and thermodynamic study on the esterification of oleic acid over SO₃H-functionalized eucalyptus tree bark biochar catalyst. *Scientific Reports*. 2022;12 (1):8653.
- [12] Fei H, Zheng C, Wu Z, Liang X, Nie Y. Glycerol esterification of free fatty acids catalyzed by zinc glycerolate for biodiesel production from acidified palm oil: Optimization, kinetic study, and process evaluation. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2025;102(3):641-55.
- [13] Maquirriain MA, Querini CA, Pisarello ML. Glycerine esterification with free fatty acids: Homogeneous catalysis. *Chemical Engineering Research and Design*. 2021;171:86-99.
- [14] Chao H-W, Hsu C-Y, Hsu H-C, Tsai S-D, Liu Y-X, Chang T-H. Enhancing the esterification reaction rate in biodiesel production using microwave with iron powder catalysis. *Applied Catalysis O: Open*. 2025:207066.

การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์จากแร่ลูโคซีนของไทย สำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทน

วีรินทร์ดา เมนส์^{1*} สรพงษ์ ภาวสุปรี² และ ชญานุตร์ โฆษิตานนท์³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ.

ที่อยู่อีเมล: weerinda.a@en.rmutt.ac.th

Received: April 22, 2026 Revised: June 4, 2026 Accepted: June 9, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์จากแร่ลูโคซีนของไทย (Ni/TiO₂-Leucoxene) สำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทน และเปรียบเทียบสมบัติและประสิทธิภาพกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์เกรดการค้า Ni/TiO₂-Commercial เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก โดยกำหนดปริมาณนิกเกิลร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นนำไปทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 600 และ 650 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ และวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวรองรับจากแร่ลูโคซีนพบเฟสของ TiO₂ ร่วมกับออกไซด์ของธาตุอื่น เช่น Fe₂O₃ และ SiO₂ และหลังการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาพบเฟสของ NiO โดยผลการคำนวณด้วย Scherrer equation พบว่า NiO ในตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Leucoxene มีขนาดผลึกเฉลี่ย 11.9 nm ซึ่งเล็กกว่า Ni/TiO₂-Commercial ที่มีขนาดผลึกเฉลี่ย 14.6 nm ขณะที่ภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Leucoxene มีลักษณะสัณฐานแบบแท่งและมีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่สังเกตได้ แตกต่างจาก Ni/TiO₂-Commercial ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคเกาะกลุ่มแน่น จากผลการทดสอบปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Leucoxene ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Commercial อย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงมีเทนเท่ากับ 98.7% ที่เวลา 90 นาที ดังนั้นกล่าวได้ว่าแร่ลูโคซีนของไทยมีศักยภาพในการใช้เป็นตัวรองรับต้นทุนต่ำสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากมีเทน

คำสำคัญ: ตัวเร่งปฏิกิริยา แร่ลูโคซีน ไทเทเนียมออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน มีเทน

Development of nickel catalysts supported on titanium dioxide derived from Thai leucoxene for hydrogen production via methane decomposition

Weerinda Mens^{1*}, Sorapong Pavasupree² and Chayanoot Kositanont³

¹ Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³ National Metal and Materials Technology Center (MTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA)

* Corresponding author.

Email address: weerinda.a@en.rmutt.ac.th

Received: April 22, 2026 Revised: June 4, 2026 Accepted: June 9, 2026

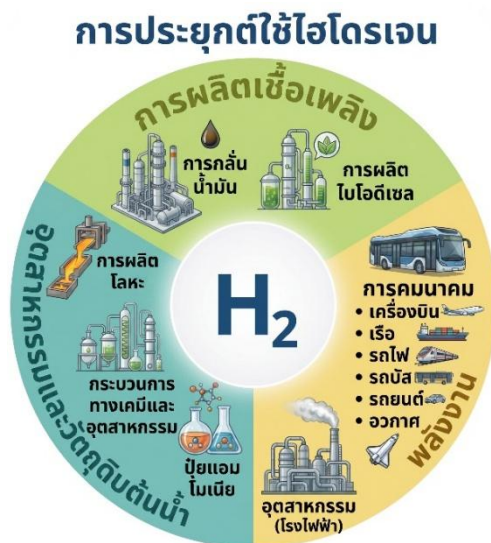
Abstract

This study investigated the development of nickel catalysts supported on titanium dioxide derived from Thai leucoxene mineral (Ni/TiO₂-Leucoxene) for hydrogen production via methane decomposition, and compared their properties and performance with those of nickel catalysts supported on commercial titanium dioxide (Ni/TiO₂-Commercial). The catalysts were prepared by the wet impregnation method with a nickel loading of 30 wt%. Their physicochemical characteristics were examined using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The catalysts were then tested in a fixed-bed reactor at 600 and 650 °C under atmospheric pressure, and the composition of the product gases was analyzed by gas chromatography. XRD analysis of the leucoxene-derived support revealed the presence of TiO₂ together with oxide phases of other elements, including Fe₂O₃ and SiO₂. After catalyst preparation, NiO was detected in both catalysts. Scherrer analysis showed that the average crystallite size of NiO in Ni/TiO₂-Leucoxene was 11.9 nm, which was smaller than that of Ni/TiO₂-Commercial at 14.6 nm. SEM images showed that the Ni/TiO₂-Leucoxene catalyst possessed a rod-like morphology with observable interparticle voids, in contrast to the densely agglomerated particles observed for the Ni/TiO₂-Commercial catalyst. The methane decomposition results demonstrated that Ni/TiO₂-Leucoxene provided significantly higher methane conversion than Ni/TiO₂-Commercial. The maximum methane conversion of 98.7% was obtained at 650 °C after 90 min of reaction. These findings suggest that Thai leucoxene mineral has strong potential as a low-cost support material for catalysts in hydrogen production from methane.

Keywords: Catalyst, Leucoxene mineral, Titanium dioxide, Hydrogen, Methane

1. บทนำ

ความต้องการใช้พลังงานของโลกและของประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมและการคมนาคม ส่งผลให้เกิดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลในระดับสูง [1, 2] ปัญหาที่ตามมาคือการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีความพยายามอย่างต่อเนื่องในการพัฒนาแหล่งพลังงานสะอาดเพื่อรองรับระบบพลังงานในอนาคต [3] ไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยไม่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ณ จุดใช้งาน และยังมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงและอุตสาหกรรมเคมีหลายประเภท [4, 5] ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งครอบคลุมการใช้งานตั้งแต่ภาคการคมนาคมขนส่ง การผลิตปุ๋ยแอมโมเนียไปจนถึงการใช้เป็นวัตถุดิบในโรงกลั่นน้ำมันและอุตสาหกรรมโลหะ ความต้องการใช้งานที่หลากหลายนี้ส่งผลให้การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพและสะอาดเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง



รูปที่ 1 ภาพรวมของการประยุกต์ใช้งานไฮโดรเจน

ในปัจจุบัน การผลิตไฮโดรเจนสามารถดำเนินการได้หลายแนวทาง เช่น การออกซิเดชันบางส่วน การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ และการแตกตัวของมีเทนเชิงตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic methane decomposition, CDM) โดยกระบวนการ CDM ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเพราะเป็นเส้นทางการผลิตไฮโดรเจนที่ไม่ก่อให้เกิด COx โดยมีเทนสามารถแตกตัวให้คาร์บอนและแก๊สไฮโดรเจน ($\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$)

[4, 6] อีกทั้งยังให้คาร์บอนของแข็งเป็นผลิตร่วม ซึ่งอาจเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้หากควบคุมโครงสร้างของคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้ [7] อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของกระบวนการนี้คือการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการสะสมตัวของคาร์บอนและการรวมตัวของเฟสโลหะเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง [7, 8]

ตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มโลหะทรานซิชัน โดยเฉพาะนิกเกิล เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทน เนื่องจากมีความสามารถในการสลายพันธะ C-H ได้ดี และมีต้นทุนต่ำกว่าโลหะหายาก [7] งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่าสมบัติของตัวรองรับมีบทบาทสำคัญต่อการกระจายตัวของนิกเกิล ความเสถียรของอนุภาคโลหะ และรูปแบบของคาร์บอนที่ก่อตัวบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา [8] โดย TiO_2 เป็นหนึ่งในตัวรองรับที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงและส่งเสริมปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับตัวรองรับได้ดี งานของ Srilatha และคณะรายงานว่า Ni/TiO_2 สามารถใช้ผลิตไฮโดรเจนจากการแตกตัวของมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และชนิดของ TiO_2 ส่งผลต่อสมบัติเชิงตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างมีนัยสำคัญ [9]

อย่างไรก็ตาม ไทเทเนียมออกไซด์เกรดการค้ามีต้นทุนสูงเมื่อเทียบกับแร่ไทเทเนียมที่พบในธรรมชาติ แร่ลูโคซีนเป็นแร่ไทเทเนียมธรรมชาติที่มี TiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก และอาจมีออกไซด์ของธาตุอื่นร่วมอยู่ด้วย มีรายงานว่าแร่ลูโคซีนธรรมชาติสามารถใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการเตรียมวัสดุ TiO_2 ได้ เช่น การสังเคราะห์ anatase TiO_2 nanotubes จากแร่ลูโคซีนธรรมชาติด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล [10] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่นำ TiO_2 จากแร่ลูโคซีนมาใช้เป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni ในปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนยังมีรายงานจำกัด ดังนั้นการใช้ลูโคซีนเป็นวัตถุดิบตั้งต้นจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์และการใช้ทรัพยากรภายในประเทศ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์จากแร่ลูโคซีนของไทย และเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์เกรดการค้าสำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยประเมินทั้งสมบัติเชิงโครงสร้าง ลักษณะสัณฐาน และความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการใช้แร่ไทยเป็นตัวรองรับต้นทุนต่ำสำหรับกระบวนการผลิตไฮโดรเจน

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ นิเกิลไนเตรตเฮกซาไฮเดรต (Nickel nitrate hexahydrate, $[\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$, ไทเทเนียมออกไซด์เกรดการค้า และแร่ลูโคซีนธรรมชาติ (มีไทเทเนียมออกไซด์ เป็นองค์ประกอบประมาณ 91%) ที่ได้รับจาก บริษัท สินแร่สาคร จำกัด จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ประเทศไทย

2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ไทเทเนียมออกไซด์จากแร่ลูโคซีนของไทย โดยมีวิธีการเตรียมจากงานวิจัยที่ผ่านมา [10] โดยเริ่มจากบดแร่ลูโคซีนด้วยวิธี ball milling ให้มีขนาดอนุภาคประมาณ 20–50 μm จากนั้นนำผง TiO_2 จากแร่ลูโคซีนไปผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 10 M ที่อุณหภูมิ 105 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างด้วยสารละลาย HCl 0.1 M และน้ำกลั่นจนมีค่า pH ประมาณ 7 อบที่ 60 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเผาในอากาศเพื่อให้ได้ TiO_2 -Leucoxene สำหรับใช้เป็นตัวรองรับในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO_2 -Leucoxene

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียก โดยกำหนดปริมาณนิกเกิลร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา เริ่มจากละลาย $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นเติมตัวรองรับ TiO_2 เกรดการค้า หรือ TiO_2 จากแร่ลูโคซีนของไทย กวนผสมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำสารละลายไปอบที่ 110 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นบดให้เป็นผงและนำไปเผาในอากาศที่ 550 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ Ni/TiO_2 -Commercial และ Ni/TiO_2 -Leucoxene

2.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

ศึกษาลักษณะเฟสผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) โดยใช้ $\text{Cu K } \alpha$ และบันทึกข้อมูลในช่วงมุม 2θ ระหว่าง 20–80 $^{\circ}$ ส่วนลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวศึกษาด้วย scanning electron microscopy (SEM) เพื่อพิจารณาการลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการทำปฏิกิริยา

2.4 การทดสอบปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทน

การทดสอบปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้ความดันบรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา

1 กรัม ลงในเบดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 3 เริ่มต้นโดยป้อนก๊าซไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99% ที่อัตราการไหล 50 mL/min เพื่อไล่อากาศภายในระบบ จากนั้นให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิ 600 $^{\circ}\text{C}$ ก่อนการทดสอบปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยกระบวนการรีดักชันเบื้องต้นภายใต้บรรยากาศก๊าซไฮโดรเจน ความบริสุทธิ์ 99.999% ที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นป้อนก๊าซไนโตรเจนเพื่อไล่ก๊าซไฮโดรเจนที่เหลืออยู่ในระบบ ก่อนเริ่มป้อนก๊าซมีเทนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ การทดสอบปฏิกิริยาดำเนินการที่อุณหภูมิ 600 และ 650 $^{\circ}\text{C}$ โดยป้อนก๊าซมีเทน ความบริสุทธิ์ 99.999% ที่อัตราการไหล 50 mL/min ร่วมกับก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 mL/min รวมเป็นอัตราการไหลรวมของก๊าซป้อน 100 mL/min โดยมีค่า weight hourly space velocity (WHSV) ที่คำนวณจากอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซมีเทนต่อมวลตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 2.15 $\text{gCH}_4/\text{gcat.h}$ เก็บตัวอย่างก๊าซผลิตภัณฑ์ทุก 30 นาที เป็นเวลา 120 นาที และวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซด้วย gas chromatography ที่ติดตั้งตัวตรวจวัดชนิด thermal conductivity detector (TCD) โดยใช้คอลัมน์ชนิด molecular sieve 5A

ก่อนการวิเคราะห์ตัวอย่าง ได้จัดทำกราฟมาตรฐานของก๊าซมีเทนโดยใช้ก๊าซมีเทนมาตรฐานที่ความเข้มข้นที่ทราบค่า จากนั้นนำค่าพื้นที่ใต้พีคของมีเทนที่ได้จาก GC-TCD มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่พีคกับความเข้มข้นของมีเทน เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณมีเทนในก๊าซผลิตภัณฑ์ ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนคำนวณจากอัตราการไหลของก๊าซเข้าและขาออก ดังสมการ

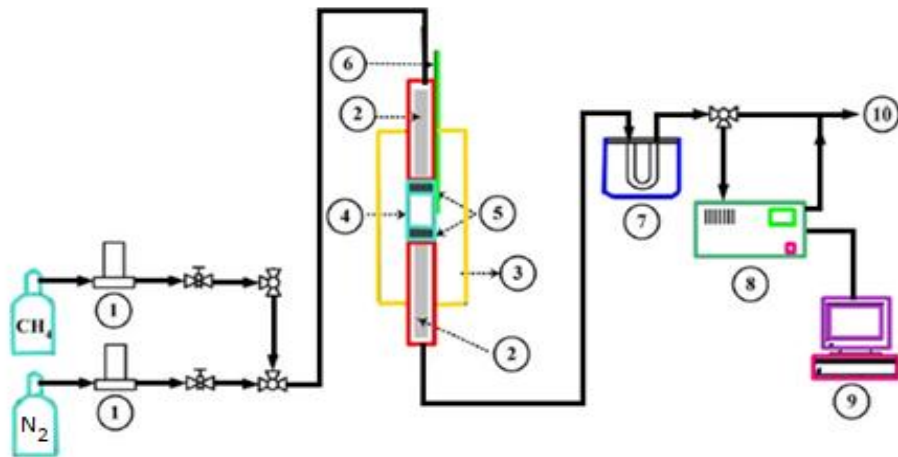
$$X_{\text{CH}_4}(\%) = \frac{\dot{F}_{\text{CH}_4,\text{in}} - \dot{F}_{\text{CH}_4,\text{out}}}{\dot{F}_{\text{CH}_4,\text{in}}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

X_{CH_4} คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทน

$\dot{F}_{\text{CH}_4,\text{in}}$ คือ อัตราการไหลเชิงโมลของมีเทนขาเข้า

$\dot{F}_{\text{CH}_4,\text{out}}$ คือ อัตราการไหลเชิงโมลของมีเทนขาออก



รูปที่ 2 แผนภาพระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ใช้สำหรับศึกษาปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทน โดยระบบประกอบด้วย (1) เครื่องวัดอัตราการไหล (2) เครื่องปฏิกรณ์แบบหลอดแก้ว (3) เตาเผา (4) เบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา (5) ท่อควอทซ์ (6) เทอร์โมคัปเปิล (7) เครื่องควบคุม (8) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (9) จอแสดงผล และ (10) ท่อระบาย



รูปที่ 3 ลักษณะการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะเฟสของตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา

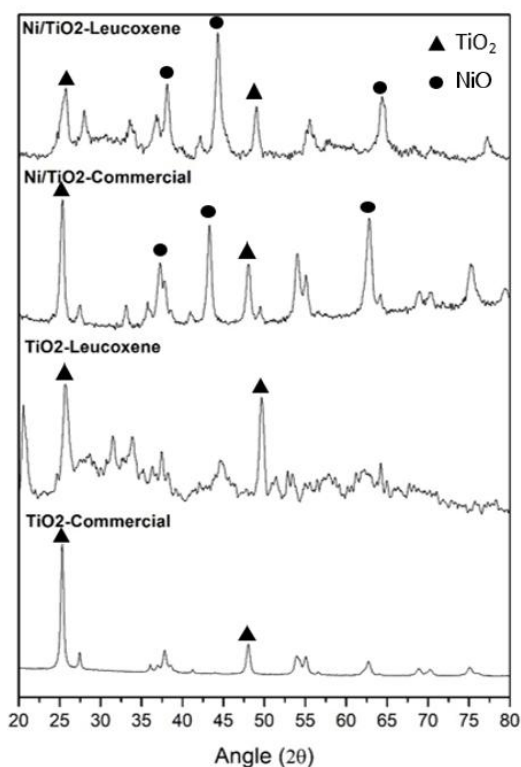
รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 -Commercial, TiO_2 -Leucoxene, Ni/TiO_2 commercial และ Ni/TiO_2 -Leucoxene แสดงดังรูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวรองรับพบว่า TiO_2 -Commercial และ TiO_2 -Leucoxene ต่างแสดงพีคที่สอดคล้องกับเฟส Anatase ของไทเทเนียมออกไซด์ ขณะที่ตัวอย่างจากแร่ลูโคซีนยังปรากฏพีคของสารประกอบออกไซด์อื่นร่วมด้วย ได้แก่ Fe_2O_3 และ SiO_2 ที่มุม 2θ เท่ากับ 33.2° และ 26.6° ตามลำดับ

สะท้อนให้เห็นว่าตัวรองรับจากแร่ธรรมชาติยังคงองค์ประกอบของแร่ร่วมอยู่ในโครงสร้าง หลังจากเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบแบบเปียกและเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบพีคเพิ่มเติมที่สอดคล้องกับเฟสของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ในตัวอย่าง Ni/TiO_2 -Commercial และ Ni/TiO_2 -Leucoxene แสดงให้เห็นว่าการนํานิกเกิลเข้าสู่ตัวรองรับเกิดขึ้นได้สำเร็จ ทั้งนี้ เนื่องจากรูปแบบ XRD ในรูปที่ 4 เป็นการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการทดสอบปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการเผาในบรรยากาศอากาศ จึงระบุเฟสของนิกเกิลในรูปของ NiO แทนการระบุเป็น metallic Ni โดยตรง

เพื่อประเมินขนาดผลึกเฉลี่ยของ NiO บนตัวรองรับทั้งสองชนิด ได้คำนวณขนาดผลึกเฉลี่ยของ NiO จากข้อมูล XRD โดยใช้ Scherrer equation พบว่า NiO ในตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO_2 -Commercial และ Ni/TiO_2 -Leucoxene มีขนาดผลึกเฉลี่ยเท่ากับ 14.6 และ 11.9 nm ตามลำดับ ค่าขนาดผลึกเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่า NiO บนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO_2 -Leucoxene มีขนาดเล็กกว่า Ni/TiO_2 -Commercial ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมเดียวกัน ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่าง nickel oxide species กับองค์ประกอบออกไซด์ร่วมในตัวรองรับจากแร่ลูโคซีน เช่น Fe_2O_3 ที่อาจช่วยจำกัดการเติบโตของผลึก NiO ระหว่างการเผา การมีองค์ประกอบร่วมในตัวรองรับจากแร่ลูโคซีนอาจส่งผลต่อสมบัติกรด-เบส พฤติกรรมการถ่ายโอนออกซิเจนเฉพาะจุด หรือความสัมพันธ์ระหว่างโลหะกับ

ตัวรองรับ ซึ่งในภาพรวมอาจมีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาและความทนทานต่อการสะสมคาร์บอน แม้ว่างานวิจัยนี้ยังไม่ได้ศึกษาสมบัติพื้นผิวเชิงลึก XPS, BET หรือ SEM-EDS จึงอภิปรายบทบาทของ nickel species และออกไซด์ร่วมในเชิงความเป็นไปได้เท่านั้น

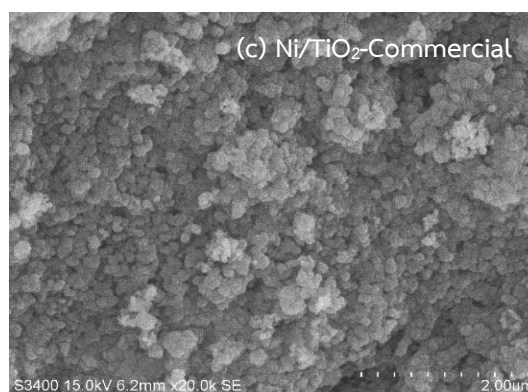
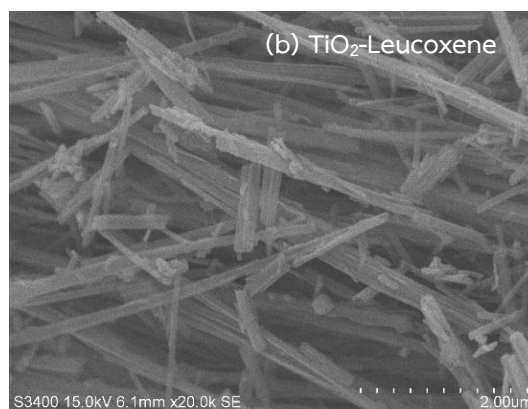
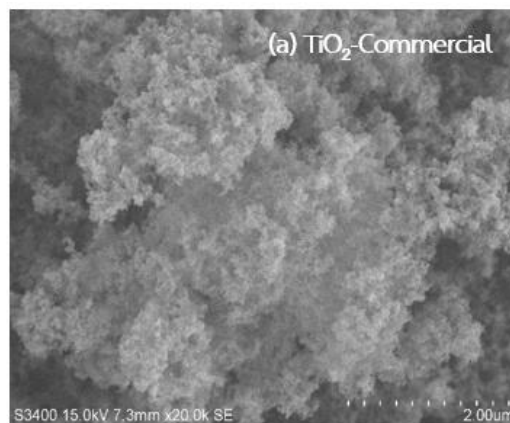
แสดงโครงสร้างแบบแท่งของตัวรองรับเดิม โดยพบอนุภาคขนาดเล็กปรากฏอยู่บนพื้นผิวของตัวรองรับ ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับผล XRD ในรูปที่ 4 สามารถสัมพันธ์กับการมีอยู่ของ nickel oxide species หรือ NiO บนตัวรองรับทั้งสองชนิด

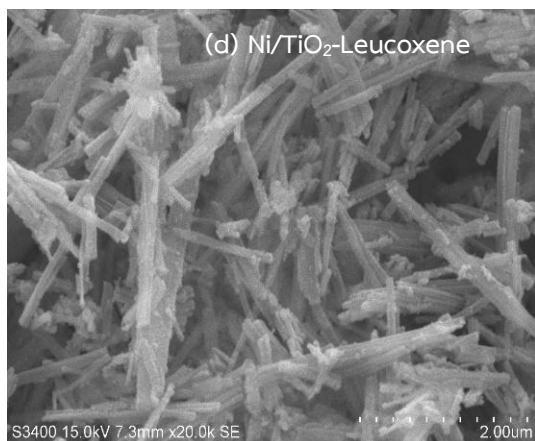


รูปที่ 4 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 -commercial, TiO_2 -Leucoxene, Ni/TiO_2 -commercial และ Ni/TiO_2 -Leucoxene

3.2 ลักษณะพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา

ลักษณะพื้นฐานของตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 5 จากภาพ SEM (a) TiO_2 -Commercial มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน หรือ agglomerated particles ทำให้พื้นผิวที่สังเกตได้มีลักษณะค่อนข้างแน่นและไม่สม่ำเสมอ ขณะที่ TiO_2 -Leucoxene (5b) แสดงลักษณะพื้นฐานแบบแท่ง หรือ rod-like morphology โดยแท่งอนุภาคมีการซ้อนทับและเรียงตัวแบบสุ่ม ทำให้เห็นช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ชัดเจนกว่าเมื่อเทียบกับ TiO_2 -Commercial หลังการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝังแบบเปียกและเผาในอากาศ พบว่า Ni/TiO_2 -Commercial ยังคงมีลักษณะเป็นอนุภาคเกาะกลุ่มแน่น ในขณะที่ Ni/TiO_2 -Leucoxene ยังคง





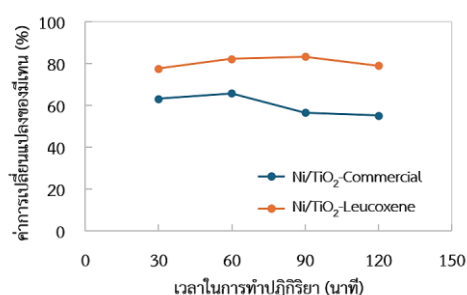
รูปที่ 5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ (a) TiO_2 -Commercial, (b) TiO_2 -Leucoxene, (c) Ni/TiO_2 -Commercial และ (d) Ni/TiO_2 -Leucoxene

3.3 อิทธิพลของชนิดตัวรองรับต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทน

รูปที่ 6 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO_2 -Commercial และ Ni/TiO_2 -Leucoxene ที่อุณหภูมิ 600°C จากผลการทดลองพบว่า Ni/TiO_2 -Leucoxene ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนสูงกว่า Ni/TiO_2 -Commercial ตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา โดยที่เวลา 30 นาที Ni/TiO_2 -Leucoxene ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนอยู่ในระดับสูง และยังคงมีค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนสูงจนถึงเวลา 90 นาที ก่อนลดลงเล็กน้อยที่เวลา 120 นาที ขณะที่ Ni/TiO_2 -Commercial ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนต่ำกว่า และมีแนวโน้มลดลงหลังเวลา 60 นาที

แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า TiO_2 จากแร่ลูโคซีนสามารถใช้เป็นตัวรองรับที่ช่วยส่งเสริมสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลภายใต้สภาวะที่ศึกษา เมื่อพิจารณาพร้อมกับผล XRD พบว่า Ni/TiO_2 -Leucoxene มีขนาดผลึกเฉลี่ยของ NiO เท่ากับ 11.9 nm ซึ่งเล็กกว่า Ni/TiO_2 -Commercial ที่มีขนาดผลึกเฉลี่ย 14.6 nm ขนาดผลึกเฉลี่ยของ NiO ที่เล็กกว่าอาจสัมพันธ์กับการเกิดสปีชีสออกไซด์นิกเกิล (nickel oxide species) ที่มีขนาดเล็กลงบนตัวรองรับจากแร่ลูโคซีน ซึ่งอาจมีส่วนช่วยต่อสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้องค์ประกอบออกไซด์ร่วมในตัวรองรับจากแร่ลูโคซีน โดยเฉพาะ Fe_2O_3 อาจมีส่วน

เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีรายงานจากงานวิจัยที่ผ่านมาว่า Fe-containing species และตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Fe สามารถช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนได้ โดยอาจเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลและเหล็ก (Ni-Fe interaction) ที่ช่วยส่งเสริมการลดการเกิดคาร์บอนที่ปิดคลุมผิวโลหะ (encapsulating carbon) [11, 12] นอกจากนี้ มีรายงานว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe_2O_3 - Al_2O_3 สามารถใช้ในปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนและให้ผลิตภัณฑ์คาร์บอนนาโนไฟเบอร์ได้ แสดงให้เห็นว่าสปีชีสเหล็กออกไซด์ (iron oxide species) สามารถมีบทบาทในระบบปฏิกิริยานี้ได้ [13]

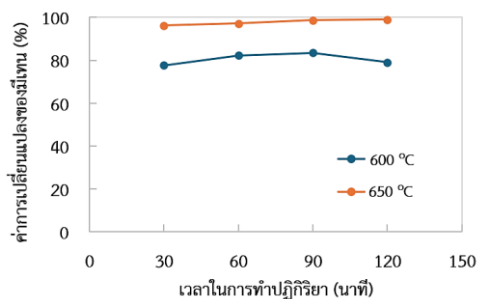


รูปที่ 6 ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทน (CH_4 conversion) เทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO_2 -Commercial และ Ni/TiO_2 -Leucoxene ที่อุณหภูมิ 600°C

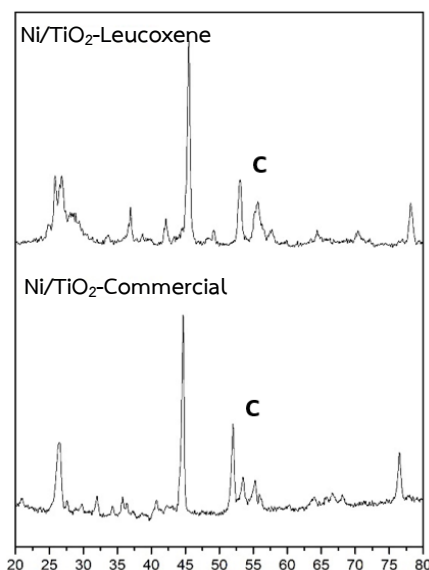
3.4 อิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทน

จากรูปที่ 7 พบว่าอุณหภูมิมีผลอย่างชัดเจนต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO_2 -Leucoxene โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 600 เป็น 650°C ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนสูงขึ้นอย่างเด่นชัดตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา หลังเริ่มปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ 650°C ให้ค่า conversion สูงประมาณ 96–97% ขณะที่ที่ 600°C ให้ค่าประมาณ 77–78% และเมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 60–120 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 650°C ยังคงให้ค่า conversion สูงมากเกือบคงที่อยู่ที่ 98–99% ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ 600°C เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและอยู่ในช่วงประมาณ 79–84% นอกจากนี้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO_2 -Commercial ที่อุณหภูมิ 650°C ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนเท่ากับ 81.2 % ที่เวลา 120 นาที

แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะของปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนซึ่งเป็น ปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงช่วยส่งเสริมทั้งด้านจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา ทำให้การแตกพันธะ C-H ของมีเทนเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนสูงขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ การที่เส้นกราฟที่ 650 °C อยู่ในระดับสูงและแทบไม่ลดลงตลอด 120 นาที บ่งชี้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Leucoxene มีความเสถียรค่อนข้างดีภายใต้สภาวะดังกล่าว ผลที่ได้จึงชี้ว่าสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Leucoxene อุณหภูมิ 650 °C เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการส่งเสริมการแตกตัวของมีเทนและเพิ่มค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 7 ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนเทียบกับเวลาในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Leucoxene ที่อุณหภูมิ 600 และ 650 °C



รูปที่ 8 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Commercial และ Ni/TiO₂-Leucoxene หลังการทดสอบปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 650 °C

จากรูปที่ 8 ซึ่งแสดงรูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Commercial และ Ni/TiO₂-Leucoxene หลังการทดสอบปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนที่อุณหภูมิ 650 °C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดปรากฏพีคที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคาร์บอนหลังปฏิกิริยาอย่างชัดเจน สะท้อนให้เห็นว่าในระหว่างการทำปฏิกิริยา มีการสลายตัวของมีเทนและเกิดการสะสมของคาร์บอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนที่ให้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนของแข็ง

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Commercial พบพีคของคาร์บอนที่มุม 2θ เท่ากับ 52.00° โดยมีขนาดผลึกเฉลี่ย (crystallite size, D) เท่ากับ 19.04 นาโนเมตร (nm) ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Leucoxene ปรากฏพีคของคาร์บอนที่มุม 2θ เท่ากับ 52.19° และมีขนาดผลึกเฉลี่ยเท่ากับ 17.28 nm แม้ว่าพีคของคาร์บอนจะพบได้ในทั้งสองตัวอย่าง แต่ค่า crystallite size ของคาร์บอนที่ต่ำกว่าในตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Leucoxene บ่งชี้ว่าคาร์บอนที่ก่อตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดนี้มีขนาดผลึกคาร์บอนที่เล็กกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Commercial คาร์บอนที่มีโดเมนผลึกเล็กกว่าอาจมีแนวโน้มไม่เติบโตเป็นชั้นคาร์บอนหนาหรือโครงสร้างที่ปิดคลุมผิวของ nickel species อย่างสมบูรณ์ จึงอาจช่วยลดผลกระทบจาก carbon encapsulation และช่วยให้ตำแหน่งว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยายังคงสามารถเข้าร่วมปฏิกิริยาได้ในระยะเวลาที่ศึกษา ความสัมพันธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ Ni/TiO₂-Leucoxene ยังคงให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนในระดับสูงภายใต้สภาวะการทดลอง

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบสมรรถนะเบื้องต้นของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Commercial และ Ni/TiO₂-Leucoxene ในปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนเป็นหลัก ดังนั้นควรมีการศึกษาสมบัติเชิงลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างรูพรุนด้วย สถานะออกซิเดชันและความสามารถในการรีดิวซ์ของ nickel species การกระจายตัวของ Ni และองค์ประกอบรวม รวมถึงปริมาณและลักษณะของคาร์บอนสะสมหลังปฏิกิริยาเพื่อยืนยันกลไกการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา บทบาทของ Fe₂O₃ ในตัวรองรับจากแร่ลูโคซีน และความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดคาร์บอนกับเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์จากแร่ลูโคซีนของไทยและเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์เกรดการค้า สำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/TiO₂-Leucoxene มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการแตกตัวของมีเทนเหนือกว่า Ni/TiO₂-Commercial อย่างชัดเจน โดยให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของมีเทนสูงถึง 98.7% ที่อุณหภูมิ 650 °C และเวลา 90 นาที

ผล XRD พบว่า TiO₂-Leucoxene มีองค์ประกอบออกไซด์ร่วม ได้แก่ Fe₂O₃ และ SiO₂ และหลังการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาพบเฟสของ NiO โดย Ni/TiO₂-Leucoxene มีขนาดผลึกเฉลี่ยของ NiO เท่ากับ 11.9 nm ซึ่งเล็กกว่า Ni/TiO₂-Commercial ที่มีค่า 14.6 nm เมื่อพิจารณาความพร้อมของวัตถุดิบในประเทศ แสดงให้เห็นว่าแร่ลูโคซีนของไทยเป็นตัวรองรับที่มีศักยภาพสำหรับการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจนจากมีเทนในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณบริษัทสินแร่สาคร จำกัด สำหรับการอนุเคราะห์แร่ลูโคซีนธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Muhire F, Turyareeba D, Adaramola MS, Nantongo M, Atukunda R, Olyanga AM. Drivers of green energy transition: A review. *Green Energy and Resources*. 2024;2(4): 100105.
- [2] Pongthanasawan J, Sorapipatana C. Greenhouse gas emissions from Thailand's transport sector: Trends and mitigation options. *Applied Energy*. 2013;101:288-98.
- [3] Kanchana K. Comparative approaches to energy transition: Policy guideline for enhancing Thailand's path to a low-carbon economy. *Energies*. 2024;17(22):5620.
- [4] Osman AI, Mehta N, Elgarahy AM, Hefny M, Al-Hinai A, Al-Muhtaseb AaH, Rooney DW. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2022;20(1):153-88.
- [5] Rambhujun N, Salman MS, Wang T, Pratthana C, Sapkota P, Costalin M, Lai Q, Aguey-Zinsou K-F. Renewable hydrogen for the chemical industry. *MRS Energy & Sustainability*. 2020;7:E33.
- [6] Abbas HF, Daud WW. Hydrogen production by methane decomposition: A review. *International journal of hydrogen energy*. 2010;35(3):1160-90.
- [7] Hantoko D, Khan WU, Osman AI, Nasr M, Rashwan AK, Gambo Y, Al Shoaibi A, Chandrasekar S, Hossain MM. Carbon-neutral hydrogen production by catalytic methane decomposition: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2024;22(4):1623-63.
- [8] Takenaka S, Ogihara H, Yamanaka I, Otsuka K. Decomposition of methane over supported-Ni catalysts: effects of the supports on the catalytic lifetime. *Applied Catalysis A: General*. 2001;217(1-2):101-10.
- [9] Himabindu V, Srilatha K, Bhagawan D, Srinivasulu D. Comparison study between Ni/TiO₂ and Ni/flame synthesized TiO₂ catalysts for hydrogen production using thermocatalytic decomposition of methane. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2018;25(1):91-7.
- [10] Aphairaj D, Wirunmongkol T, Niyomwas S, Pavasupree S, Limsuwan P. Synthesis of anatase TiO₂ nanotubes derived from a natural leucoxene mineral by the hydrothermal method. *Ceramics International*. 2014;40(7): 9241-7.

- [11] Bayat N, Rezaei M, Meshkani F. Methane decomposition over Ni-Fe/Al₂O₃ catalysts for production of CO_x-free hydrogen and carbon nanofiber. *International journal of hydrogen energy*. 2016;41(3):1574-84.
- [12] Wang Y, Zhang Y, Zhao S, Zhu J, Jin L, Hu H. Preparation of bimetallic catalysts Ni-Co and Ni-Fe supported on activated carbon for methane decomposition. *Carbon Resources Conversion*. 2020;3:190-7.
- [13] Li S, Liao J, Zhang Z, Xu G. Catalytic decomposition of methane over Fe₂O₃-Al₂O₃ catalysts with high iron contents and at high CH₄ space velocities. *Resources Chemicals and Materials*. 2025;4(4):100123.

การศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลและกรดลอริก โดยใช้กรด 12-ทังสโตฟอสฟอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ละอองทิพย์ ยววรรณศรี^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้ประพันธ์บทความ

ที่อยู่อีเมล: la-onghip.y@en.rmutt.ac.th

Received: April 22, 2026 Revised: June 5, 2026 Accepted: June 9, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลและกรดลอริก โดยใช้กรด 12-ทังสโตฟอสฟอริก (12-Tungstophosphoric acid, TPA) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองดำเนินการในขวดก้นกลมสี่คอขนาด 250 มิลลิลิตร ภายใต้การกวนและให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำมันซิลิโคน โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วง 110–170 °C และอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อกลีเซอรอลที่ 1:1–1:4 ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก ซึ่งคำนวณจากค่ากรดไขมันอิสระที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรตผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคืออัตราส่วนโดยโมล 1:3 ที่อุณหภูมิ 170 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TPA ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของกรดลอริก และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกสูงสุดเท่ากับ 89.2% การศึกษาจลนศาสตร์พบว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง โดยมีค่าคงที่ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 170 °C เท่ากับ 0.0236 L/mol·min สมการอัตราปฏิกิริยา คือ $\text{Rate} = 0.0236[\text{LA}]^2$ และค่าพลังงานก่อกัมมันต์เท่ากับ 67.92 kJ/mol

คำสำคัญ: จลนศาสตร์เคมี ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน กลีเซอรอล กรดลอริก

Kinetic study of glycerol-lauric acid esterification using 12-tungstophosphoric acid as a catalyst

La-onghip Yuwansri^{1*}

¹ Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

* Corresponding author.

Email address: la-onghip.y@en.rmutt.ac.th

Received: April 22, 2026 Revised: June 5, 2026 Accepted: June 9, 2026

Abstract

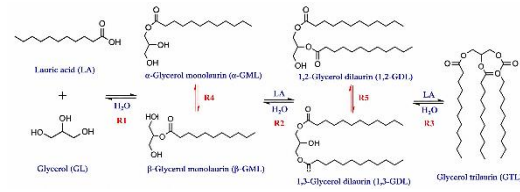
This study aims to investigate the kinetics of the esterification reaction between glycerol and lauric acid using 12-tungstophosphoric acid (TPA) as a catalyst. The experiments were conducted in a 250 mL four-neck round-bottom flask, equipped with a stirring system and heated via a silicone oil bath. The effects of reaction temperature (110-170 °C) and molar ratio of lauric acid to glycerol (1:1–1:4) on the conversion of lauric acid were examined. The conversion was calculated based on free fatty acid (FFA) values determined by titration. The results indicated that the optimal condition was achieved at a molar ratio of 1:3, temperature of 170 °C, catalyst loading of 1 wt% of lauric acid, and a reaction time of 60 min, yielding a maximum lauric acid conversion of 89.2%. Kinetic analysis revealed that the reaction follows second-order kinetics, with a rate constant (k) of 0.0236 L/mol·min at 170 °C. The reaction rate equation is expressed as $\text{Rate} = 0.0236[\text{LA}]^2$ and an activation energy (E_a) of 67.92 kJ/mol.

Keywords: Chemical reaction kinetics, Esterification, Glycerol, Lauric acid

1. บทนำ

อุตสาหกรรมไบโอดีเซลที่กำลังเติบโตอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดกลีเซอรอลดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้ในปริมาณส่วนเกิน จึงมีความจำเป็นต้องหาแนวทางใหม่ ๆ เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน โดยทั่วไปกลีเซอรอลดิบมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของการผลิตไบโอดีเซล คาดการณ์ว่าภายในปี ค.ศ. 2030 จะมีการผลิตกลีเซอรอลดิบประมาณ 4,000 ล้านแกลลอน เนื่องจากการผลิตไบโอดีเซลทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากประมาณ 46,799 ล้านลิตรในปี ค.ศ. 2020 เป็น 49,882 ล้านลิตรในปี ค.ศ. 2030 [1] สถานการณ์ดังกล่าวก่อให้เกิดความท้าทายอย่างมีนัยสำคัญทั้งในด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ หากไม่ได้รับการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ กลีเซอรอลจัดเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสำหรับการสังเคราะห์สารเคมีที่มีมูลค่าสูง เช่น โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) และไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) [2]

หนึ่งในกระบวนการที่สำคัญในการเพิ่มมูลค่าของกลีเซอรอลคือปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมัน เช่น กรดลอริก ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มกลีเซอไรด์ ได้แก่ โมโนลอรีน (Monolaurin) ไดลอรีน (Dilaurin) และไตรลอรีน (Trilaurin) [3-4] กลไกของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างกรดลอริกและกลีเซอรอลเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องหลายขั้น (Consecutive reaction) โดยเริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ของกรดลอริกกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของกลีเซอรอล ภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยากรด ส่งผลให้เกิดพันธะเอสเทอร์และน้ำเป็นผลพลอยได้ในขั้นแรกจะเกิดโมโนลอรีน จากนั้นสามารถเกิด ปฏิกิริยาต่อเนื่องกับกรดลอริกจนเกิดไดลอรีนและไตรลอรีนตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 1 [4] โดยเฉพาะโมโนลอรีนซึ่งเป็นสารที่มีมูลค่าสูง เนื่องจากมีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวและมีฤทธิ์ต้านจุลชีพ จึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ดูแลผิวและความงาม และอุตสาหกรรมเภสัชกรรม [5-7]



รูปที่ 1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างกรดลอริกและกลีเซอรอล [4]

โดยทั่วไปปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalysts) เช่น กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) และ กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและมีต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักประกอบด้วยโมโนกลีเซอไรด์ประมาณร้อยละ 40–60 และไดกลีเซอไรด์ร่วมกับไตรกลีเซอไรด์ประมาณร้อยละ 35–45 [8] และยังมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดเฮเทอโรโพลีซินดิโครสสร้างเคกกิน (Keggin-type heteropoly acids; HPA) เช่น 12-tungstophosphoric acid; HPW ($H_3PW_{12}O_{40}$) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากมีความเป็นกรดแบบบรอนสเตด (Brønsted acidity) สูง จึงสามารถส่งเสริมปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9]

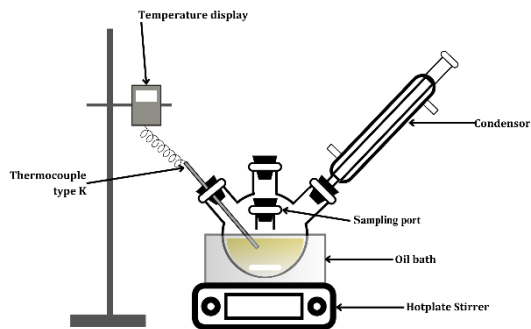
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาจากงานศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลและกรดลอริก โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อกลีเซอรอลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกพร้อมทั้งศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาโดยพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

กรดลอริก (lauric acid, $C_{12}H_{24}O_2$, ความบริสุทธิ์ 98%, Sigma-Aldrich) กลีเซอรอล (Glycerol, $C_3H_8O_3$, ความบริสุทธิ์ 99.5%, Daejung) และกรด 12-ทังสโตฟอสฟอริก (12-tungsto-phosphoric acid (TPA), $H_3PW_{12}O_{40}$, Loba) นอกจากนี้ สารที่ใช้ในการไทเทรตเพื่อหาความเป็นกรดประกอบด้วยเอทานอล (Ethanol, ความบริสุทธิ์ 99.5%, Labscan) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH, ความบริสุทธิ์ 99.5%, KemAus) และฟีนอล์ฟทาเลอิน (phenolphthalein, $C_{20}H_{14}O_4$)

2.2 วิธีการทดลอง



รูปที่ 2 แผนผังแสดงการจัดชุดการทดลอง

การติดตั้งชุดการทดลองแสดง ดังรูปที่ 2 โดยใช้ขวดกันกลืนสีคอขนาด 250 มิลลิลิตร วางบนเครื่องให้ความร้อนพร้อมระบบกวน (Hot plate with magnetic stirrer) ในอ่างน้ำมันซิลิโคนติดตั้งคอนเดนเซอร์ และเทอร์โมคัปเปิลชนิด K สำหรับควบคุมและวัดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยการทดลองได้ทำการให้ความร้อนกรดลอริกและกลีเซอรอลแยกกันตามอัตราส่วนโดยโมล 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ภายใต้ช่วงอุณหภูมิ 110–170 °C จนกระทั่งสารทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากันตามที่กำหนด จากนั้นจึงนำสารทั้งสองมาผสมรวมกันในระบบปฏิกิริยา เมื่อระบบถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้ว จึงเติมตัวเร่งปฏิกิริยา TPA เพื่อเริ่มต้นปฏิกิริยา ภายใต้สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิและอัตราการกวนที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที (rpm) ให้คงที่ตลอดการทดลอง จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างปริมาตรประมาณ 1.5 mL ในช่วงเวลาที่กำหนด และนำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยง เพื่อแยกชั้นของเหลว โดยแยกชั้นอินทรีย์ด้านบนออกมาไปไทเทรตเพื่อวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระและรายงานผลในรูปของร้อยละกรดไขมันอิสระ (%Free fatty acid, %FFA) ซึ่งถูกนำไปใช้ในการคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก (%Conversion of lauric acid, Conversion of LA(%))

2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยวิธีการไทเทรต

ทำการหากรดไขมันอิสระด้วยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน NaOH ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล (N) และใช้และฟีนอล์ฟทาเลอินเป็นอินดิเคเตอร์ โดยค่า %FFA คำนวณได้จากสมการที่ (1) [10]

$$\%FFA = \frac{V \times N \times 20.03}{W} \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตร NaOH ที่ใช้ในการไทเทรตจากสารตัวอย่าง (mL) N คือ ความเข้มข้นของ NaOH (N) W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง และ 20.03 คือ คีค่าคงที่ที่ได้จากน้ำหนักโมเลกุลของกรดลอริก (200.32 g/mol) หารด้วย 10 โดยตัวหาร 10 เกิดจากการรวมการแปลงหน่วยและการรายงานผลในรูปร้อยละไว้ในสมการการคำนวณ %FFA

ค่า %FFA ที่ได้ถูกนำไปใช้ในการคำนวณ % Conversion of LA ดังแสดงในสมการที่ (2)

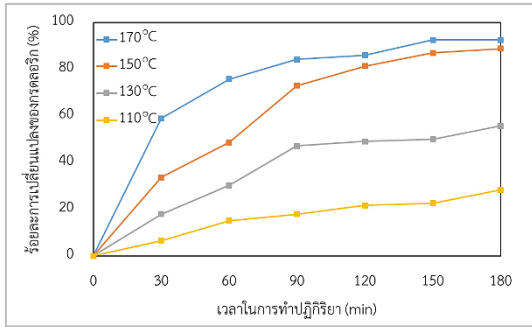
$$\%Conversion \text{ of LA} = \left(\frac{[FFA]_0 - [FFA]_t}{[FFA]_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ FFA_0 คือ ร้อยละกรดไขมันอิสระเริ่มต้น และ FFA_t คือ ร้อยละกรดไขมันอิสระ ณ เวลา t

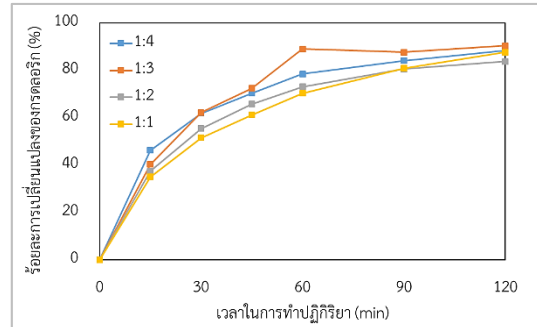
3. ผลการดำเนินงานวิจัย

3.1 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

รูปที่ 3 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลและกรดลอริกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TPA (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของกรดลอริก, 1 wt.% of LA) ที่อัตราส่วนโดยโมลของ กรดลอริกต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1:2 และศึกษาช่วงอุณหภูมิ 110 ถึง 170 °C ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 110 °C มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกน้อยที่สุด ทั้งนี้ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำ โมเลกุลของสารตั้งต้นมีพลังงานต่ำ ส่งผลให้การชนกันของโมเลกุลสารมีประสิทธิภาพลดลง [11] ในทางกลับกัน เมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกของปฏิกิริยามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ อุณหภูมิยังมีผลต่อความสามารถในการละลายของกลีเซอรอลในกรดลอริก โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กลีเซอรอลสามารถกระจายตัวในเฟสของกรดไขมันได้ดีขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของกลีเซอรอลในระบบเพิ่มสูงขึ้น และเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน [12]



รูปที่ 3 ผลอุณหภูมิต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิก (อัตราส่วนโดยโมลของกรดลิกต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1:2 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของกรดลิก)



รูปที่ 4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดลิกต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิก (อุณหภูมิ 170 °C และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของกรดลิก)

3.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลิกต่อกลีเซอรอล

รูปที่ 4 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของกรดลิกต่อกลีเซอรอลต่อร้อยละ การเปลี่ยนแปลงของกรดลิกในปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TPA (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของกรดลิก) ที่อุณหภูมิ 170 °C และศึกษาช่วงอัตราส่วนโดยโมลของกรดลิกต่อกลีเซอรอล 1:1 ถึง 1:4 ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของ สารตั้งต้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักของเลอชาเตอลิเยร์ (Le Chatelier's principle) ที่กล่าวว่าการเพิ่มอัตราส่วนของสารตั้งต้นจะส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาเคลื่อนไปในทิศทางของการเกิดผลิตภัณฑ์มากขึ้น [11] อย่างไรก็ตามในช่วงท้ายของปฏิกิริยา พบว่าในทุกอัตราส่วนของสารตั้งต้นให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลิกใกล้เคียงกัน ประมาณร้อยละ 80 - 87 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนของสารตั้งต้น จะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงเริ่มต้น แต่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปความเข้มข้นของสารตั้งต้นส่วนเกินจะลดลง ขณะที่ความเข้มข้นของสารจำกัด (Limiting reactant) อยู่ในระดับต่ำมากจนไม่สามารถส่งผลต่ออัตราการเกิด ปฏิกิริยาได้อย่างมีนัยสำคัญ [13]

3.3 ผลการศึกษาจลนศาสตร์เคมีของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลและกรดลิก

จากการศึกษาจลนศาสตร์เคมีของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลและกรดลิก จะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดลิกต่อกลีเซอรอล 1:3 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของกรดลิก ที่อุณหภูมิ 170 °C ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองจลนศาสตร์ในรูปของปฏิกิริยาอันดับศูนย์ อันดับหนึ่ง และอันดับสอง ซึ่งสามารถแสดงสมการอัตราปฏิกิริยาได้ดังต่อไปนี้

สมการอัตราปฏิกิริยาอันดับศูนย์:

$$Rate = k \quad (3)$$

และสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$[A]_0 - [A] = kt \quad (4)$$

ซึ่งพล็อตกราฟระหว่าง $[A]_0 - [A]$ (mol/L) กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา (min)

สมการอัตราปฏิกิริยาปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง:

$$Rate = k[A] \quad (5)$$

และสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\ln([A]_0/[A]) = kt \quad (6)$$

ซึ่งพล็อตกราฟระหว่าง $\ln([A]_0/[A])$ กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา (min)

สมการอัตราปฏิกิริยาปฏิกิริยาอันดับสอง:

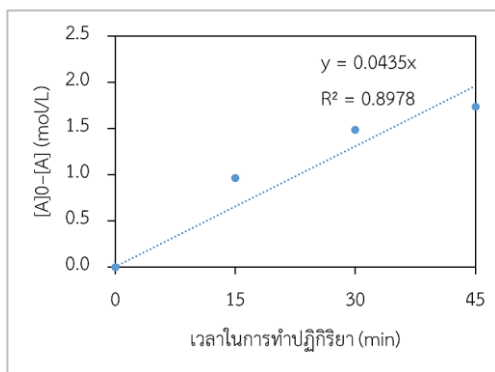
$$\text{Rate} = k[A]^2 \quad (7)$$

และสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

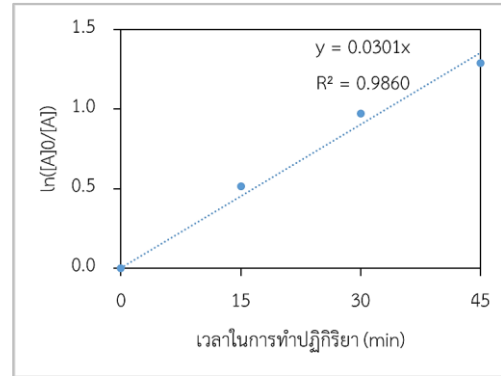
$$(1/[A]) - (1/[A]_0) = kt \quad (8)$$

ซึ่งพล็อตกราฟระหว่าง $(1/[A]) - (1/[A]_0)$ (L/mol) กับ เวลาในการทำปฏิกิริยา (min)

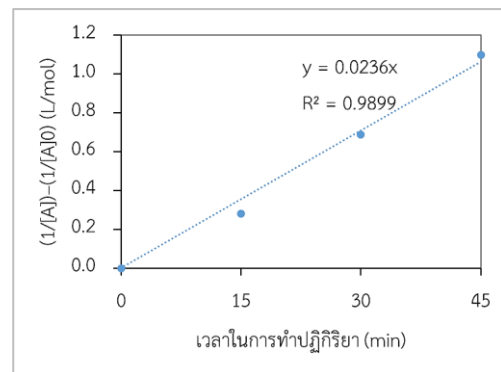
เมื่อ $[A]_0$ คือ ความเข้มข้นของกรดคลอริกเริ่มต้น และ $[A]_t$ คือ ความเข้มข้นของกรดคลอริก ณ เวลา t ทั้งนี้ ได้พิจารณาความสัมพันธ์เชิงเส้นของกราฟ $[A]_0 - [A]$ กับ เวลา (รูปที่ 5), $\ln([A]_0/[A])$ กับ เวลา (รูปที่ 6) และ $(1/[A]) - (1/[A]_0)$ กับ เวลา (รูปที่ 7) ที่อุณหภูมิ 170 °C ตามลำดับ



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดคลอริกที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาในการทำปฏิกิริยา สำหรับการวิเคราะห์จลนศาสตร์อันดับศูนย์

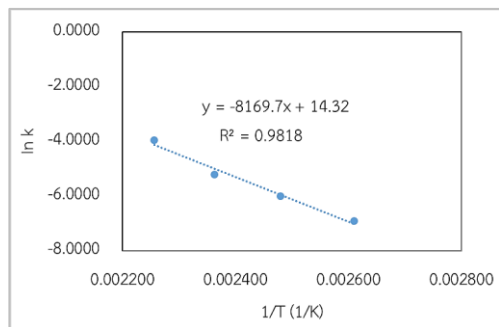


รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดคลอริกที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาในการทำปฏิกิริยา สำหรับการวิเคราะห์จลนศาสตร์อันดับหนึ่ง



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดคลอริกที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาในการทำปฏิกิริยา สำหรับการวิเคราะห์จลนศาสตร์อันดับสอง

ผลการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (รูปที่ 5) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.8978 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (รูปที่ 6) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9860 และปฏิกิริยาอันดับสอง (รูปที่ 7) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9899 ซึ่งให้ความเป็นเส้นตรงดีที่สุด แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยานี้สอดคล้องกับแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับสองมากที่สุด จากความชันของกราฟในรูปที่ 7 สามารถคำนวณค่าคงที่อัตราปฏิกิริยา (k) ได้เท่ากับ 0.0236 L/mol.min ที่อุณหภูมิ 170 °C โดยสามารถเขียนสมการอัตราปฏิกิริยาได้เป็น $\text{Rate} = 0.0236[A]^2$



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ (กราฟ Arrhenius) สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลและกรดลอริก

นอกจากนี้ จากรูปที่ 8 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ (1/K) ตามสมการ Arrhenius สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (9)

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (9)$$

เมื่อจัดรูปให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้เป็น

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (10)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยา, A คือ แฟกเตอร์ความถี่ (frequency factor), E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (kJ/mol), R คือ ค่าคงที่แก๊ส (8.314 J/mol·K) และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

จากสมการที่ (10) จะเห็นได้ว่าเป็นสมการเส้นตรงในรูป $y = mx + c$ ดังนั้นจึงทำการพล็อตกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ซึ่งความชันของกราฟเท่ากับ $-E_a/R$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\ln A$ พบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy, E_a) ของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 67.92 kJ/mol และแฟกเตอร์ความถี่ (frequency factor, A) เท่ากับ 1.22×10^7 L/mol·min ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับค่าที่รายงานสำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลและกรดไขมันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดชนิดต่าง ๆ โดย Chew และคณะ [14] รายงานค่าพลังงานก่อกัมมันต์เท่ากับ 63.88 kJ/mol สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลและกรดลอริก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HPW/CaSBA-15 นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าพลังงาน ก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าสูงถึง 89.3 kJ/mol

[15] แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้นและมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น [14] ทั้งนี้ TPA เป็นกรดเฮเทอโรโพลีที่มีความเป็นกรดแบบบรอนสเตดสูง [9] สามารถช่วยโปรตอนเนตหมู่คาร์บอนิลของกรดลอริก ทำให้คาร์บอนของหมู่คาร์บอกซิลมีความไวต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของกลีเซอรอลมากขึ้น [16] จึงช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาและส่งเสริมการเกิดพันธะเอสเทอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาจลนศาสตร์เคมีของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลและกรดลอริกโดยใช้ TPA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาผลของอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริก ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของกรดลอริกต่อกลีเซอรอลช่วยเร่งปฏิกิริยาในช่วงเริ่มต้น แต่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดลอริกในช่วงท้ายไม่แตกต่างกัน ผลการศึกษาจลนศาสตร์เคมีพบว่าปฏิกิริยานี้สอดคล้องกับแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับสอง โดยมีค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0236 L/mol·min ที่อุณหภูมิ 170 °C และสามารถเขียนสมการอัตราปฏิกิริยาได้เป็น $\text{Rate} = 0.0236[\text{LA}]^2$ นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ Arrhenius พบว่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 67.92 kJ/mol และแฟกเตอร์ความถี่เท่ากับ 1.22×10^7 L/mol·min ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ รวมถึงการกำหนดสภาวะ การดำเนินงานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตโมโนลอรีนในระดับอุตสาหกรรม ทั้งนี้ การศึกษาต่อยอดในอนาคตควรพิจารณาการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เช่น โมโนลอรีน ไดลอรีน และไตรลอรีน ด้วยเทคนิค GC หรือ HPLC และความเลือกจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและศักยภาพในการประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และประสบการณ์จากหลายภาคส่วน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วีรินทร์ดา เมนส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิจัย ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ตลอดการดำเนินงาน ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Liu Y, Zhong B, Lawal A. Recovery and utilization of crude glycerol, a biodiesel byproduct. *RSC advances*. 2022;12(43): 27997-8008.
- [2] Sandid A, Spallina V, Esteban J. Glycerol to value-added chemicals: State of the art and advances in reaction engineering and kinetic modelling. *Fuel Processing Technology*. 2024;253:108008.
- [3] Hoo P, Abdullah AZ. Monolaurin yield optimization in selective esterification of glycerol with lauric acid over post impregnated HPW/SBA-15 catalyst. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2016;33(4): 1200-10.
- [4] Hu H-Q, Zhang Y, Fan M, Cai Y, Chu G-W, Zhang L-L. Complete kinetic model for esterification reaction of lauric acid with glycerol to synthesize glycerol monolaurate. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2024;70:211-21.
- [5] Chen F, Zhang G, Liu C, Zhang J, Zhao F, Xu B. Highly selective synthesis of monolaurin via enzymatic transesterification under batch and continuous flow conditions. *Journal of oleo science*. 2019;68(11):1125-32.
- [6] Schlievert PM, Peterson ML. Glycerol monolaurate antibacterial activity in broth and biofilm cultures. *PloS one*. 2012;7(7): e40350.
- [7] Lozano P, Gomez C, Nieto S, Sanchez-Gomez G, García-Verdugo E, Luis SV. Highly selective biocatalytic synthesis of monoacylglycerides in sponge-like ionic liquids. *Green Chemistry*. 2017;19(2):390-6.
- [8] Pérez-Pariente Jn, Diaz I, Mohino F, Sastre E. Selective synthesis of fatty monoglycerides by using functionalised mesoporous catalysts. *Applied Catalysis A: General*. 2003;254(2): 173-88.
- [9] Okuhara T, Mizuno N, Misono M. Catalysis by heteropoly compounds—recent developments. *Applied Catalysis A: General*. 2001;222(1-2): 63-77.
- [10] Folayan AJ, Anawe PAL, Aladejare AE, Ayeni AO. Experimental investigation of the effect of fatty acids configuration, chain length, branching and degree of unsaturation on biodiesel fuel properties obtained from lauric oils, high-oleic and high-linoleic vegetable oil biomass. *Energy Reports*. 2019;5:793-806.
- [11] Hoo P-Y, Abdullah AZ. Direct synthesis of mesoporous 12-tungstophosphoric acid SBA-15 catalyst for selective esterification of glycerol and lauric acid to monolaurate. *Chemical Engineering Journal*. 2014;250: 274-87.
- [12] Nouredдини H, Harkey D, Gutsman M. A continuous process for the glycerolysis of soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2004;81(2):203-7.
- [13] Mamtani K, Shahbaz K, Farid MM. Glycerolysis of free fatty acids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;137:110501.
- [14] Chew SJ, Hoo PY, Abdullah AZ, Rahim SKEA, Teoh YP, Shuit SH, Ng QH, editors. Kinetic modelling and mechanism study for monolaurin esterification with 12-tungstophosphoric acid incorporated calcium modified SBA-15. *AIP Conference Proceedings*; 2022: AIP Publishing LLC.

- [15] Hermida L, Abdullah AZ, Mohamed AR. Synthesis of monoglyceride through glycerol esterification with lauric acid over propyl sulfonic acid post-synthesis functionalized SBA-15 mesoporous catalyst. *Chemical Engineering Journal*. 2011;174(2-3):668-76.
- [16] He P, Fu G, Zhang Y, Wang Y, Yu G, Wu G. Esterification of caprylic acid with glycerol for medium chain glycerides production catalyzed by waste coconut shell derived sulfonated carbon catalysts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024; 12(6):114849.

การปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งของเปลือกทุเรียนด้วย กระบวนการทอรรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกล

วริชรา จำยอ¹ พลอยไพลิน ชุมเมธ¹ กิติภา หนูเลี้ยง¹ และ สุพาชัย เจษฎาเจิม^{1*}

¹ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ.

ที่อยู่อีเมล: supachai.j@sci.kmutnb.ac.th

Received: April 5, 2026 Revised: June 9, 2026 Accepted: June 15, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งของเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกล เพื่อยกระดับคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งและวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 280, 300, 320 และ 340 °C ภายใต้ความดัน 30, 60, 90 และ 120 บาร์ ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้เชิงมวลมีแนวโน้มลดลงจาก 89.07% เหลือ 41.83% ขณะที่ปริมาณคาร์บอน คาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนสูงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยปริมาณคาร์บอนเพิ่มจาก 48.43% เป็น 69.87% ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มจาก 13.97% เป็น 41.39% และค่าความร้อนสูงเพิ่มจาก 18.01 เป็น 25.52 MJ/kg การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูงสัมพันธ์กับการลดลงของอัตราส่วน H/C และ O/C รวมถึงการลดลงของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนในโครงสร้างชีวมวล อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้เชิงพลังงานร่วมด้วย พบว่าสภาวะ 340 °C และ 120 บาร์ แม้ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด แต่มีร้อยละผลได้เชิงพลังงานเพียง 59.27% และผลิตภัณฑ์ไม่สามารถระบุเป็นเม็ดได้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่สภาวะ 280 °C และ 90 บาร์ ให้ร้อยละผลได้เชิงพลังงานสูงสุดเท่ากับ 104.73% ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ากระบวนการทอรรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกลสามารถปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งของเปลือกทุเรียนได้ โดยสภาวะในช่วง 280–300 °C ภายใต้ความดัน 60–90 บาร์ มีแนวโน้มเหมาะสมกว่าในเชิงสมดุลระหว่างคุณภาพเชื้อเพลิง ร้อยละผลได้เชิงพลังงาน และความสามารถในการคงรูปของผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ: เปลือกทุเรียน กระบวนการทอรรีแฟกชัน ความดันเชิงกล ทอรรีไฟต์ คาร์บอนคงตัว

Enhancing the solid fuel properties of durian peel through torrefaction under mechanical pressure

Waritsara Chaioan¹, Phoipailin Chummek¹, Kitipa Nuliang¹ and Supachai Jadsadajerm^{1*}

¹ Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author.

Email address: supachai.j@sci.kmutnb.ac.th

Received: April 5, 2026 Revised: June 9, 2026 Accepted: June 15, 2026

Abstract

This study investigated the enhancement of the solid fuel properties of durian peel through torrefaction under mechanical pressure to improve its chemical and physical characteristics prior to its use as a solid fuel and as a feedstock for biochar production. The experiments were carried out at 280, 300, 320, and 340 °C under pressures of 30, 60, 90, and 120 bar. The results showed that increasing temperature and pressure reduced the mass yield from 89.07% to 41.83%, while the carbon content, fixed carbon content, and higher heating value increased. The carbon content increased from 48.43% to 69.87%, the fixed carbon content increased from 13.97% to 41.39%, and the higher heating value increased from 18.01 to 25.52 MJ/kg. The increase in higher heating value was related to the decreases in the H/C and O/C atomic ratios, as well as the reduction of oxygen-containing functional groups in the biomass structure. However, when the energy yield was considered, the condition of 340 °C and 120 bar, although giving the highest higher heating value, resulted in an energy yield of only 59.27% and the product could not completely retain its compact pellet form. In contrast, the condition of 280 °C and 90 bar provided the highest energy yield of 104.73%. These results indicate that torrefaction under mechanical pressure can improve the solid fuel properties of durian peel. The conditions in the range of 280–300 °C under 60–90 bar appear to be more suitable in terms of the balance among fuel quality, energy yield, and the ability of the product to retain its compact form.

Keywords: Durian peel, Torrefaction, Mechanical pressure, Torrefied, Fixed carbon

1. บทนำ

ในปัจจุบัน พลังงานทดแทนมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถทดแทนได้และมีแนวโน้มลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล [1] พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานทดแทนประเภทหนึ่งที่เกิดได้จากวัสดุชีวมวลและอินทรีย์วัตถุจากพืชและสัตว์ เช่น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและเศษไม้ [2] โดยสามารถแปรรูปเป็นพลังงานได้หลายรูปแบบ เช่น การเผาไหม้เพื่อผลิตพลังงานความร้อนและการหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ [3,4] อย่างไรก็ตามการใช้ชีวมวลดิบหรือการแปรรูปบางวิธียังมีข้อจำกัด เช่น การเก็บของสิ่งแปลกปลอม ปัญหาควันจากการเผาไหม้ และคุณภาพเชื้อเพลิงที่ยังไม่เหมาะสม จึงมีความสนใจเพิ่มขึ้นในการพัฒนาเชื้อเพลิงแข็งจากชีวมวลเพื่อใช้ทดแทนถ่านหิน [5,6]

เปลือกทุเรียนเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศไทย เนื่องจากการบริโภคและการแปรรูปทุเรียนก่อให้เกิดของเสียในรูปเปลือกจำนวนมาก โดยรายงานก่อนหน้านี้ระบุว่าเปลือกทุเรียนมีสัดส่วนมากกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำหนักผลทั้งหมด หรือประมาณร้อยละ 60–70 ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาด้านการจัดการของเสียและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม [7] นอกจากนี้ เปลือกทุเรียนยังเป็นวัสดุ lignocellulosic ที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยมีรายงานว่าเซลลูโลสประมาณร้อยละ 31–35 หรืออาจสูงถึงราวร้อยละ 50–60 ขึ้นอยู่กับพันธุ์ วิธีการเตรียมตัวอย่าง และวิธีการวิเคราะห์ ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม [8–10] มีการนำเปลือกทุเรียนไปใช้ประโยชน์หลายรูปแบบ เช่น การผลิตน้ำตาลหมักได้ การเตรียมวัสดุคาร์บอน และการผลิตถ่านชีวภาพหรือผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสเพื่อเพิ่มมูลค่าและลดปริมาณของเสีย [9,11,12] อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ชีวมวลหรือถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเพียงอย่างเดียวอาจมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ผลได้เชิงมวลไม่สูงนัก ความหนาแน่นต่ำ และความจำเป็นในการปรับปรุงสมบัติด้านการขึ้นรูปและการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้เหมาะสมยิ่งขึ้น [11,13,14]

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงเสนอการปรับปรุงคุณสมบัติของเปลือกทุเรียนก่อนนำไปผลิตเป็นถ่านชีวภาพ ด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกล กระบวนการทอรรีแฟกชันเป็นกระบวนการ

สลายตัวทางเคมีความร้อนที่ช่วยลดความชื้นและสารระเหยของชีวมวล โดยทั่วไปดำเนินการที่อุณหภูมิ 200–350 °C ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิส และมักดำเนินการที่ความดันบรรยากาศ ผลิตภัณฑ์หลักคือชีวมวลทอรรีไฟด์ ซึ่งเป็นของแข็งสีดำที่มีคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงดีขึ้น ขณะที่ผลิตภัณฑ์รองอยู่ในรูปก๊าซและของเหลว เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน น้ำ และไบโอเอทานอล แม้ว่ากระบวนการทอรรีแฟกชันจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวลได้ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ยังอาจมีข้อจำกัดด้านความหนาแน่นและความเปราะ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้งานและการขึ้นรูป ดังนั้น การประยุกต์ใช้ความดันเชิงกลร่วมกับทอรรีแฟกชันจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการยกระดับสมบัติทางเคมีและกายภาพของเปลือกทุเรียน งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันเชิงกลต่อคุณสมบัติของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอรรีไฟด์ เพื่อประเมินศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งและวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

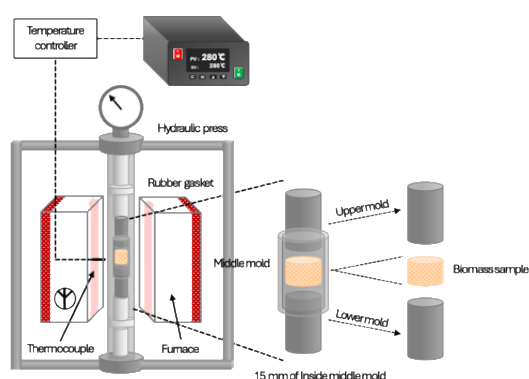
2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

เปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทองจากจังหวัดระยองถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในงานวิจัยนี้ โดยนำเปลือกทุเรียนมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นสับเป็นชิ้นขนาดประมาณ 4 เซนติเมตร และบดด้วยเครื่อง universal cutting mill ให้มีขนาดประมาณ 4 มิลลิเมตร ก่อนบดต่อจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 250 ไมโครเมตร ตัวอย่างที่บดแล้วถูกอบซ้ำที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อลดความชื้นและเก็บรักษาไว้ในโถสุญญากาศจนกว่าจะนำไปใช้ในการทดลอง

2.2 การทอรรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกล

ตัวอย่างเปลือกทุเรียนประมาณ 2.3 กรัม ถูกบรรจุลงในแม่พิมพ์รีแอกเตอร์ และนำไปทอรรีแฟกชันภายในห้องสแตนเลสภายใต้ความดันเชิงกลที่ 30, 60, 90 และ 120 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยค่าความดันที่รายงานในงานวิจัยนี้เป็นค่าความดันที่กำหนดจากเครื่องอัด เพื่อใช้เป็นระดับแรงกดเชิงกลระหว่างการทดลอง ไม่ใช่ความดันของก๊าซภายในระบบ หลังจากบรรจุตัวอย่างลงในแม่พิมพ์แล้ว จึงปรับระดับความดันของเครื่องอัดให้อยู่ที่ค่าที่กำหนด ก่อนเริ่มให้ความร้อนตามสภาวะการทดลอง

การทดลองดำเนินการที่อุณหภูมิ 280, 300, 320 และ 340 °C โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 °C/นาที่ และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 30 นาที ระหว่างกระบวนการ ความดันเชิงกลถูกใช้เพื่อกดอัดตัวอย่างในแม่พิมพ์ร่วมกับการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและการคงรูปของผลิตภัณฑ์หลังการทอรีแฟกชัน หลังสิ้นสุดการทดลองปล่อยให้ระบบเย็นตัวลงจนถึงประมาณ 50 °C ก่อนนำตัวอย่างออกจากรีแอกเตอร์ ชั่งน้ำหนัก และเก็บไว้สำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกเรียกว่าทอรีไฟด์เปลือกทุเรียน (MDP) การทดลองในแต่ละสภาวะดำเนินการซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยของร้อยละผลได้เชิงมวล



รูปที่ 1 การทดลองทอรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกล

2.3 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง

องค์ประกอบธาตุของเปลือกทุเรียนก่อนและหลังการทอรีแฟกชันถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง C.H.N. analyzer รุ่น CHN JM10 (J-Science) เพื่อหาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ส่วนปริมาณออกซิเจนคำนวณจากผลต่าง หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer รุ่น SPECTRUM ONE (PerkinElmer) โดยสแกนจำนวน 64 ครั้ง ในช่วงเลขคลื่น 4000–600 cm^{-1} การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อนและองค์ประกอบโดยประมาณของตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer รุ่น TGA-50H (Shimadzu) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เพื่อประเมินพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน รวมถึงปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย และเถ้า

ค่าความร้อนสูง (higher heating value, HHV) คำนวณจากองค์ประกอบธาตุตามสมการที่ (1)

$$\text{HHV (kJ/kg)} = 5.22\text{C}^2 - 319\text{C} - 1647\text{H} + 38.6\text{CH} + 133\text{N} + 21028 \quad (1)$$

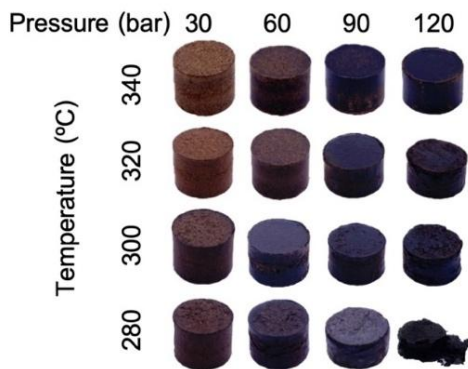
โดยที่ C, H และ N แทนร้อยละโดยมวลของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ตามลำดับ

3. ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะผลิตภัณฑ์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอรีแฟกชัน

ผลิตภัณฑ์เปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกลมีลักษณะเป็นเม็ดเชื้อเพลิงแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยเมื่ออุณหภูมิและระดับแรงกดเชิงกลเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มมีขนาดเล็กลง สีเข้มขึ้น และผิวขรุขระมากขึ้น ที่สภาวะ 280 °C และ 30 บาร์ ผลิตภัณฑ์มีผิวเรียบและมีสีน้ำตาล แต่เมื่อเพิ่มระดับแรงกดเชิงกลเป็น 60, 90 และ 120 บาร์ เม็ดเชื้อเพลิงมีขนาดลดลงและมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการให้แรงกดร่วมกับความร้อนช่วยส่งเสริมการอัดแน่นของอนุภาคชีวมวลระหว่างกระบวนการทอรีแฟกชัน

ส่วนที่สภาวะ 340 °C และ 30 บาร์ ผลิตภัณฑ์ยังคงรูปเป็นเม็ดและมีผิวค่อนข้างเรียบ แต่เมื่อเพิ่มระดับแรงกดเชิงกลเป็น 60 และ 90 บาร์ พบการเกิดผิวขรุขระและรอยแตกกว้างชัดเจนมากขึ้น และที่ 340 °C ภายใต้ระดับแรงกดเชิงกล 120 บาร์ ผลิตภัณฑ์ไม่สามารถคงรูปเป็นเม็ดได้และมีสีดำ ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบชีวมวลที่มากขึ้นร่วมกับการปลดปล่อยสารระเหยภายในโครงสร้างของตัวอย่าง ในขณะเดียวกัน การกดอัดภายใต้ระดับแรงกดสูงอาจทำให้โครงสร้างภายในเกิดการหดตัวและสะสมความเค้นมากขึ้น เมื่อสารระเหยถูกปลดปล่อยออกจากผลิตภัณฑ์จึงทำให้เกิดรอยแตกและทำให้ผลิตภัณฑ์คงรูปได้ลดลง ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิและระดับแรงกดเชิงกลสูงเกินไปอาจไม่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงแข็งในรูปเม็ดอัด แม้ว่าจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้มและมีลักษณะคล้ายถ่านมากขึ้นก็ตาม



รูปที่ 2 ลักษณะที่ปรากฏของผลิตภัณฑ์ทอรรีไฟด์เปลือกทุเรียน

3.2 ร้อยละผลได้เชิงมวล

ร้อยละผลได้เชิงมวลของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอรรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกลคำนวณจากสมการที่ (2)

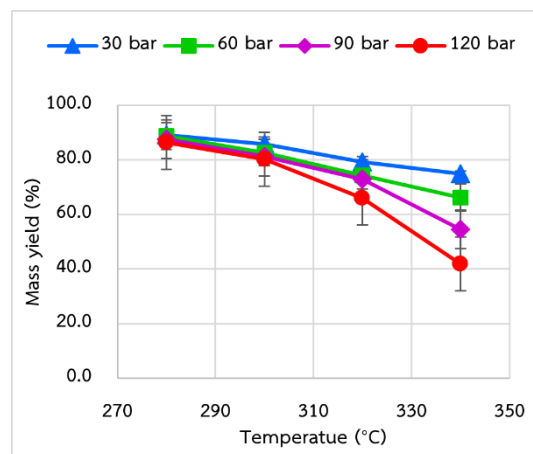
$$MY = \frac{\text{Mass of torrefied durian peel}}{\text{Mass of raw durian peel}} \times 100 \quad (2)$$

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าร้อยละผลได้เชิงมวลมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทอรรีแฟกชันเพิ่มขึ้นในทุกระดับความดัน ที่ความดัน 30 บาร์ ค่าร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงจาก 89.07% ที่ 280 °C เป็น 85.85%, 79.25% และ 74.81% ที่ 300, 320 และ 340 °C ตามลำดับ ขณะที่ที่ความดัน 120 บาร์ ค่าร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงจาก 86.41% ที่ 280 °C เป็น 80.15%, 65.98% และ 41.83% ตามลำดับ โดยค่าต่ำสุดที่พบจากการทดลองคือ 41.83% ที่สภาวะ 340 °C และ 120 บาร์

การลดลงของร้อยละผลได้เชิงมวลเป็นแนวโน้มที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการทอรรีแฟกชัน เนื่องจากความชื้นและสารระเหยถูกกำจัดออกจากชีวมวล รวมทั้งเกิดการสลายตัวของความร้อนขององค์ประกอบชีวมวล โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สลายตัวได้ง่ายในช่วงอุณหภูมิของการทอรรีแฟกชัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การสลายตัวของโครงสร้างชีวมวลและการปลดปล่อยสารระเหยจึงเกิดมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงอย่างต่อเนื่อง

นอกจากนี้ การลดลงของร้อยละผลได้เชิงมวลมีความชัดเจนมากขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับระดับแรงกดดันที่สูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 320 และ 340 °C ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการที่แรงกดดันเชิงกลทำให้อนุภาคชีวมวล

สัมผัสกันแน่นขึ้นและเกิดการอัดแน่นภายในแม่พิมพ์ระหว่างการให้ความร้อน จึงอาจส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชีวมวลภายในผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงร่วมกับระดับแรงกดดันเชิงกลสูง การปลดปล่อยสารระเหยและการหลุดตัวของโครงสร้างอาจเกิดมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียมวลมากขึ้น ดังนั้น ผลการทดลองจึงแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและระดับแรงกดดันมีผลร่วมกันต่อร้อยละผลได้เชิงมวลของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอรรีแฟกชัน

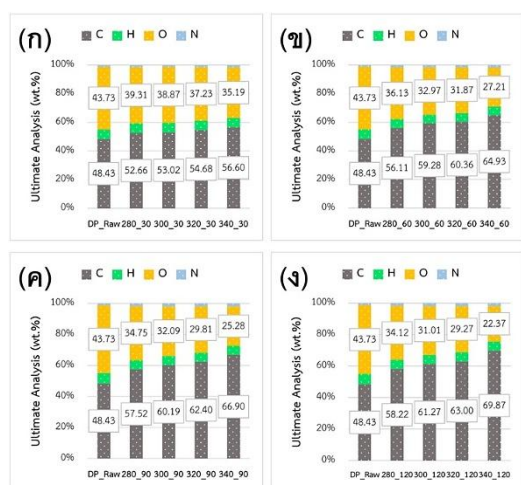


รูปที่ 3 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอรรีไฟด์เปลือกทุเรียน

3.3 องค์ประกอบธาตุ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเปลือกทุเรียนก่อนและหลังการทอรรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกลแสดงดังรูปที่ 4 พบว่าเมื่ออุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้น ปริมาณคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาณไนโตรเจนเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เปลือกทุเรียนดิบมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 48.43 และเมื่อผ่านการทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 280 °C ภายใต้ความดัน 30 บาร์ ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 52.66 และเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเป็นร้อยละ 53.02, 54.68 และ 56.60 ที่อุณหภูมิ 300, 320 และ 340 °C ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน ที่ความดัน 120 บาร์ ปริมาณคาร์บอนเพิ่มจากร้อยละ 58.22 ที่ 280 °C เป็นร้อยละ 61.27, 63.00 และ 69.87 ที่ 300, 320 และ 340 °C ตามลำดับ โดยค่าคาร์บอนสูงสุดที่พบคือร้อยละ 69.87 ที่สภาวะ 340 °C และ 120 บาร์

การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอน พร้อมกับการลดลงของปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน อาจเกิดจากการกำจัดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนและการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันและดีคาร์บอกซิเลชันระหว่างกระบวนการทอรีแฟกชัน ส่งผลให้โครงสร้างของชีวมวลมีความเข้มข้นของคาร์บอนสูงขึ้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและความดันเชิงกลมีผลร่วมกันต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบธาตุของเปลือกทุเรียน และช่วยยกระดับคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ได้

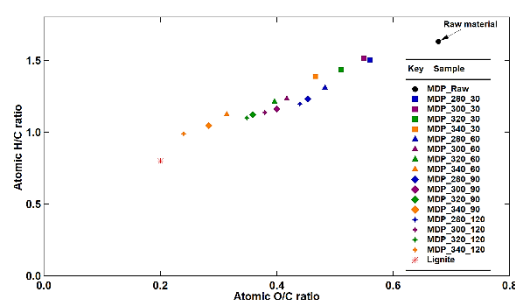


รูปที่ 4 องค์ประกอบธาตุของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอรีไฟต์ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้ความดัน (ก) 30 บาร์ (ข) 60 บาร์ (ค) 90 บาร์ (ง) 120 บาร์

นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบธาตุยังสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากแผนภาพ Van Krevelen ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยเปลือกทุเรียนดิบมีค่าอัตราส่วน H/C และ O/C สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอรีแฟกชัน ซึ่งสะท้อนถึงองค์ประกอบที่มีไฮโดรเจนและออกซิเจนสูงในโครงสร้างชีวมวลดิบ หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟกชัน อัตราส่วน H/C และ O/C มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิและระดับแรงกดเชิงกลเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะตัวอย่างที่เตรียมภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงและระดับแรงกดเชิงกลสูง จุดข้อมูลของผลิตภัณฑ์จึงเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายล่างของแผนภาพ และมีแนวโน้มเข้าใกล้บริเวณของลิกไนต์มากขึ้น

แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทอรีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกลส่งเสริมการลดลงของธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนในผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ดีคาร์บอกซิเลชัน และ

ดีคาร์บอนิลเลชันระหว่างกระบวนการ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสัดส่วนคาร์บอนเพิ่มขึ้นและมีลักษณะเข้าใกล้เชื้อเพลิงแข็งคุณภาพสูงมากขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวโน้มของค่าความร้อนสูงและปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและระดับแรงกดเชิงกลสูงขึ้น

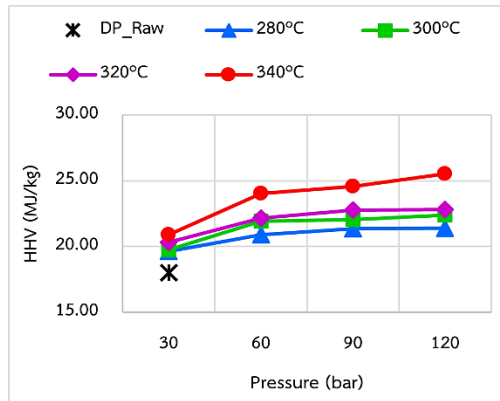


รูปที่ 5 แผนภาพ Van Krevelen ของเปลือกทุเรียนดิบ ผลิตภัณฑ์ทอรีไฟต์เปลือกทุเรียนภายใต้สภาวะต่าง ๆ

3.4 ค่าความร้อนสูง

ค่าความร้อนสูงแสดงดังรูปที่ 6 พบว่า ค่า HHV มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความดันเชิงกลเพิ่มขึ้น เปลือกทุเรียนดิบมีค่า HHV เท่ากับ 18.01 MJ/kg และเมื่อผ่านการทอรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 280 °C ภายใต้ความดัน 30 บาร์ ค่า HHV เพิ่มขึ้นเป็น 19.64 MJ/kg และเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเป็น 19.76, 20.34 และ 20.89 MJ/kg ที่อุณหภูมิ 300, 320 และ 340 °C ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน ที่ความดัน 120 บาร์ ค่า HHV เพิ่มขึ้นจาก 21.40 MJ/kg ที่ 280 °C เป็น 22.37, 22.82 และ 25.52 MJ/kg ที่อุณหภูมิ 300, 320 และ 340 °C ตามลำดับ โดยค่าความร้อนสูงที่สุดที่พบจากการทดลองคือ 25.52 MJ/kg ที่สภาวะ 340 °C และ 120 บาร์

แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า HHV สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนและการลดลงของออกซิเจนและไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์หลังการทอรีแฟกชัน ซึ่งเกิดจากการกำจัดความชื้นและการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวลระหว่างกระบวนการทอรีแฟกชัน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงดีขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิและความดันเชิงกลจึงมีผลร่วมกันต่อการเพิ่มค่าความร้อนสูงของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอรีไฟต์



รูปที่ 6 ค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอรรีไฟต์
เปลือกทุเรียน

3.5 ร้อยละผลได้เชิงพลังงาน (Energy yield)

ร้อยละผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์ทอรรีไฟต์เปลือกทุเรียนคำนวณจากร้อยละผลได้เชิงมวลและค่าความร้อนสูง ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\text{Energy yield (\%)} = \text{Mass yield (\%)} \times \left(\frac{\text{HHV ของผลิตภัณฑ์ทอรรีไฟต์}}{\text{HHV ของเปลือกทุเรียนดิบ}} \right) \quad (3)$$

ผลการคำนวณร้อยละผลได้เชิงพลังงานแสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ร้อยละผลได้เชิงพลังงานไม่ได้เพิ่มขึ้นตามค่าความร้อนสูงเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับร้อยละผลได้เชิงมวลที่เหลืออยู่หลังการทอรรีไฟต์เช่นกันที่ความดัน 30 บาร์ ร้อยละผลได้เชิงพลังงานลดลงจาก 97.13% ที่ 280 °C เป็น 94.19, 89.50 และ 86.77% ที่ 300, 320 และ 340 °C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแม้ค่าความร้อนสูงของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่การสูญเสียมวลระหว่างกระบวนการมีผลทำให้พลังงานรวมที่คงเหลือในผลิตภัณฑ์ลดลง

ในกรณีของความดัน 60 และ 90 บาร์ พบว่าร้อยละผลได้เชิงพลังงานมีค่าสูงกว่า 100% ที่อุณหภูมิ 280 และ 300 °C โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 104.73% ที่สภาวะ 280 °C และ 90 บาร์ ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าสภาวะดังกล่าวสามารถเพิ่มค่าความร้อนสูงของผลิตภัณฑ์ได้ โดยยังคงรักษาร้อยละผลได้เชิงมวลไว้ได้ค่อนข้างดี จึงทำให้พลังงานรวมที่คงเหลือในผลิตภัณฑ์อยู่ในระดับสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 320 และ 340 °C ร้อยละผลได้เชิงพลังงานมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ความดันสูง เนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวลและการสูญเสียสารระเหยเกิดขึ้นมากขึ้น

ที่ความดัน 120 บาร์ ร้อยละผลได้เชิงพลังงานลดลงจาก 102.68% ที่ 280 °C เป็น 99.55, 83.63 และ 59.27% ที่ 300, 320 และ 340 °C ตามลำดับ แม้ว่าสภาวะ 340 °C และ 120 บาร์จะให้ค่าความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 25.52 MJ/kg แต่ร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงเหลือเพียง 41.83% ส่งผลให้ร้อยละผลได้เชิงพลังงานลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายใต้สภาวะดังกล่าวยังไม่สามารถรูปเป็นเม็ดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น สภาวะที่ให้อุณหภูมิและความดันสูงที่สุดจึงไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาในเชิงการใช้งานจริง

ผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้เชิงพลังงานแสดงให้เห็นว่า การเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรรีไฟต์ภายใต้ความดันเชิงกลควรพิจารณาร่วมกันทั้งค่าความร้อนสูง ร้อยละผลได้เชิงมวล ร้อยละผลได้เชิงพลังงาน และความสามารถในการคงรูปของผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลอง สภาวะในช่วง 280–300 °C ภายใต้ความดัน 60–90 บาร์ มีความเหมาะสมในเชิงสมดุลมากกว่าสภาวะที่รุนแรงกว่า เนื่องจากสามารถเพิ่มคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกทุเรียนได้ ขณะเดียวกันยังคงรักษาร้อยละผลได้เชิงพลังงานไว้ในระดับสูง และผลิตภัณฑ์ยังคงมีลักษณะเป็นก้อนอัดที่สามารถจัดเก็บและขนส่งได้สะดวกกว่า

ตารางที่ 1 ร้อยละผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์ทอรรีไฟต์เปลือกทุเรียนภายใต้สภาวะต่าง ๆ

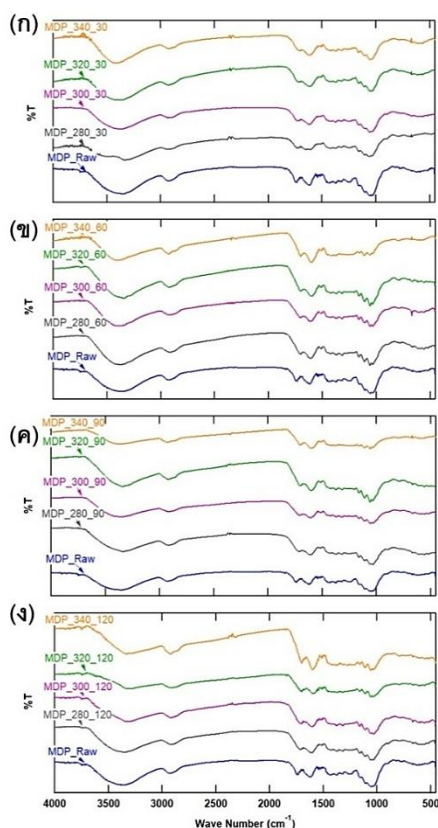
ความดัน (บาร์)	280 °C	300 °C	320 °C	340 °C
30	97.13	94.19	89.50	86.77
60	103.41	100.07	92.00	87.34
90	104.73	100.60	91.99	75.17
120	102.68	99.55	83.63	59.27

3.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเปลือกทุเรียนก่อนและหลังการทอรรีไฟต์ด้วยเทคนิค FT-IR แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า เมื่ออุณหภูมิและความดันเชิงกลเพิ่มขึ้น ความเข้มของพีคหลายตำแหน่งมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะพีคที่เกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เปลือกทุเรียนดิบแสดงพีคการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) บริเวณประมาณ 3400 cm⁻¹ อย่างเด่นชัด แต่หลังการทอรรีไฟต์ ความเข้มของพีคดังกล่าวลดลงต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในทุกๆระดับ

ความดันสะท้อนถึงการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลและการกำจัดความชื้นหรือองค์ประกอบที่มีออกซิเจนออกจากโครงสร้างชีวมวล อันเป็นผลจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน

นอกจากนี้ ยังพบว่าพีคบริเวณประมาณ 1700 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับหมู่คาร์บอนิล (C=O) พีคบริเวณประมาณ 1600 cm^{-1} ซึ่งเกี่ยวข้องกับพันธะ C=C และพีคบริเวณประมาณ 1050 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับหมู่ C-O มีความเข้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทอรรีแฟกซ์เพิ่มขึ้น โดยแนวโน้มดังกล่าวเด่นชัดมากขึ้นภายใต้ความดันเชิงกลที่สูงขึ้น การลดลงของพีคเหล่านี้บ่งชี้ถึงการสลายตัวของโครงสร้างเอมิเซลลูโลสและเซลลูโลสบางส่วน รวมถึงการกำจัดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนออกในรูปของน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันและดีคาร์บอกซิเลชัน ผลการวิเคราะห์ FT-IR จึงสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและแผนภาพ Van Krevelen ที่แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์หลังการทอรรีแฟกซ์มีปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลง ขณะที่สัดส่วนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกทุเรียนดีขึ้น

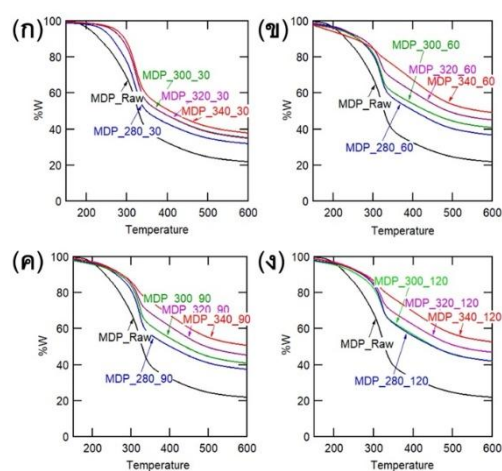


รูปที่ 7 หมู่ฟังก์ชันของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอรรีแฟกซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้ความดัน (ก) 30 บาร์ (ข) 60 บาร์ (ค) 90 บาร์ (ง) 120 บาร์

3.7 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค

Thermogravimetric Analysis (TGA)

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวของความร้อนของเปลือกทุเรียนดิบและเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอรรีแฟกซ์ภายใต้ความดันเชิงกลแสดงดังรูปที่ 8 พบว่าเปลือกทุเรียนดิบมีการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วที่สุดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สะท้อนถึงความไวต่อการสลายตัวของความร้อนมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทอรรีแฟกซ์ สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทอรรีแฟกซ์พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทอรรีแฟกซ์เพิ่มขึ้น แนวโน้มการสลายตัวของความร้อนของผลิตภัณฑ์ลดลงและมีมวลคงเหลือที่อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นในทุกระดับความดัน โดยตัวอย่างที่ผ่านการทอรรีแฟกซ์ที่ $340\text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงความเสถียรทางความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เตรียมที่อุณหภูมิต่ำกว่า ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่ากระบวนการทอรรีแฟกซ์ช่วยกำจัดองค์ประกอบที่สลายตัวได้ง่ายออกจากชีวมวล ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้างคาร์บอนเข้มข้นขึ้นและทนต่อการสลายตัวทางความร้อนได้มากขึ้น



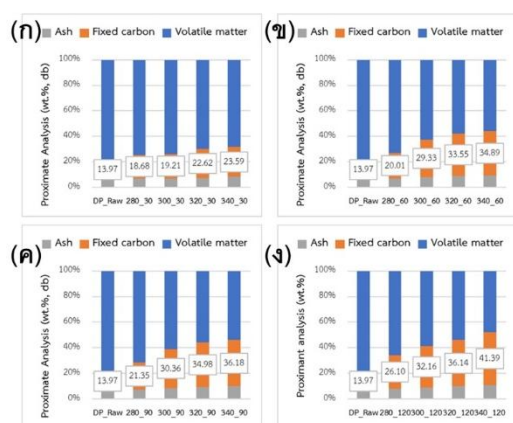
รูปที่ 8 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอรรีแฟกซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้ความดัน (ก) 30 บาร์ (ข) 60 บาร์ (ค) 90 บาร์ (ง) 120 บาร์

3.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis)

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA นอกจากใช้ประเมินพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอรรีแฟกซ์แล้ว ยังสามารถนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon, FC) ปริมาณ

สารระเหย (volatile matter, VM) และปริมาณเถ้า (ash) ได้แสดงในรูปที่ 9 ผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิและความดันเชิงกลเพิ่มขึ้น ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณสารระเหยมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเปลือกทุเรียนดิบมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 13.97 และเมื่อผ่านการทอรีแฟกซ์ที่อุณหภูมิ 280 °C ภายใต้ความดัน 30 บาร์ ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 18.68 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 19.21, 22.62 และ 23.59 ที่อุณหภูมิ 300, 320 และ 340 °C ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน ที่ความดัน 120 บาร์ ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มจากร้อยละ 26.10 ที่ 280 °C เป็นร้อยละ 32.16, 36.14 และ 41.39 ที่อุณหภูมิ 300, 320 และ 340 °C ตามลำดับ โดยค่าคาร์บอนคงตัวสูงสุดที่พบคือ ร้อยละ 41.39 ที่สภาวะ 340 °C และ 120 บาร์

แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและความดันเชิงกลมีผลร่วมกันต่อการเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกระบวนการทอรีแฟกซ์ทำให้เกิดการกำจัดความชื้นและสารระเหย รวมทั้งส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาชาร์ริงและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชีวมวลไปสู่โครงสร้างที่มีความเสถียรมากขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณสารระเหยลดลง ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและค่าความร้อนสูงที่แสดงให้เห็นถึงการยกระดับคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกทุเรียนหลังการทอรีแฟกซ์



รูปที่ 9 องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอรีไฟต์ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้ความดัน (ก) 30 บาร์ (ข) 60 บาร์ (ค) 90 บาร์ (ง) 120 บาร์

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งของเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการทอรีแฟกซ์ภายใต้ความดันเชิงกล โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิและความดันต่อร้อยละผลได้เชิงมวล องค์ประกอบธาตุ ค่าความร้อนสูง หมู่ฟังก์ชัน พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน องค์ประกอบโดยประมาณ และร้อยละผลได้เชิงพลังงาน ผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้เชิงมวลมีแนวโน้มลดลงจาก 89.07% เหลือ 41.83% ขณะที่ปริมาณคาร์บอน คาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น โดยค่าความร้อนสูงเพิ่มจาก 18.01 MJ/kg ของเปลือกทุเรียนดิบ เป็นค่าสูงสุด 25.52 MJ/kg ที่สภาวะ 340 °C และ 120 บาร์ ผลดังกล่าวสัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจน รวมถึงการลดลงของหมู่ฟังก์ชัน O-H, C=O และ C-O ซึ่งสะท้อนการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันและดีคาร์บอกซิเลชันระหว่างกระบวนการทอรีแฟกซ์

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้เชิงพลังงานร่วมด้วย พบว่าสภาวะที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในเชิงการใช้งาน เนื่องจากที่สภาวะ 340 °C และ 120 บาร์ ร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงมาก และร้อยละผลได้เชิงพลังงานเหลือเพียง 59.27% อีกทั้งผลิตภัณฑ์ไม่สามารถคงรูปเป็นเม็ดได้อย่างสมบูรณ์ ในทางกลับกัน สภาวะในช่วง 280–300 °C ภายใต้ความดัน 60–90 บาร์ ให้ร้อยละผลได้เชิงพลังงานอยู่ในระดับสูง โดยมีค่าสูงสุด 104.73% ที่สภาวะ 280 °C และ 90 บาร์ พร้อมทั้งยังคงได้ผลิตภัณฑ์ในรูปก้อนอัดที่เหมาะสมต่อการจัดเก็บและขนส่ง

ดังนั้น กระบวนการทอรีแฟกซ์ภายใต้ความดันเชิงกลสามารถปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งของเปลือกทุเรียนได้โดยช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอน คาร์บอนคงตัว ค่าความร้อนสูง และเสถียรภาพทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งทำให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปก้อนอัดที่สะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การเลือกสภาวะที่เหมาะสมควรพิจารณาจากสมดุลระหว่างคุณภาพเชื้อเพลิง ร้อยละผลได้เชิงมวล ร้อยละผลได้เชิงพลังงาน และความสามารถในการคงรูปของผลิตภัณฑ์ โดยสภาวะในช่วง 280–300 °C ภายใต้ความดัน 60–90 บาร์ มีแนวโน้มเหมาะสมกว่าในเชิงการใช้งานจริง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ibitoye SE, Mahmood RM, Jen T-C, Loha C, Akinlabi ET. An overview of biomass solid fuels: Biomass sources, processing methods, and morphological and microstructural properties. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2023;8(4):333-60.
- [2] Saleem M. Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source. *Heliyon*. 2022;8(2):e08905.
- [3] Chen W-H, Lin B-J, Lin Y-Y, Chu Y-S, Ubando AT, Show PL, Ong HC, Chang J-S, Ho S-H, Culaba AB, Pétrissans A, Pétrissans M. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Prog Energy Combust Sci*. 2021;82:100887.
- [4] Sharma P, Ho PH, Shao J, Creaser D, Olsson L. Role of ZrO₂ and CeO₂ support on the In₂O₃ catalyst activity for CO₂ hydrogenation. *Fuel*. 2023;331:125878.
- [5] Van der Stelt M, Gerhauser H, Kiel JH, Ptasiński KJ. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and bioenergy*. 2011;35(9):3748-62.
- [6] Abdulyekeen KA, Umar AA, Patah MFA, Daud WMAW. Torrefaction of biomass: Production of enhanced solid biofuel from municipal solid waste and other types of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;150:111436.
- [7] Kheowmung W. Pectin from durian (*Durio zibethinus* Murray) peel: microwave-assisted extraction followed by solvent extraction. *Trends in Sciences*. 2024;21(7):7627.
- [8] Zhao G, Lyu X, Lee J, Cui X, Chen W-N. Biodegradable and transparent cellulose film prepared eco-friendly from durian rind for packaging application. *Food Packaging and Shelf Life*. 2019;21:100345.
- [9] Fiala K, Thongjarad A, Leasing R. Valorization of durian peel as a carbon feedstock for a sustainable production of heterogeneous base catalyst, single cell oil and yeast-based biodiesel. *Carbon Resources Conversion*. 2024;7(3):100224.
- [10] Sim XY, He N, Abdul PM, Yeap SK, Hui YW, Tiang MF, Luthfi AAI, Manaf SFA, Bukhari NA, Silvamany H, Tan JP. Fermentable sugar recovery from durian peel by using ultrasound-assisted chemical pretreatment. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2024;104:106811.
- [11] Manmeen A, Kongjan P, Palamanit A, Jariyaboon R. The biochar, and pyrolysis liquid characteristics, of three indigenous durian peel; Monthong, Puangmanee, and Bacho. *Biomass and Bioenergy*. 2023;174:106816.
- [12] Obeng AK, Premjet D, Premjet S. Improved glucose recovery from durian peel by alkaline-catalyzed steam pretreatment. *PeerJ*. 2021;9:e12026.
- [13] Eling J, Okot DK, Menya E, Atim MR. Densification of raw and torrefied biomass: A review. *Biomass and Bioenergy*. 2024;184:107210.
- [14] Obi OF, Pecenka R, Clifford MJ. A review of biomass briquette binders and quality parameters. *Energies*. 2022;15(7):2426.

การแปรรูปส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวเป็นถ่านกัมมันต์อย่างยั่งยืนโดย ใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

ไชยยันต์ ไชยยะ^{1*} และ เอกตินัย จันทร์ศรี²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์ คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

* ผู้ประพันธ์บทความ

ที่อยู่อีเมล: chaiyan_c@rmutt.ac.th

Received: April 10, 2026 Revised: May 31, 2026 Accepted: June 15, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาศักยภาพของส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าว 5 ชนิด ได้แก่ โคนก้าน จั่น เปลือกชั้นนอก กาบหุ้มช่อ และระแง้ สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ซึ่งเป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและลดการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิต ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุพบว่าวัตถุดิบทั้งหมดมีปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 36.44-43.28 โดยกาบหุ้มช่อมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุด ขณะที่ผลการวิเคราะห์แบบ proximate analysis แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบมีสารระเหยเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในช่วงร้อยละ 69.41-72.74 และมีคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 15.33-21.34 สะท้อนถึงลักษณะเฉพาะของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่เหมาะสมต่อการแปรรูปเป็นวัสดุคาร์บอน เมื่อผ่านกระบวนการ carbonization ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าได้ถ่านที่มีผลได้อยู่ในช่วงร้อยละ 24.81-33.01 มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 67.30-330.18 m²/g และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.5-1.7 nm โดยเปลือกชั้นนอกให้พื้นที่ผิวสูงที่สุดในขั้นตอนนี้ จากนั้นนำถ่านที่ได้ไปกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 °C พบว่าอุณหภูมิการกระตุ้นที่สูงขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ขณะที่ผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลงตามอุณหภูมิการกระตุ้น ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับคาร์บอนและการพัฒนาโครงสร้างรูพรุน ที่อุณหภูมิ 700 °C ถ่านกัมมันต์จากกาบหุ้มช่อให้พื้นที่ผิวสูงที่สุดเท่ากับ 778.64 m²/g รองลงมาคือ ระแง้ เปลือกชั้นนอก จั่น และโคนก้าน ตามลำดับ นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นยังทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากระดับไมโครพอร์ไปสู่ช่วงรอยต่อของไมโครพอร์และเมโซพอร์ โดยที่อุณหภูมิ 700 °C ขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.9-2.2 nm ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ากาบหุ้มช่อ ระแง้ และเปลือกชั้นนอกเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และเป็นแนวทางที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ชีวมวลเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์ ต้นมะพร้าว การกระตุ้นด้วยไอน้ำ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร วัสดุคาร์บอน

Sustainable conversion of coconut tree residues into activated carbon using steam activation

Chaiyan Chaiya^{1*} and Ektinai Jansri²

¹ Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Department of Polymer Materials Technology, Faculty of Agricultural Product Technology and Innovation, Srinakharinwirot University.

* Corresponding author.

Email address: chaiyan_c@rmutt.ac.th

Received: April 10, 2026 Revised: May 31, 2026 Accepted: June 15, 2026

Abstract

This study investigated the potential of five types of coconut tree residues, namely petiole base, spadix, exocarp, spathe, and rachilla, as precursors for activated carbon production through steam activation. This approach provides a sustainable pathway for valorizing agricultural residues while reducing the use of chemical activating agents in the production process. Elemental analysis revealed that the raw materials contained carbon in the range of 36.44-43.28 %, with spathe showing the highest carbon content. Proximate analysis further indicated that the raw materials were mainly composed of volatile matter, ranging from 69.41 to 72.74 %, while the fixed carbon content ranged from 15.33 to 21.34 %, reflecting the typical characteristics of lignocellulosic biomass suitable for conversion into carbon materials. After carbonization at 500 °C for 2 h, the resulting chars exhibited yields of 24.81-33.01 %, specific surface areas of 67.30-330.18 m²/g, and average pore diameters of 1.5-1.7 nm, with the exocarp-derived char showing the highest surface area at this stage. The chars were subsequently activated with steam at 500, 600, and 700 °C. The results showed that increasing the activation temperature markedly enhanced the specific surface area of the activated carbons, while the product yield decreased with increasing temperature. This trend was associated with the reaction between steam and carbon and the progressive development of porous structures. At 700 °C, the spathe-derived activated carbon exhibited the highest surface area of 778.64 m²/g, followed by rachilla, exocarp, spadix, and petiole base. In addition, increasing the activation temperature promoted pore widening, with the average pore diameter at 700 °C increasing to 1.9-2.2 nm, indicating a transition from microporous structures toward the boundary between micropores and mesopores. These findings demonstrate that spathe, rachilla, and exocarp are promising coconut tree residues for activated carbon production using steam activation and represent a sustainable route for the utilization of lignocellulosic biomass wastes.

Keywords: Activated carbon, Coconut tree residues, Steam activation, Agricultural waste, Porous carbon

1. บทนำ

มะพร้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยสามารถนำผลมะพร้าวไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เช่น น้ำมันมะพร้าว กะทิ น้ำมันมะพร้าว และผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ นอกจากนี้ส่วนประกอบอื่นของต้นมะพร้าวยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในระดับครัวเรือนและชุมชนได้ เช่น การใช้ทางมะพร้าวทำไม้กวาด การใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง หรือการแปรรูปกะลาเป็นถ่านและถ่านกัมมันต์ อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการปลูก การดูแลรักษา และการแปรรูปมะพร้าวยังคงเกิดส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวในปริมาณมาก เช่น โคนก้าน จั่น เปลือกชั้นนอก กาบหุ้มข้อ ระแงะ ก้าน ใบ ลำต้น และราก เป็นต้น วัสดุเหล่านี้ส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบพื้นฐาน แต่ยังมีอีกจำนวนมากที่ถูกทิ้งให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ เผาทิ้ง หรือยังไม่ได้รับการจัดการเพื่อเพิ่มมูลค่าอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้เกิดความจำเป็นในการพัฒนาแนวทางการใช้ประโยชน์ชีวมวลเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าวให้มีมูลค่าสูงขึ้นและสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

ในบริบทของพื้นที่เกษตรกรรม แนวคิดของงานวิจัยนี้มีที่มาจากปัญหาและความต้องการของเกษตรกรชาวสวนมะพร้าวในอำเภออัมพวา จังหวัดสมุทรสงคราม ซึ่งมีส่วนเหลือทิ้งจากการดูแลและจัดการสวนมะพร้าวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เกษตรกรจึงมีความต้องการแนวทางที่สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าได้จริง งานวิจัยนี้จึงมุ่งพิจารณาความเป็นไปได้ในการแปรรูปส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวเป็นวัสดุคาร์บอน โดยเฉพาะถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง มีโครงสร้างรูพรุน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการดูดซับ การบำบัดน้ำเสีย การกำจัดสารปนเปื้อน และงานด้านสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ได้

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุคาร์บอนรูพรุนที่สามารถผลิตได้จากวัสดุชีวภาพหลายชนิด โดยคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า สารระเหย โครงสร้างตามธรรมชาติของชีวมวล และสถานะของกระบวนการคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้น ในกรณีของมะพร้าว งานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบหลัก เนื่องจากกะลาปริมาณคาร์บอนค่อนข้างสูง มีโครงสร้างแข็งแรง และหาได้ง่าย ตัวอย่างเช่น Zhu และ Kolar [1] ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเพื่อกำจัด

p-cresol ในน้ำเสีย และรายงานค่าความสามารถในการดูดซับตามแบบจำลอง Langmuir เท่ากับ 30.23 mg/g ที่อุณหภูมิ 293 K ขณะที่ Raj และ Joy [2] ได้พัฒนาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กสำหรับการดูดซับคราบไขมัน โดยอาศัยการเพิ่มความพรุนและพื้นที่ผิวของวัสดุคาร์บอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมัน งานวิจัยเหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่าชีวมวลจากมะพร้าวสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ได้

อย่างไรก็ตาม แม้ว่ากะลามะพร้าวจะได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง แต่ส่วนเหลือทิ้งอื่น ๆ จากต้นมะพร้าว เช่น โคนก้าน จั่น เปลือกชั้นนอก กาบหุ้มข้อ และระแงะ ยังมีข้อมูลการศึกษาอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะการเปรียบเทียบศักยภาพของวัตถุดิบแต่ละชนิดภายใต้สภาวะการผลิตเดียวกัน ทั้งในด้านการประกอบธาตุ proximate analysis ผลได้จากการกระบวนการคาร์บอนในเซชัน สมบัติรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และการตอบสนองต่อกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ช่องว่างดังกล่าวมีความสำคัญเนื่องจากวัตถุดิบแต่ละส่วนของต้นมะพร้าวมีลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบภายในแตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลโดยตรงต่อการสลายตัวทางความร้อน การเกิดถ่าน การพัฒนาโครงสร้างรูพรุน และคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้

สิ่งใหม่ของงานวิจัยนี้จึงอยู่ที่การประเมินศักยภาพของส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวหลายชนิดอย่างเป็นระบบ ภายใต้เงื่อนไขการคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ควบคุมในลักษณะเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบว่าส่วนใดของต้นมะพร้าวมีความเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์มากที่สุด อีกทั้งยังมุ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบพื้นฐานของวัตถุดิบ ค่าคาร์บอนคงตัว ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า ผลได้ของผลิตภัณฑ์ และการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ผลการศึกษานี้จึงไม่ได้อาศัยเพียงการรายงานค่าพื้นที่ผิวหรือผลได้ของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคัดเลือกวัตถุดิบชีวมวลเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุคาร์บอนมูลค่าเพิ่ม

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำเนื่องจากเป็นกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพที่สามารถช่วยเปิดรูพรุนเดิมและพัฒนารูพรุนใหม่ภายในโครงสร้างคาร์บอน โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับคาร์บอนในระหว่างการให้ความร้อน ข้อดีของการกระตุ้นด้วยไอน้ำคือช่วยลดการใช้สารเคมีกระตุ้น ลดขั้นตอนการล้างสารเคมี ลดความเสี่ยงจากสาร

ตกค้าง และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเหมาะสมต่อการพัฒนาต่อยอดในงานด้านสิ่งแวดล้อมและการดูดซับเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีบางชนิดที่อาจก่อให้เกิดน้ำเสียจากขั้นตอนการล้างและมีต้นทุนในการจัดการสารตกค้างเพิ่มเติม [3]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแปรรูปส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าว 5 ชนิด ได้แก่ โคนก้าน จั่น เปลือกชั้นนอก กาบหุ้มช่อ และระแง้ ให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและ proximate analysis ของวัตถุดิบ การผลิตถ่านด้วยกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500 °C และการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 °C จากนั้นจึงเปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์ พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่ได้ ผลการวิจัยคาดว่าจะจะเป็นข้อมูลสนับสนุนการใช้ประโยชน์ของเสียจากสวนมะพร้าวในระดับชุมชน และเป็นแนวทางในการพัฒนาชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีมูลค่าเพิ่มอย่างยั่งยืน

2. การทดลอง

2.1 วัตถุดิบ

วัสดุเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวถูกนำมาแยกส่วนและคัดขนาดประมาณ 2x2 เซนติเมตร โดยประมาณ ซึ่งทำให้ได้วัตถุดิบสำหรับงานวิจัยนี้จำนวน 5 ชนิด ได้แก่ โคนก้าน (*petiole base*) จั่น (*spadix*) เปลือกชั้นนอก (*exocarp*) กาบหุ้มช่อ (*spathe*) และระแง้ (*rachilla*)



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นส่วนต่างๆของวัตถุดิบ (A) โคนก้าน (B) จั่น (C) เปลือกชั้นนอก (D) กาบหุ้มช่อ (E) ระแง้

2.2 ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่าน

(Carbonization)

ก่อนการดำเนินการ วัตถุดิบทั้ง 5 ชนิดได้นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุพื้นฐานของวัตถุดิบโดยใช้เครื่อง Elemental Analysis เพื่อทราบและเข้าใจถึงโครงสร้างเบื้องต้นของชิ้นส่วนต่างๆ ของต้นมะพร้าว จากนั้นจึงได้นำวัตถุดิบทั้ง 5 ชนิด มาอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักวัตถุดิบ 100 g ใส่ในถ้วยทนความร้อนแล้วปิดฝาครอบให้สนิทพนักด้วยอลูมิเนียมฟรอยด์ โดยกระบวนการทำให้เป็นถ่านหรือ carbonization จะดำเนินการในเตาเผาแบบตู้ (Chamber Furnaces) ในสภาวะที่มีการป้อนแก๊ส N₂ ที่อัตราการไหล 100 ml/min ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการให้ความร้อนที่ 20 °C/min เพื่อให้แน่ใจว่าวัสดุทั้งหมดกลายเป็นคาร์บอน หลังครบเวลา carbonization เตาเผาถูกปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ก่อนนำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักและเก็บรักษาไว้ในภาชนะปิดสนิท การทดลองในแต่ละสภาวะดำเนินการซ้ำ 2 ครั้ง และรายงานผลได้ของผลิตภัณฑ์ในรูปค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.3 ขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam activation)

ถ่านที่เตรียมได้จากข้อ 2.2 จะถูกนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยชุดการกระตุ้นด้วยไอน้ำแสดงดังรูปที่ 2

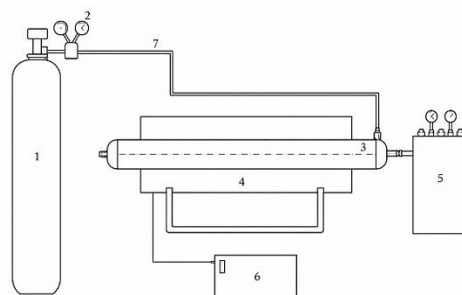


Figure 1. Schematic diagram of the steam activation apparatus. (1) N₂ gas cylinder; (2) pressure regulator; (3) stainless column; (4) tube furnace; (5) boiler; (6) heater; (7) stainless tube 1/4 inch.

รูปที่ 2 ชุดการกระตุ้นด้วยไอน้ำ: (1) ถังแก๊ส N₂, (2) ตัวควบคุมความดัน, (3) ท่อ/คอลัมน์สแตนเลส, (4) เตาเผาแบบท่อ, (5) หม้อต้มไอน้ำ, (6) ชุดให้ความร้อน และ (7) ท่อสแตนเลสขนาด 1/4 นิ้ว

ถ่านที่ผ่าน carbonization ถูกนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยนำตัวอย่างจากข้อ 2.2 ปริมาณ 10 g ใส่ลงถ้วยเผาแล้วใส่เข้าไปในท่อเผา ปรับอุณหภูมิการกระตุ้นในช่วง 500-700 °C ที่เวลาการกระตุ้นคงที่ 1 ชั่วโมง อัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มเท่ากับ 120 ml/min ในระหว่างกระบวนการกระตุ้น แก๊ส N₂ จะถูกป้อนด้วยอัตราการไหล 100 ml/min เข้าไปด้วยเพื่อช่วยส่งเสริมการกระจายตัวของไอน้ำในท่อเผา หลังจากนั้นตัวอย่างที่เตรียมได้ จะถูกนำไปวิเคราะห์ผลได้ของผลิตภัณฑ์ และสมบัติทางกายภาพและเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดซับด้วยแก๊ส N₂ (N₂ sorption analyzer) และวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 7800F

3. ผลการวิจัย

3.1 องค์ประกอบธาตุของวัตถุดิบ (Ultimate and proximate analysis)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของวัตถุดิบจากส่วนเหลือทิ้งของต้นมะพร้าว 5 ชนิด ได้แก่ โคนก้าน จั่น เปลือกชั้นนอก กาบหุ้มช่อ และระแงะ แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยพบว่าวัตถุดิบทั้งหมดประกอบด้วยธาตุหลัก ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ปริมาณคาร์บอนของวัตถุดิบทั้ง 5 ชนิดอยู่ในช่วง 36.44-43.28 % w/w โดยกาบหุ้มช่อมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุดเท่ากับ 43.28 % w/w รองลงมา ได้แก่ ระแงะ เปลือกชั้นนอก โคนก้าน และจั่น ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ของตัวอย่างทั้งหมดมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.17-0.61 % w/w และซัลเฟอร์อยู่ในช่วง 0.01-0.08 % w/w ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวมีปริมาณคาร์บอนในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตวัสดุคาร์บอน

ตารางที่ 3.1 Ultimate analysis ของวัตถุดิบ

ตัวอย่าง	ค่า Ultimate Analysis %w/w			
	C	H	N	S
โคนก้าน	39.45	6.21	0.17	0.02
จั่น	36.44	6.99	0.23	0.01
เปลือกชั้นนอก	40.25	6.55	0.31	0.02
กาบหุ้มช่อ	43.28	6.38	0.30	0.02
ระแงะ	40.45	6.42	0.61	0.08
เปลือกยูคาลิปตัส [4]	42.92	5.60	0.22	0.14
เปลือกสับปะรด [4]	39.20	6.70	0.65	0.06
เปลือกมะละกอ [4]	38.79	6.27	3.16	

เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลของชีวมวลชนิดอื่นที่รายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า [4] ได้แก่ เปลือกยูคาลิปตัส เปลือกสับปะรด และเปลือกมะละกอ พบว่าปริมาณคาร์บอนของวัตถุดิบจากต้นมะพร้าวในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะกาบหุ้มช่อและระแงะที่มีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกับเปลือกยูคาลิปตัส ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวสามารถเป็นแหล่งชีวมวลทางเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านและถ่านกัมมันต์ได้

ตารางที่ 3.2 Proximate analysis ของวัตถุดิบ

ตัวอย่าง	Fixed carbon (%)	Volatile matter (%)	Moisture (%)	Ash (%)
โคนก้าน	18.04	72.11	5.77	4.08
จั่น	16.12	71.24	6.21	6.43
เปลือกชั้นนอก	15.33	72.74	5.86	6.07
กาบหุ้มช่อ	21.34	69.41	5.69	3.56
ระแงะ	18.13	71.31	6.48	4.08

ผลการวิเคราะห์ proximate analysis ของวัตถุดิบ แสดงดังตารางที่ 3.2 พบว่าวัตถุดิบทั้งหมดมีสารระเหยเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 69.41-72.74 % ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในปริมาณสูง สารระเหยดังกล่าวมีบทบาทสำคัญต่อการสูญเสียมวลระหว่างกระบวนการคาร์บอนเซชันและอาจส่งผลต่อการเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเริ่มต้นภายในโครงสร้างถ่านหลังการให้ความร้อน

เมื่อพิจารณาปริมาณคาร์บอนคงตัว พบว่ากาบหุ้มช่อมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 21.34 % รองลงมาคือ ระแงะ โคนก้าน จั่น และเปลือกชั้นนอก ตามลำดับ โดยคาร์บอนคงตัวเป็นตัวแปรสำคัญที่สะท้อน

ความสามารถของวัตถุดิบในการคงเหลือโครงสร้างคาร์บอนภายหลังการคาร์บอนไนเซชัน วัตถุดิบที่มีคาร์บอนคงตัวสูงจึงมีแนวโน้มเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นถ่านและถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ ปริมาณเถ้าของวัตถุดิบอยู่ในช่วง 3.56-6.43 % โดยจำแนกปริมาณเถ้าสูงที่สุด ขณะที่กาบหุ้มช่อมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด ซึ่งปริมาณเถ้าที่ต่ำเป็นปัจจัยที่เอื้อต่อคุณภาพของถ่าน เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ตกค้างในรูปเถ้าอาจลดสัดส่วนคาร์บอนที่ใช้งานได้ และอาจส่งผลกระทบต่อพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้น

โดยรวม ผลการวิเคราะห์ทั้ง Ultimate and proximate analysis แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบจากส่วนเหลือทิ้งของต้นมะพร้าวทุกชนิดมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตวัสดุคาร์บอน โดยเฉพาะกาบหุ้มช่อซึ่งมีปริมาณคาร์บอนจากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุสูงที่สุด มีคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด และมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด จึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ อย่างไรก็ตาม ความเหมาะสมของวัตถุดิบไม่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีเพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับโครงสร้างภายในของชีวมวล พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน และการตอบสนองต่อกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ซึ่งจะพิจารณาพร้อมกับผลได้ พื้นที่ผิว และโครงสร้างรูพรุนของถ่านและถ่านกัมมันต์ในหัวข้อถัดไป

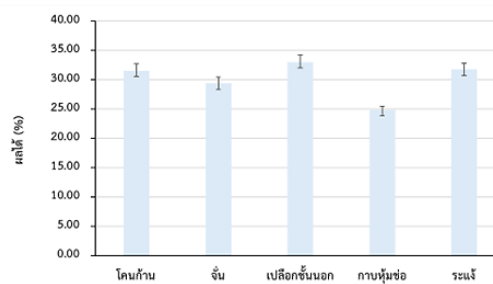
3.2 การทำให้เป็นถ่าน (Carbonization)

ผลการทำให้เป็นถ่านของวัตถุดิบจากส่วนเหลือทิ้งของต้นมะพร้าวทั้ง 5 ชนิด ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.3 พบว่าผลได้ของถ่านมีค่าอยู่ในช่วง 24.81-33.01 % โดยเปลือกชั้นนอกให้ผลได้สูงที่สุดเท่ากับ 33.01 % รองลงมาคือ กระจ่าง 31.73 % โคนก้าน 31.52 % จั่น 29.37 % และกาบหุ้มช่อ 24.81 % ตามลำดับ ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบแต่ละชนิดมีพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนแตกต่างกัน แม้จะผ่านกระบวนการ carbonization ภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยวัตถุดิบที่ให้ผลได้สูงมีแนวโน้มคงเหลือโครงสร้างคาร์บอนแข็งได้มากกว่า ขณะที่วัตถุดิบที่ให้ผลได้ต่ำอาจเกิดการสลายตัวขององค์ประกอบที่ระเหยได้และการสูญเสียมวลระหว่างการให้ความร้อนมากกว่า [3]

เมื่อพิจารณาพร้อมกับผล proximate analysis ของวัตถุดิบในตารางที่ 3.2 พบว่าวัตถุดิบทั้งหมดมีสารระเหยเป็นองค์ประกอบหลักในระดับสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียมวลอย่างชัดเจนระหว่างกระบวนการ carbonization อย่างไรก็ตาม ผลได้ของ

ถ่านไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารระเหยเพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และโครงสร้างภายในของชีวมวลแต่ละชนิด ตัวอย่างเช่น กาบหุ้มช่อแม้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวของวัตถุดิบสูงที่สุด แต่ให้ผลได้หลัง carbonization ต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าวัสดุชนิดนี้อาจมีโครงสร้างที่เกิดการสลายตัวและเปิดรูพรุนได้มากในระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งอาจเป็นปัจจัยสนับสนุนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในขั้นตอนถัดไป สมบัติทางกายภาพของถ่านที่ได้จากกระบวนการ carbonization แสดงในตารางที่ 3.3 พบว่าถ่านจากเปลือกชั้นนอกมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ 330.18 m²/g รองลงมาคือกาบหุ้มช่อ 301.35 m²/g โคนก้าน 210.82 m²/g จั่น 205.42 m²/g และกระจ่าง 67.30 m²/g ตามลำดับ ขณะที่ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านอยู่ในช่วง 1.5–1.7 nm ซึ่งต่ำกว่า 2.0 nm แสดงให้เห็นว่าถ่านที่ได้มีลักษณะเด่นเป็นรูพรุนขนาดเล็กหรือไมโครพอร์ โครงสร้างดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการพัฒนารูพรุนเพิ่มเติมในขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

ผลการวิเคราะห์ proximate analysis ของถ่านหลัง carbonization แสดงดังตารางที่ 3.4 พบว่าถ่านทุกชนิดมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 58.77-72.24 % ขณะที่สารระเหยลดลงเหลือ 21.19-33.24 % แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ carbonization สามารถกำจัดองค์ประกอบที่ระเหยได้ออกจากชีวมวล และเพิ่มสัดส่วนของโครงสร้างคาร์บอนในของแข็งที่เหลือได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในบรรดาถ่านที่ศึกษา ถ่านจากกาบหุ้มช่อมีคาร์บอนคงตัวสูงที่สุดเท่ากับ 72.24 % และมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุดเท่ากับ 3.22 % ซึ่งบ่งชี้ถึงคุณภาพของถ่านที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.1 ผลได้จากกระบวนการ carbonization วัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 500 °C

ตารางที่ 3.3 โครงสร้างทางกายภาพของถ่าน

ตัวอย่าง	BET Surface area (m ² /g)	Average diameter (nm)	Yield (%)	S.D.
โคนก้าน	210.82	1.7	31.52	1.19
จั่น	205.42	1.7	29.37	1.12
เปลือก	330.18	1.5	33.01	1.19
ชั้นนอก				
กาบหุ้มข้อ	301.35	1.7	24.81	0.58
ระแนง	67.30	1.7	31.73	1.09

ตารางที่ 3.4 Proximate analysis ของถ่าน

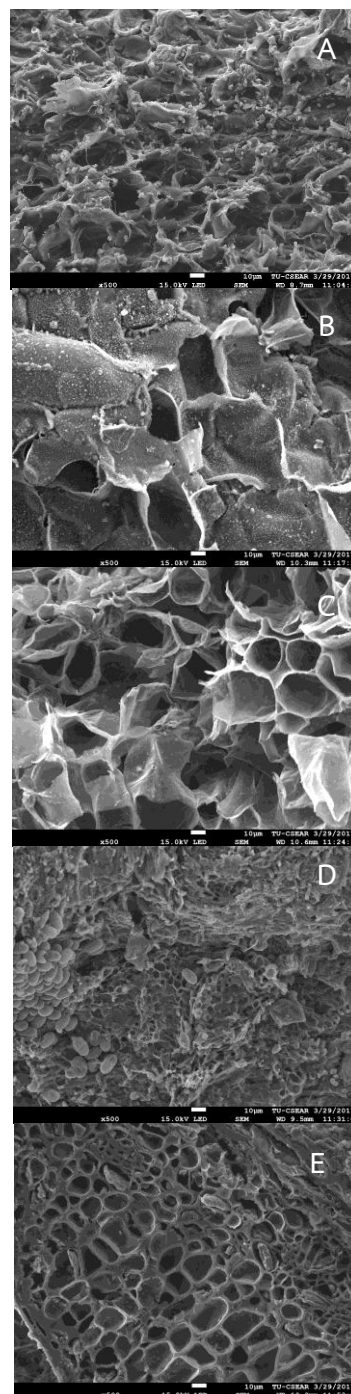
ตัวอย่าง	Fixed carbon (%)	Volatile matter (%)	Moisture (%)	Ash (%)
โคนก้าน	62.14	29.57	3.24	5.05
จั่น	58.77	33.24	2.87	5.12
เปลือก	68.08	23.86	3.19	4.87
ชั้นนอก				
กาบหุ้มข้อ	72.24	21.19	3.35	3.22
ระแนง	65.19	26.30	3.88	4.63

3.3 โครงสร้างทางกายภาพของถ่านจากกระบวนการ carbonization

ภาพ SEM ในรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าถ่านทุกตัวอย่างเริ่มปรากฏช่องว่างและโครงสร้างรูพรุนภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งเกิดจากการระเหยออกของความชื้นและสารระเหยระหว่างกระบวนการ carbonization อย่างไรก็ตาม ลักษณะการเปิดของโครงสร้างมีความแตกต่างกัน โดยถ่านจากเปลือกชั้นนอกและกาบหุ้มข้อแสดงพื้นผิวที่มีความขรุขระและมีช่องว่างภายในค่อนข้างเด่นชัด ขณะที่ถ่านจากโคนก้านและจั่นมีโครงสร้างรูพรุนเกิดขึ้นเช่นกัน แต่การเปิดของช่องว่างมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ส่วนถ่านจากระแนงแม้จะเห็นลักษณะช่องว่างจำนวนมากในภาพ SEM แต่โครงสร้างบางส่วนมีลักษณะเป็นผนังหรือโครงข่ายที่ค่อนข้างหนาแน่น ซึ่งอาจจำกัดการเข้าถึงพื้นที่ผิวภายในของแก๊สไนโตรเจนระหว่างการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะสอดคล้องกับความแตกต่างของสัณฐานวิทยาที่สังเกตได้ โดยถ่านจากเปลือกชั้นนอกให้พื้นที่ผิวสูงที่สุดเท่ากับ 330.18 m²/g รองลงมาคือ กาบหุ้มข้อ 301.35 m²/g โคนก้าน 210.82 m²/g จั่น 205.42 m²/g และระแนง 67.30 m²/g ตามลำดับ ขณะที่ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านทุกชนิดอยู่ในช่วง 1.5-1.7 nm ซึ่งต่ำกว่า 2.0 nm แสดงว่าถ่านที่ได้มีโครงสร้างรูพรุนหลักอยู่ในกลุ่มไมโครพอร์

ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า carbonization ไม่ได้เพียงเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นโครงสร้างคาร์บอนเท่านั้น แต่ยังมีบทบาทในการสร้างรูพรุนเริ่มต้นให้กับวัสดุ โดยความแตกต่างของพื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุนสัมพันธ์กับองค์ประกอบของวัตถุดิบ ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว เถ้า และโครงสร้างทางกายภาพเดิมของชีวมวลแต่ละส่วน [4]



รูปที่ 3.2 ภาพ SEM ของถ่านที่กำลังขยาย 500 เท่า (A) โคนก้าน (B) จั่น (C) เปลือกชั้นนอก (D) กาบหุ้มข้อ (E) ระแนง

3.4 โครงสร้างกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam Activation)

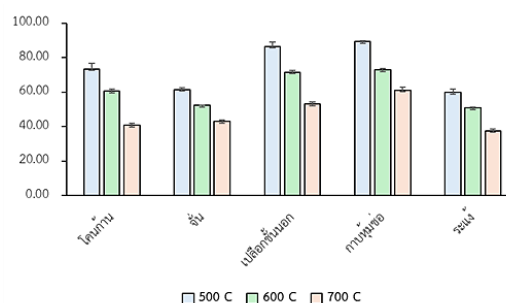
ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นด้วยไอน้ำต่อสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์จากส่วนเหลือทิ้งของต้นมะพร้าวทั้ง 5 ชนิด แสดงดังในรูป 3.3 และตารางที่ 3.5 พบว่า เมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นเพิ่มขึ้นจาก 500 เป็น 600 และ 700 °C ผลได้ของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกตัวอย่าง โดยคอนก้านมีผลได้ลดลงจาก 73.46 ± 3.13 เป็น 60.48 ± 1.20 และ 40.74 ± 1.32 % จั่นลดลงจาก 61.41 ± 1.04 เป็น 52.35 ± 0.02 และ 43.04 ± 0.89 % เปลือกชั้นนอกลดลงจาก 86.54 ± 2.54 เป็น 71.51 ± 1.19 และ 53.07 ± 1.32 % กาบหุ้มลดลงจาก 89.26 ± 0.58 เป็น 72.74 ± 1.05 และ 61.06 ± 1.80 % และระแนงลดลงจาก 59.73 ± 1.97 เป็น 50.78 ± 0.63 และ 37.52 ± 1.15 % ตามลำดับ แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าอุณหภูมิการกระตุ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสูญเสียมวลของวัสดุคาร์บอนในระหว่างกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

ตารางที่ 3.5 โครงสร้างทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	Activation Temp (°C)	BET Surface area (m ² /g)	Average diameter (nm)	Yield (%)	S.D.
คอนก้าน	500	322.60	1.5	73.46	3.13
	600	378.22	1.7	60.48	1.20
	700	390.87	2.1	40.74	1.32
จั่น	500	352.91	1.7	61.41	1.04
	600	366.09	1.7	52.35	0.02
	700	512.43	2.2	43.04	0.89
เปลือกชั้นนอก	500	350.76	1.7	86.54	2.54
	600	649.34	1.9	71.51	1.19
	700	721.32	2.2	53.07	1.32
กาบหุ้มข้อ	500	553.48	1.7	89.26	0.58
	600	615.39	1.5	72.74	1.05
	700	778.64	1.9	61.06	1.80
ระแนง	500	636.57	1.7	59.73	1.97
	600	723.88	2.0	50.78	0.63
	700	750.22	2.2	37.52	1.15

การลดลงของผลได้สามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำ หรือ steam gasification ตามสมการ $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ ซึ่งทำให้คาร์บอนบางส่วนในโครงสร้างถ่านถูกเปลี่ยนเป็นแก๊ส ส่งผลให้มวลของแข็งลดลง [5] ขณะเดียวกันปฏิกิริยา

ดังกล่าวช่วยกำจัดสารตกค้าง น้ำมันดิน และองค์ประกอบที่อุดตันอยู่ภายในโครงสร้างเดิม ทำให้เกิดการเปิดรูพรุนเดิมและการพัฒนารูพรุนใหม่ภายในวัสดุได้มากขึ้น นอกจากนี้ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ทำปฏิกิริยากับไอน้ำต่อเนื่องตามสมการ $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ ซึ่งทำให้เกิดแก๊ส CO_2 โดยมีการรายงานว่าสามารถช่วยเพิ่มความพรุนของโครงสร้างคาร์บอนได้ [6] ดังนั้นหากวัตถุดิบเริ่มต้นมีปริมาณ C มากก็มีแนวโน้มที่จะช่วยส่งเสริมให้ปฏิกิริยานี้เกิดได้มากขึ้น สอดคล้องกับผลจากตารางที่ 3.1 และ 3.2 ที่แสดงให้เห็นว่ากาบหุ้มข้อมีองค์ประกอบของ C และ Fixed carbon สูงที่สุด และแสดงค่าพื้นที่ผิวได้สูงที่สุดหลังจากผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำแล้ว (ตารางที่ 3.5)

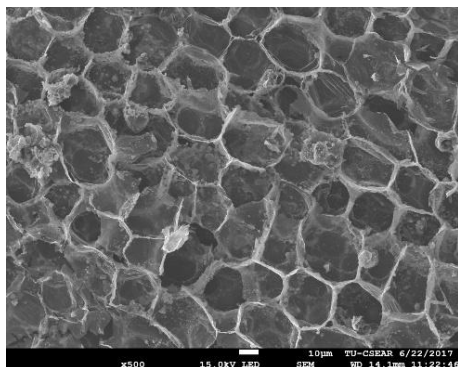


รูปที่ 3.3 ผลได้ของถ่านกัมมันต์

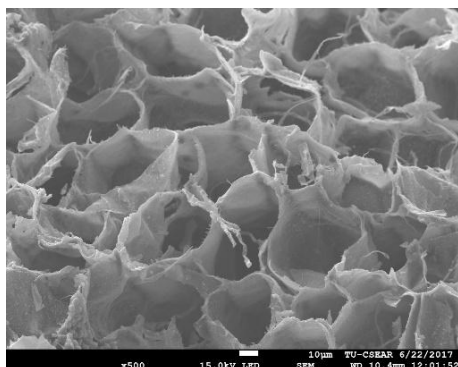
ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี BET แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการกระตุ้นที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์อย่างชัดเจนในทุกตัวอย่าง โดยค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มจากช่วง 322.60-636.57 m²/g ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็น 366.09-723.88 m²/g ที่ 600 °C และเพิ่มเป็น 390.87-778.64 m²/g ที่ 700 °C ในบรรดาตัวอย่างทั้งหมด ถ่านกัมมันต์จากกาบหุ้มข้อให้พื้นที่ผิวสูงที่สุดเท่ากับ 778.64 m²/g ที่อุณหภูมิ 700 °C รองลงมาคือ ระแนง 750.22 m²/g เปลือกชั้นนอก 721.32 m²/g จั่น 512.43 m²/g และคอนก้าน 390.87 m²/g ตามลำดับ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ากาบหุ้มข้อและระแนงเป็นวัตถุดิบที่ตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยไอน้ำได้ดี โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง

เมื่อพิจารณาขนาดรูพรุนเฉลี่ย พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นมีแนวโน้มทำให้รูพรุนกว้างขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 500 °C ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง 1.5-1.7 nm และเพิ่มเป็น 1.9-2.2 nm ที่อุณหภูมิ 700 °C แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำไม่เพียงเพิ่มพื้นที่ผิวเท่านั้น แต่ยังช่วยขยายรูพรุนจาก

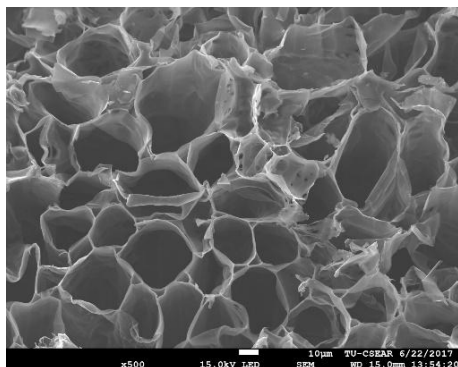
ระดับไมโครพอร์ไปสู่ช่วงรอยต่อระหว่างไมโครพอร์และเมโซพอร์ [7] โดยเฉพาะตัวอย่างโคนก้าน จัน เปลือกชั้นนอก และระแ่ง ซึ่งมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยมากกว่า 2.0 nm เมื่อกระตุ้นที่ 700 °C



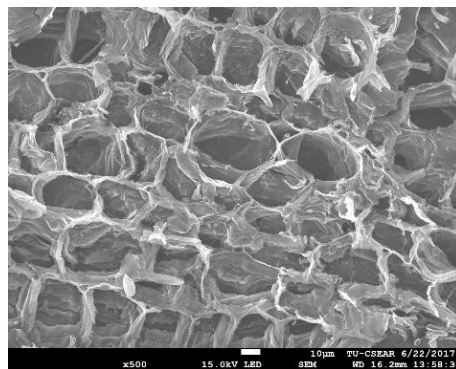
รูปที่ 3.4 ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์จากโคนก้านที่ 700 °C



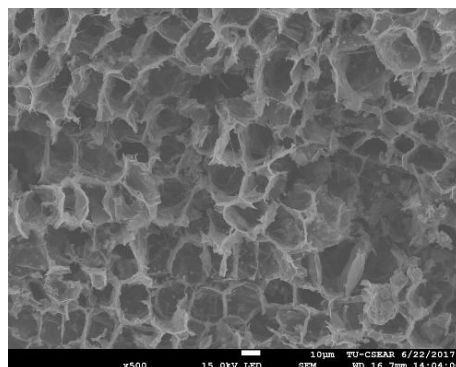
รูปที่ 3.5 ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์จากจันที่ 700 °C



รูปที่ 3.6 ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกชั้นนอก ที่ 700 °C



รูปที่ 3.7 ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์จากกาบหุ้มข้อที่ 700 °C



รูปที่ 3.8 ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์จากระแ่งที่ 700 °C

ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ 700 °C แสดงดังรูปที่ 3.4-3.8 พบว่าตัวอย่างทุกชนิดมีโครงสร้างรูพรุนที่เปิดชัดเจนและมีช่องว่างภายในต่อเนื่องมากกว่าถ่านก่อนการกระตุ้น โดยถ่านกัมมันต์จากโคนก้านแสดงลักษณะโพรงค่อนข้างสม่ำเสมอและมีผนังรูพรุนเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย ถ่านกัมมันต์จากจันและเปลือกชั้นนอกมีโพรงขนาดใหญ่และผนังรูพรุนค่อนข้างบาง ขณะที่ถ่านกัมมันต์จากกาบหุ้มข้อและระแ่งแสดงโครงสร้างรูพรุนที่เปิดและซับซ้อน ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่อยู่ในระดับสูง โดยเฉพาะกาบหุ้มข้อที่ให้ค่าพื้นที่ผิวสูงที่สุดในการศึกษานี้

โดยรวม ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นถึงลักษณะ trade-off ระหว่างผลได้ของผลิตภัณฑ์กับการพัฒนาโครงสร้างรูพรุน กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นช่วยให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงขึ้นและรูพรุนเปิดกว้างขึ้น แต่ในขณะเดียวกันทำให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลงจากการสูญเสียมวลของคาร์บอนในระหว่างปฏิกิริยา

steam gasification [8] เมื่อพิจารณาทั้งพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และผลได้ของผลิตภัณฑ์ ถ่านกัมมันต์จาก กาบหุ้มช่อที่กระตุ้นที่ 700 °C แสดงศักยภาพเด่นที่สุด เนื่องจากให้พื้นที่ผิวสูงสุด 778.64 m²/g มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.9 nm และยังคงให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ 61.06 ± 1.80 % ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างอื่นส่วนใหญ่ภายใต้สภาวะเดียวกัน จึงเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ จากชีวมวลเหลือทิ้งของต้นมะพร้าว

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพของส่วนเหลือทิ้ง จากต้นมะพร้าว 5 ชนิด ได้แก่ โคนก้าน จั่น เปลือก ขั้นนอก กาบหุ้มช่อ และระแง้ สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยมีแนวคิด เพื่อเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและ สนับสนุนการใช้ประโยชน์ชีวมวลอย่างยั่งยืน ผลการ วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุพบว่าวัตถุดิบทั้งหมดมี ปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 36.44-43.28 % w/w โดย กาบหุ้มช่อมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุด ขณะที่ผลการ วิเคราะห์ proximate analysis พบว่าวัตถุดิบมีสาร ระเหยเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในช่วง 69.41-72.74 % และมีคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 15.33-21.34 % ซึ่ง สะท้อนลักษณะของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่เหมาะสม ต่อการแปรรูปเป็นวัสดุคาร์บอน

ภายหลังการทำให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วัตถุดิบทั้ง 5 ชนิดสามารถ เปลี่ยนเป็นถ่านที่มีโครงสร้างรูพรุนเบื้องต้นได้ โดยให้ ผลได้อยู่ในช่วง 24.81-33.01 % และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ อยู่ในช่วง 67.30-330.18 m²/g โดยถ่านจากเปลือก ขั้นนอกให้พื้นที่ผิวสูงที่สุดในขั้นตอน carbonization ขณะที่ผล proximate analysis ของถ่านพบว่าปริมาณ คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเป็น 58.77-72.24 % และ ปริมาณสารระเหยลดลงเหลือ 21.19-33.24 % แสดง ให้เห็นว่ากระบวนการ carbonization สามารถเพิ่ม สัดส่วนโครงสร้างคาร์บอนในของแข็งที่เหลือได้อย่าง ชัดเจน ในบรรดาถ่านที่ศึกษา ถ่านจากกาบหุ้มช่อมี คาร์บอนคงตัวสูงที่สุดและมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด จึงเป็น วัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงสำหรับการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์

เมื่อถ่านถูกนำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 °C พบว่าอุณหภูมิการกระตุ้นมีผล โดยตรงต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่าง ขณะที่ผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลง

อย่างต่อเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา steam gasification ระหว่างไอน้ำกับคาร์บอน ผลการวิเคราะห์ BET แสดง ให้เห็นว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์เพิ่มจากช่วง 322.60-636.57 m²/g ที่ 500 °C เป็น 390.87- 778.64 m²/g ที่ 700 °C ขณะที่ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเพิ่ม จากช่วง 1.5-1.7 nm เป็น 1.9-2.2 nm แสดงถึงการ ขยายตัวของรูพรุนจากลักษณะไมโครพอร์ไปสู่ช่วง รอยต่อระหว่างไมโครพอร์และเมโซพอร์ ผลจากภาพ SEM ที่อุณหภูมิ 700 °C ยังสนับสนุนแนวโน้มดังกล่าว โดยแสดงให้เห็นโครงสร้างรูพรุนที่เปิดชัดเจน ผันรูพรุน บางลง และช่องว่างภายในมีความต่อเนื่องมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบวัตถุดิบทั้งหมด พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกาบหุ้มช่อที่กระตุ้นด้วยไอน้ำที่ 700 °C แสดงศักยภาพเด่นที่สุด โดยให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด เท่ากับ 778.64 m²/g มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.9 nm และ ยังคงให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ 61.06 ± 1.80% ซึ่งสูงกว่า ตัวอย่างอื่นส่วนใหญ่ภายใต้สภาวะเดียวกัน รองลงมา คือถ่านกัมมันต์จากระแง้และเปลือกขั้นนอกที่ให้พื้นที่ ผิวสูงเท่ากับ 750.22 และ 721.32 m²/g ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากาบหุ้มช่อ ระแง้ และเปลือก ขั้นนอกเป็นส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวที่มีศักยภาพ สูงสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

โดยสรุป การศึกษานี้ยืนยันได้ว่าส่วนเหลือทิ้ง จากต้นมะพร้าวไม่ใช่เพียงของเสียทางการเกษตร แต่สามารถพัฒนาเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีมูลค่าเพิ่มได้ โดยเฉพาะการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วย ไอน้ำซึ่งช่วยลดความเสี่ยงการใช้สารเคมีกระตุ้น ลดความ เสี่ยงจากสารตกค้าง และสอดคล้องกับแนวคิดการใช้ ประโยชน์ชีวมวลอย่างยั่งยืน ทิศทางการศึกษาต่อไป ควรมุ่งทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานจริงของถ่าน กัมมันต์ที่ได้ เช่น การดูดซับสี สารอินทรีย์ หรือโลหะหนักในน้ำเสีย การศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์ม การดูดซับ ตลอดจนการประเมินความคุ้มค่าทาง เศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้ในการผลิตระดับ ชุมชน เพื่อให้สามารถต่อยอดสู่การใช้ประโยชน์จริง สำหรับเกษตรกรและชุมชนสวนมะพร้าวได้อย่างยั่งยืน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชวมงคลกรุงเทพ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยสนับสนุนเงินทุน เครื่องมือ และ สถานที่ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhu Y, Kolar P. Adsorptive removal of p-cresol using coconut shell-activated char. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2014;2(4):2050-8.
- [2] Raj KG, Joy PA. Coconut shell based activated carbon-iron oxide magnetic nanocomposite for fast and efficient removal of oil spills. *Journal of environmental chemical engineering*. 2015;3(3):2068-75.
- [3] Li W, Peng J, Zhang L, Yang K, Xia H, Zhang S, Guo S. Preparation of activated carbon from coconut shell chars in pilot-scale microwave heating equipment at 60 kW. *Waste management*. 2009;29(2):756-60.
- [4] Nuwaboot P, Jamradloedluk J, Lertsatitthanakorn C. Charcoal and wood vinegar from carbonization of barks and fruit peels. *J Sci Technol MSU*. 2016;35(5):519-24.
- [5] Fu J, Zhang J, Jin C, Wang Z, Wang T, Cheng X, Ma C. Effects of temperature, oxygen and steam on pore structure characteristics of coconut husk activated carbon powders prepared by one-step rapid pyrolysis activation process. *Bioresource technology*. 2020;310:123413.
- [6] Alaya M, Girgis B, Mourad W. Activated carbon from some agricultural wastes under action of one-step steam pyrolysis. *Journal of Porous Materials*. 2000;7(4):509-17.
- [7] Zhang L, Zuo S. The significance of lignocellulosic raw materials on the pore structure of activated carbons prepared by steam activation. *Molecules*. 2024;29(13):3197.
- [8] Pallarés J, González-Cencerrado A, Arauzo I. Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. *Biomass Bioenergy*. 2018;115:64-73.



SCAN ME



Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Thanyaburi

- 39 Moo 1, Rangsit-Nakhonnayok Rd. (Klong6), Thanyaburi, Pathum Thani 12110
- Tel./Fax: 0 2549 3493 E-mail: enjournal@en.rmutt.ac.th
- Website: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt>

