วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 29 (ฉบับที่ 1) มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2567
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 29 (No.1) January – April 2024 บทความวิจัย

การปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกะลาปาล์ม ด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชันโดยใช้ปฏิกรณ์แบบสกรูลำเลียง

Fuel Properties Improvement of Palm Kernel Shell with Torrefaction Process by using Screw Conveyor Reactor

โชคชัย เหมือนมาศ[1*] และ นิรัติศัย รักมาก[2]

Chokchai Mueanmas[1*] and Nirattisai Rakmak[2]

[1]*หลักสูตรวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง ประเทศไทย*

[2]*หลักสูตรวิศวกรรมเคมีและเคมีเภสัชกรรม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ประเทศไทย*

[1]*Energy Engineering Program, Faculty of Engineering, Thaksin University, Phatthalung Campus, Thailand*

[2] *Chemical Engineering and Pharmaceutical Chemistry Program,*

School of Engineering and Technology, Walailak University, Thailand

Received : 7 June 2023, Received in revised form : 22 January 2024, Accepted : 6 February 2024

Available online : 6 March 2024

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา : วัสดุเศษเหลือจากปาล์มน้ำมันมีศักยภาพในการที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานได้อย่างยั่งยืน แม้ว่าจะมีคุณลักษณะทางด้านเชื้อเพลิงที่ต่ำ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงได้ใช้กระบวนการทอร์รีแฟคชันในการปรับปรุงเพื่อให้ได้เชื้อเพลิงแข็งที่มีประสิทธิภาพทางด้านพลังงาน

วิธีดำเนินการวิจัย : ได้ทำการออกแบบและสร้างปฏิกรณ์แบบสกรูลำเลียงที่ดำเนินการได้อย่างต่อเนื่องสำหรับกะลาปาล์มเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงในช่วงอุณหภูมิ 200 - 300 °C และเวลาที่อยู่ในปฏิกรณ์ช่วง 50 – 500 วินาที

ผลการวิจัย : ร้อยละผลได้เชิงมวลจะแปรผกผันกับดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชัน โดยทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มจะมีปริมาณคาร์บอนคงที่มากกว่ากะลาปาล์ม ในขณะที่ปริมาณความชื้นและปริมาณสารระเหยมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่อยู่ในปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ปริมาณอะตอมของคาร์บอนและไนโตรเจนเพิ่มขึ้นแต่อะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง โดยเมื่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมจะพบว่าที่อุณหภูมิ 260°C และเวลา 500 วินาที จะมีค่า EMCI มากที่สุด ซึ่งสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มที่ได้มีปริมาณความชื้นและสารระเหยต่ำ ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าสูงขึ้น เป็นผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น 1.20 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกะลาปาล์ม นอกจากนี้ ผลจากการศึกษาด้วย TGA แสดงให้เห็นว่าทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มมีปริมาณความชื้น สารระเหยง่าย เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสน้อยกว่ากะลาปาล์ม อีกทั้งผลของ SEM พบว่าพื้นผิวของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มมีความเรียบสูงกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสด้วยความร้อนจากกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ได้จึงสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีกว่ากะลาปาล์ม

สรุปผลการวิจัย : ผลการศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่าปฏิกรณ์แบบสกรูลำเลียงที่ดำเนินการได้อย่างต่อเนื่องมีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชันเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณลักษณะทางด้านเชื้อเพลิงของชีวมวล

คำสำคัญ : สมบัติทางด้านเชื้อเพลิง ; กะลาปาล์ม ; ทอร์รีแฟคชัน ; ปฏิกรณ์แบบสกรูลำเลียง

Abstract

Background and Objectives : Waste from oil palm has the potential to be used as a sustainable energy source, despite its low fuel characteristics. To address this, the torrefaction technique was employed to convert the waste into a solid fuel with improved energy efficiency.

Methodology : The study involved designing and constructing a continuous screw conveyor reactor for oil palm kernel shells (PKS) to enhance fuel properties at temperatures ranging from 200 to 300°C and residence times between 50 and 500 seconds.

Main Results : The research found that the mass yield percentage was inversely related to the severity index of the torrefaction. Torrefied PKS had a higher fixed carbon content than untreated PKS, while moisture and volatile content decreased with increased torrefaction temperature and residence time. Optimal conditions were observed at 260°C and 500 seconds, resulting in the highest Energy-mass co-benefit index (EMCI). This produced torrefied oil palm with low moisture and volatile content, higher fixed carbon, and increased heating value by 1.20 times compared to untreated PKS. Additionally, thermogravimetric analysis (TGA) revealed that torrefied PKS had lower moisture, volatile matter, hemicellulose, and cellulose content compared to untreated PKS. SEM analysis shows that the surface of torrefied PKS is smoother, attributed to the decomposition of hemicellulose and cellulose during the torrefaction process. The resulting torrefied product proves to be a more favorable biofuel option compared to untreated PKS.

Conclusions : The continuous screw conveyor reactor demonstrated efficiency in torrefaction for improving biofuel characteristics in waste of oil palm biomass.

Keywords : fuel properties ; palm kernel shell ; torrefaction ; screw conveyor reactor

***Corresponding author. E-mail :** chokchai@tsu.ac.th

บทนำ

ชีวมวลเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่าง ๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การใช้งานชีวมวลเพื่อทำให้ได้พลังงาน อาจจะทำโดยนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทนพลังงานจากฟอสซิล (เช่น น้ำมัน) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลเหล่านี้มีแหล่งที่มาต่าง ๆ กัน ได้แก่ พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) ไม้และเศษไม้ (wood and wood residue) หรือของเหลือจากอุตสาหกรรม ด้วยเหตุนี้ภาครัฐจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญ และประโยชน์ของพลังงานจากชีวมวล จึงมีนโยบายในการส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากชีวมวลเพื่อเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานให้กับประเทศ โดยได้กำหนดยุทธศาสตร์ชาติระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2560-2579) ไว้เกี่ยวกับการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และได้บรรจุไว้เป็นส่วนหนึ่งของยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 (พ.ศ.

2566-2570) โดยได้กำหนดเป้าหมายที่ 3 การสร้างสังคมคาร์บอนต่ำและยั่งยืน ตลอดจนได้กำหนดไว้ในกลยุทธ์ที่ 5 การปรับพฤติกรรมทางเศรษฐกิจและการดำรงชีพเข้าสู่วิถีชีวิตใหม่อย่างยั่งยืน ซึ่งได้มุ่งเน้นส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนและนวัตกรรมประหยัดพลังงานในครัวเรือน อีกทั้งกระทรวงพลังงานได้กำหนดแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 ซึ่งได้วางกรอบแผนบูรณาการพลังงานแห่งชาติที่ให้ความสำคัญใน 3 ด้าน ประกอบด้วยด้านความมั่นคงทางพลังงาน ด้านเศรษฐกิจ และด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงมั่งคั่งและยั่งยืนทางด้านพลังงานของไทยสู่การพึ่งพาตนเอง และสามารถพัฒนาพลังงานใหม่ได้

ประเทศไทยมีผลผลิตปาล์มน้ำมันสูงเป็นอันดับ 3 ของโลก ซึ่งพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันของไทยส่วนใหญ่อยู่ทางภาคใต้ โดยมีผลผลิตคิดเป็นสัดส่วน 90.2% ของพื้นที่เก็บเกี่ยวปาล์มน้ำมันทั่วประเทศ โดยเฉพาะในจังหวัดสุราษฎร์ธานี กระบี่ และชุมพร (สัดส่วนรวมกันเกือบ 61.7%) ที่เหลือกระจายปลูกในภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือตามลำดับ การหันมาปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (2552-2561) ตามยุทธศาสตร์ของแผนพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศ ทำให้ไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันที่ให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น โดยปี 2565 อยู่ที่ 6.13 ล้านไร่ ให้ผลผลิตปาล์มน้ำมัน 18.6 ล้านตัน ซึ่งปาล์มน้ำมัน 1 ตัน จะให้วัสดุเศษเหลือที่เป็นทะลายปาล์มเปล่า 0.32 ตัน เส้นใยปาล์ม 0.19 ตัน และกะลาปาล์ม 0.04 ตัน ซึ่งเป็นปริมาณที่มีมากพอในการที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ดังนั้นวัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมัน จึงเป็นชีวมวลที่มีศักยภาพในแง่ของปริมาณสำหรับการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง แต่การนำวัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงจะส่งผลให้มีสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงต่ำ นั่นคือ จะให้ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำ เนื่องจากวัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมันมีปริมาณความชื้น (moisture) และปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic content) สูง แต่จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) และความหนาแน่นเชิงพลังงานต่ำ จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงก่อนการนำไปใช้งาน

กระบวนการทอร์รีแฟคชัน (torrefaction process) เป็นกระบวนการให้ความร้อนกับชีวมวลที่อุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่จำกัดปริมาณออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงถ่านหิน (Doddapaneni *et al.*, 2022) นั่นคือ จะมีค่าความหนาแน่นเชิงพลังงาน (energy density) สูงขึ้น (Krysanova *et al.*, 2022) โดยกระบวนการดังกล่าวจะสามารถกำจัดความชื้นและสารระเหยบางส่วนออกไป ทำให้ชีวมวลมีสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น โดยโครงสร้างของชีวมวลจะเกิดการสลายตัว ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และบางส่วนของเซลลูโลส (cellulose) ทำให้ผลิตภัณฑ์ชีวมวลมีความเปราะ สามารถบดย่อยได้ง่าย อีกทั้งลิกนิน (โครงสร้างที่แข็งแรงของชีวมวล) บางส่วนก็เกิดการสลายตัวด้วยเช่นกัน ผลิตภัณฑ์ชีวมวลที่ผ่านการทอร์รีแฟคชันจะเปลี่ยนคุณสมบัติจากโมเลกุลที่ชอบน้ำ (hydrophilic) เป็นโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) (Sarker *et al.*, 2022) ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมความชื้นลดลงจึงไม่ทำให้เชื้อราเกิดการเจริญเติบโตซึ่งจะนำไปสู่การเน่าเปื่อยของชีวมวล ทำให้สะดวกต่อการเก็บรักษา และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ชีวมวลที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น (Sarker *et al.*, 2021a) ซึ่งชีวมวลแต่ละประเภทจะให้ชีวมวลทอร์รีไฟด์ที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์ที่ได้สามารถนำมาอัดแท่งเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง และสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหิน (co-feeding) ในหม้อไอน้ำ (boiler) (Waheed *et al.*, 2022) ซึ่งจะช่วยลดการปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ได้อีกด้วย

ชีวมวลหลากหลายชนิดสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดย Jifara Daba *et al.* (2023) ศึกษาการใช้ซังข้าวโพดและก้านผักกาดซึ่งเป็นของเหลือใช้ทางการเกษตรในกระบวนการทอร์รีแฟคชัน พบว่าร้อยละผลได้ของพลังงานสำหรับซังข้าวโพดที่อุณหภูมิ 300 °C และเวลา 30 นาที จะมีค่าเท่ากับ 98.5% และร้อยละผลได้ของพลังงานสำหรับก้านผักกาดที่อุณหภูมิ 300 °C และเวลา 45 นาที จะมีค่าเท่ากับ 94.9% และ Jezerska *et al.* (2023) ศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันของกากกาแฟ แกลบ และเปลือกเมล็ดเรพซีดอัดเม็ดที่อุณหภูมิ 280°C เป็นเวลา 120 นาที พบว่าชีวมวลอัดเม็ดทุกชนิดมีสมบัติทางเชื้อเพลิงที่เหมาะสมและมีค่าอัตราส่วนของ C/O, C/H, ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนต่ำเพิ่มขึ้น โดยทอร์รีไฟด์กากกาแฟอัดแท่งมีค่าความร้อนต่ำสูงที่สุด แต่จะไม่ส่งผลให้ปริมาณเถ้า ไนโตรเจน และซัลเฟอร์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ความต้านทานเชิงกลและความแข็งของแท่งเชื้อเพลิงลดลง ซึ่งส่งผลในเชิงบวกต่อความสามารถในการเปียก (Wettability) และความหนาแน่นของอนุภาค (particle density parameters) ทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ อีกทั้ง Granado *et al.* (2023) ได้ศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันที่อุณหภูมิ 250 °C เป็นเวลา 90 นาที ของชีวมวลอัดก้อนจากเหง้ามันสำปะหลัง ชานอ้อย และหลอดชานอ้อย ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1270 1240 และ 1300 kg/m^3 ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์อัดก้อนที่ได้จะมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น 9-13 เท่า แต่จะมีการเสียรูปตามความยาว 12.9-26.6% และมีรอยแตกของก้อนเชื้อเพลิง ในขณะเดียวกันก็จะมีการแตกตัวหลังจากการทดสอบความทนทาน ยิ่งไปกว่านั้นยังส่งผลให้เชื้อเพลิงอัดก้อนจากเหง้ามันสำปะหลัง ชานอ้อย และหลอดชานอ้อยที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันมีความหนาแน่นลดลง 36%, 50% และ 55% ตามลำดับ นอกจากนี้ Devaraja *et al.*(2023) ได้ศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันของ Rubberwood และ Gliricidia ที่อุณหภูมิ 250-300 °C เป็นเวลา 30-60 นาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ผลการศึกษาพบว่าที่สภาวะที่รุนแรงที่สุดส่งผลให้ค่าความร้อนของ Rubberwood เพิ่มขึ้นจาก 18.9 MJ/kg เป็น 21.39 MJ/kg และ Gliricidia เพิ่มขึ้นจาก 19.46 MJ/kg เป็น 22.44 MJ/kg และ Hasan *et al.* (2022) ได้ศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์มเปล่าที่อุณหภูมิ 250-300 °C เป็นเวลา 30-60 นาที ภายใต้ความดันบรรยากาศไนโตรเจน 0.0230 MPa ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ และเคมีกายภาพของทอร์รีไฟด์ทะลายปาล์มเปล่ามากกว่าปัจจัยของเวลา โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลให้ค่าความร้อน สมบัติไม่ชอบน้ำ อัตราส่วนของ H/C และ O/C ตลอดจนค่าความเสถียรทางความร้อนของทอร์รีไฟด์ทะลายปาล์มเปล่าได้รับการปรับปรุงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 300 °C ทอร์รีไฟด์ทะลายปาล์มเปล่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว โครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึก และหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นผลจากการสลายตัวอย่างมีนัยสำคัญขององค์ประกอบหลักของชีวมวล โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส

อีกทั้งนักวิจัยหลายคนได้มีการศึกษาผลของกระบวนการทอร์รีแฟคชันต่อการปรับปรุงสมบัติทางเชื้อเพลิงของกะลาปาล์ม โดย Bampenrat *et al.,* (2023) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ (225-300°C) และเวลา (30-90 นาที) ด้วยปฏิกรณ์แบบ fixed-bed พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์มากกว่าเวลา โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 225 °C เป็น 300 °C จะส่งผลให้ร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงในช่วง 28.00-29.88 wt.% ในขณะที่ผลของเวลาจะส่งผลให้ร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงในช่วง 1.53-3.41 wt.% อีกทั้งค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นในช่วง 1.73-5.5 MJ/kg เมื่อ torrefaction severity เพิ่มขึ้น จึงพบว่าสภาวะที่เหมาะสมจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 275 °C เมื่อใช้เวลา 90 นาที นอกจากนี้ Gan *et al.* (2019) ได้ศึกษาการทอร์รีแฟคชั่นแบบเปียก (Wet torrefaction) ของกะลาปาล์มด้วย stainless steel high-pressure reactor autoclave ที่ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ (180-220°C) เวลา (10-30 นาที) และอัตราส่วนของกะลา

ปาล์มต่อน้ำ (0.1-0.2) โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์มากที่สุด อีกทั้งค่าความร้อนของกะลาปาล์มเพิ่มขึ้นจาก 18.9 MJ/kg เป็น 23.4 MJ/kg เมื่อทำการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิ 220 °C เป็นเวลา 30 นาที ด้วยอัตราส่วนของกะลาปาล์มต่อน้ำ เท่ากับ 0.2 และ Karelius *et al.*, (2020) ศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันของกะลาปาล์มโดยใช้ Counter Flow Multi-Buffle (COMB) method เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 250 °C กำหนดอัตราการไหลของอากาศร้อนที่ 4 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และคัดแยกขนาดของวัตถุดิบที่ใช้ผ่านตะแกรงที่มีขนาด 0.5 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่ามีร้อยละผลได้และความหนาแน่นของพลังงาน 0.77 และ 1.21 ตามลำดับ อีกทั้งค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 16.82 MJ เป็น 19.11 MJ ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนของ O/C และ H/C ลดลง ยิ่งไปกว่านั้นยังส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าลดลง 9.34% และปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น 0.64%

ปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชัน เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ได้ โดยชนิดของชีวมวลที่ใช้ก็มีบทบาทสำคัญในการเลือกชนิดของปฏิกรณ์ (Tumuluru *et al.*, 2021) ซึ่งปฏิกรณ์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้แก่ fixed-bed (Orisaleye *et al.*, 2021), microwave (Sarker *et al.*, 2021b), rotating drum (Soponpongpipat *et al.*, 2020), fluidized bed (Nebyvaev *et al.*, 2023) and screw conveyor (Abdulyekeen *et al.*, 2023) โดยปฏิกรณ์แต่ละชนิดจะมีข้อเสียที่แตกต่างกัน เช่น Rotary drum reactor จะทำการขยายขนาดของปฏิกรณ์ได้ยาก เพราะเมื่อขนาดของปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นมากจะเกิดความซับซ้อนในการขยายขนาดเนื่องจากพื้นที่การถ่ายเทความร้อนไปยังชีวมวลในระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟคชันถูกจำกัด มีค่าใช้จ่ายสูงและควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการได้ยาก สำหรับ moving bed reactor เมื่อขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้นจะมีความเสี่ยงในเรื่องของความดันที่เกิดขึ้นที่จะทำให้ปฏิกรณ์เกิดความเสียหาย ตลอดจนความสามารถในการเคลื่อนที่ของวัตถุดิบในปฏิกรณ์ และการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ ส่วน fluidized bed reactor หากขนาดของวัตถุดิบมีความแตกต่างกันจะทำให้ควบคุมการถ่ายเทความร้อนภายในปฏิกรณ์ได้ยาก อีกทั้งมีการตอบสนองของอุณหภูมิที่ช้าลง กรณี Belt reactor อาจจะทำให้ปฏิกรณ์ไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กเข้าไปขัดขวางการทำงานของเครื่อง และการควบคุมอุณหภูมิทำได้ค่อนข้างยาก (Piersa *et al.*, 2022) นอกจากนี้ปฏิกรณ์ส่วนใหญ่จะใช้เวลาสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชันเป็นเวลานาน ซึ่งทำให้เป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต แต่ continuous screw conveyor reactor จะใช้เวลาลดลงเนื่องจากวัตถุดิบมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาจึงทำให้การถ่ายโอนความร้อนเข้าสู่ชีวมวลเกิดได้ดีขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงทำให้มีประสิทธิภาพมากแม้จะประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม และค่าลงทุนก่อสร้างค่อนข้างต่ำ (Slezak *et al.*, 2023)

ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยชิ้นนี้ก็เพื่อศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันของกะลาปาล์ม โดยใช้ปฏิกรณ์แบบสกรูลำเลียงแบบต่อเนื่อง เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกะลาปาล์ม ได้แก่ ความชื้น (Moisture) สารระเหย (Volatiles matter) เถ้า (Ash) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิง ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิง การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเชื้อเพลิง และโครงสร้างบริเวณพื้นผิวของเชื้อเพลิง

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบ

กะลาปาล์ม ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ปาล์มดีศรีนคร จำกัด

แนวคิดการจัดสร้างปฏิกรณ์แบบสกรูลำเลียงสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

แนวคิดในการออกแบบปฏิกรณ์สกรูลำเลียงสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชัน เป็นการออกแบบให้กระบวนการสามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกะลาปาล์มน้ำมัน ซึ่งส่วนประกอบของปฏิกรณ์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนเป็น (ดังแสดงใน Figure 1) คือ ส่วนที่ 1 โครงสร้างของปฏิกรณ์แบบสกรูลำเลียง จะประกอบด้วย สกรูลำเลียง ท่อของสกรูลำเลียงที่มีการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน กรวยป้อนหรือถังป้อน (hopper feeder) และทางออกของกะลาปาล์ม ช่องทางเข้าของแก๊สไนโตรเจน ต้นกำลังและระบบส่งกำลังของระบบลำเลียง โครงเหล็กรองรับท่อสกรูลำเลียง ซึ่งท่อสกรูลำเลียงจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนสำหรับการระเหยความชื้นจากกะลาปาล์มน้ำมัน โดยใช้ท่อขนาด 4 นิ้ว ความยาว 1 เมตร อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 150 °C ลำเลียงวัตถุดิบแบบต่อเนื่องด้วยมอเตอร์ขับสกรูขนาด 1HP และส่วนสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยใช้ท่อขนาด 4 นิ้ว ความยาว 3 เมตร อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 400 °C ลำเลียงวัตถุดิบแบบต่อเนื่องด้วยมอเตอร์ขับสกรูขนาด 2HP ซึ่งการหมุนของมอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ (Jaden inverter ขนาดแรงดันไฟฟ้า 400V 3 phase 0.75kW) เพื่อให้วัตถุดิบอยู่ในปฏิกรณ์ตามระยะเวลาที่กำหนด โดยระยะเวลาจะเริ่มจับตั้งแต่ใส่กะลาปาล์มเข้าสู่กรวยป้อนจนได้ผลิตภัณฑ์ออกจากปฏิกรณ์จึงจะทำการหยุดเวลา ส่วนที่ 2 ระบบการทำความร้อน จะใช้ฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater) แบบธรรมดาที่มีกำลังไฟฟ้า 1000W (380V) และเซรามิคฮีตเตอร์ที่มีกำลังไฟฟ้า 1500W (380V) สำหรับช่วงอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 150 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และส่วนที่ 3 ระบบการควบคุมอุณหภูมิ จะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิทั้งหมด 6 จุด ซึ่งระบบการควบคุมอุณหภูมิจะใช้ระบบ on-off ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าค่าที่กำหนดระบบควบคุมจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าที่กำหนดระบบควบคุมจะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์

การดำเนินการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทอร์รีแฟคชันของกะลาปาล์ม

กะลาปาล์มจะถูกป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์แบบสกรูลำเลียงสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชันด้วยอัตรา 100 กรัม/นาที โดยเริ่มจากการบรรจุกะลาปาล์มลงในกรวยป้อนหรือถังป้อน (hopper feeder) ทางเข้า เพื่อให้สกรูลำเลียงกะลาปาล์มเข้าไปในปฏิกรณ์สำหรับการระเหยความชื้นจากกะลาปาล์มซึ่งกำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 100 °C เพื่อลดปริมาณความชื้นของกะลาปาล์มก่อนลำเลียงเข้าสู่ปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชันซึ่งอุณหภูมิในการทดลองกำหนดไว้ที่ 200, 220, 240, 260, 280 และ 300 °C และระยะเวลาในการทดลองกำหนดไว้ที่ 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 และ 500 วินาที โดยในขณะที่กระบวนการดำเนินไปจะมีการป้อนแก๊สไนโตรเจนอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที เข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องเพื่อลดปริมาณออกซิเจนในระบบและเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันในระบบจนผลิตภัณฑ์กลายเป็นเถ้า เมื่อกระบวนการในแต่ละสภาวะดำเนินการเสร็จเรียบร้อย ตัวอย่างบางส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากกระบวนการจะเก็บไว้ในถุง Ziplock เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงต่อไป ซึ่งร้อยละผลได้เชิงมวลของเชื้อเพลิงแข็ง (Solid mass yield, SMY) และ ดัชนีความรุนแรงของการทอร์รีแฟคชัน (torrefaction severity index, TSI) (Zhang *et al.*, 2018) จะคำนวณโดยใช้สมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$SMY\ (\%) = \frac{Mass\ of\ torrefied}{Mass\ of\ raw} \times 100\% \quad (1)$$

$$TSI = \frac{\mathrm{WL}_{T,t}}{\mathrm{WL}_{300C,50sec}} = \frac{100 - SMY_{T,t}}{100 - SMY_{300C,50sec}} \quad (2)$$

โดยที่ $\mathrm{WL}_{T,t}$ คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียไปที่อุณหภูมิและเวลาที่ศึกษา

$\mathrm{WL}_{300C,500sec}$ คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียไปที่อุณหภูมิ 300 °C และเวลา 500 วินาที

$SMY_{T,t}$ คือ ร้อยละผลได้เชิงมวลของเชื้อเพลิงแข็งที่อุณหภูมิและเวลาที่ศึกษา

$SMY_{300C,500sec}$ คือ ร้อยละผลได้เชิงมวลของเชื้อเพลิงแข็งที่อุณหภูมิ 300 °C และเวลา 500 วินาที

การศึกษาสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

การวิเคราะห์แบบกะประมาณ (Proximate Analysis)

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณความชื้น (Moisture) ตามมาตรฐาน ASTM D 3173 สารระเหย (Volatiles matter) ตามมาตรฐาน ASTM D 3175 เถ้า (Ash) ตามมาตรฐาน ASTM D 3174 และคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) โดยเริ่มต้นจากการชั่งน้ำหนักของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มประมาณ 1±0.005 กรัม จากนั้นจึงนำไปอบในตู้อบโดยเปิดฝาครูซิเบิลที่อุณหภูมิ 104-110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำครูซิเบิลออกมาเก็บไว้ให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ 1 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักแล้วนำไปอบซ้ำอีกจนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ คำนวณหาปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงด้วยสมการที่ (3) จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือจากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นลงในครูซิเบิลแล้วบันทึกค่าไว้ จากนั้นนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 7 นาที แล้วนำครูซิเบิลมาเก็บไว้ในเดสิคเคเตอร์จนเย็น แล้วจึงชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือ เพื่อคำนวณหาปริมาณสารระเหย โดยใช้สมการที่ (4) สุดท้ายจึงทำการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า โดยใช้ตัวอย่างที่เหลือจากการวิเคราะห์สารระเหย มาชั่งน้ำหนักในครูซิเบิล แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำครูซิเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักครู ซิเบิลแล้วนำไปเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 750 °C อีกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำจนกว่าน้ำหนักคงที่ จึงจะนำน้ำหนักสุดท้ายที่ชั่งได้มาคำนวณหาปริมาณเถ้าดังสมการที่ (5) จากนั้นทำการหาปริมาณคาร์บอนคงตัวโดยใช้วิธีการคำนวณด้วยร้อยละของผลต่างของปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้า ดังสมการที่ (6)

$$\text{Moisture content}\ (\%) = \frac{\text{น้ำหนักของเชื้อเพลิง (กรัม)} - \text{น้ำหนักอบแห้งของเชื้อเพลิง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของเชื้อเพลิง (กรัม)}} \times 100 \quad (3)$$

$$Volatile\ matters\ (\%) = \frac{\text{น้ำหนักอบแห้งของเชื้อเพลิง (กรัม)} - \text{น้ำหนักของเชื้อเพลิงหลังอบที่อุณหภูมิ 900 °C (กรัม)}}{\text{น้ำหนักอบแห้งของเชื้อเพลิง (กรัม)}} \times 100 \quad (4)$$

$$Ash\ content\ (\%) = \frac{\text{น้ำหนักของเชื้อเพลิงหลังอบที่อุณหภูมิ 750 °C(กรัม)}}{\text{น้ำหนักอบแห้งของเชื้อเพลิง (กรัม)}} \times 100 \quad (5)$$

$$Fixed\ carbon = 100\% - Moiture\ content(\%) - Volatile\ matter(\%) - Ash\ cotent(\%) \quad (6)$$

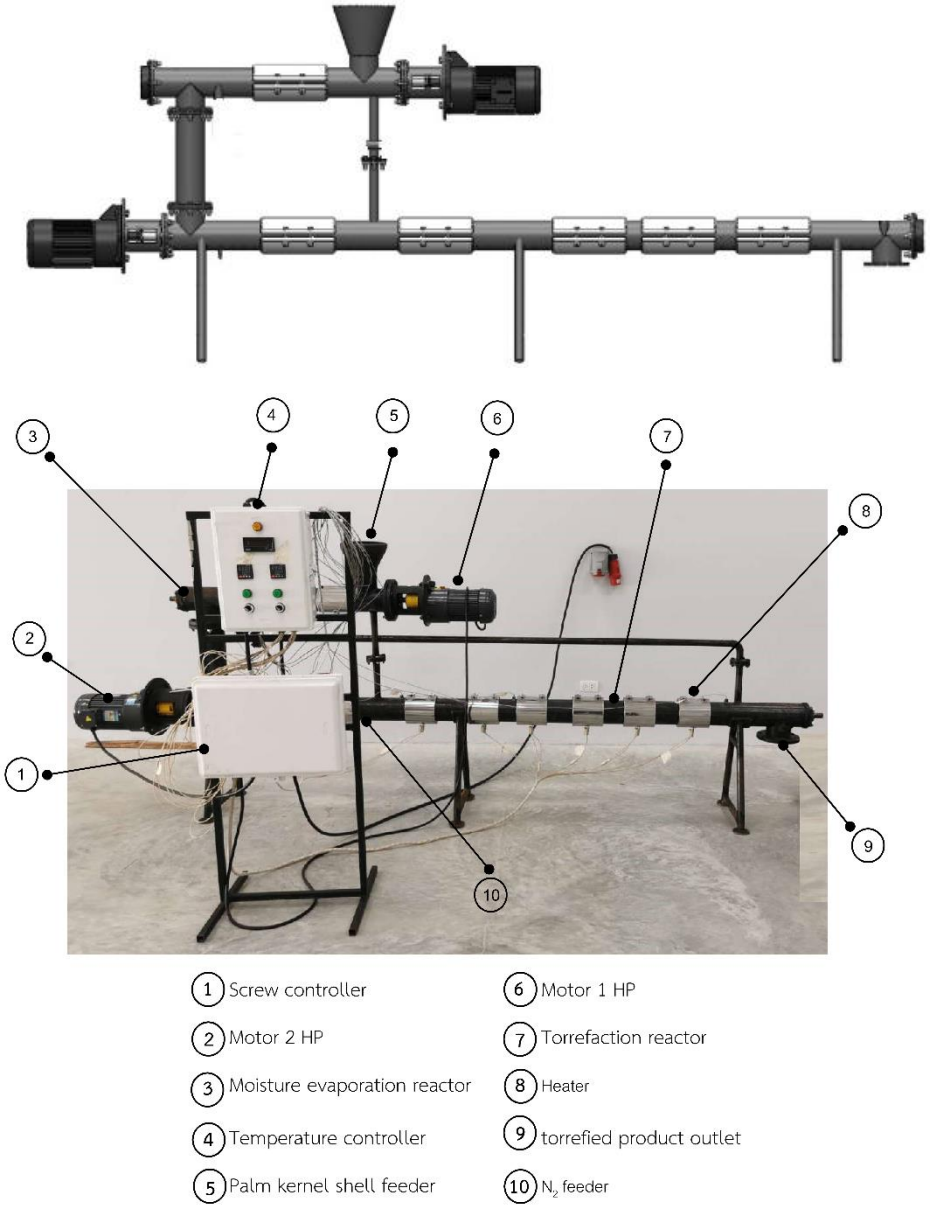


Figure 1 Screw conveyor reactor for torrefaction process of palm kernel shell

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่มีในชีวมวลตามมาตรฐาน ASTM D3302/3302D-12 ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ โดยใช้เครื่อง CHNS/O Analyzer, FLASH 2000, ThermoScientific, Italy

การวิเคราะห์ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ตามมาตรฐาน ASTM D 5865 โดยเป็นเครื่องมือหาค่าความร้อนของตัวอย่าง มีหลักการทำงานโดยใส่ตัวอย่างลงไปใน bomb เพื่อเผาจนตัวอย่างลุกไหม้ให้ความร้อนออกมา ความร้อนจะถ่ายเทให้กับน้ำที่ล้อมรอบ bomb จากนั้นจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ ค่าที่ได้จะนำไปประมวลผลและรายงานผลค่าพลังงานความร้อนที่ได้ จากนั้นจึงนำไปคำนวนหาค่า Energy yield (EY) (Chen *et al.*, 2022a) และ Energy-mass co-benefit index (EMCI) ดังสมการ (7) และ (8)

$$EY\ (\%) = \frac{M_{torrefied} \times HHV_{torrefied}}{M_{raw\ material} \times HHV_{raw\ materail}} \quad (7)$$

$$EMCI = EY\ (\%) - SMY\ (\%) \quad (8)$$

โดยที่ $HHV_{torrefied}$ และ $HHV_{raw\ material}$ คือ ค่าความร้อนสูงของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มและกะลาปาล์ม

$M_{torrefied}$ และ $M_{raw\ material}$ คือ มวลของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มและกะลาปาล์ม

การวิเคราะห์ความเสถียรต่อความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ความเสถียรต่อความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม ตามมาตรฐาน ASTM D 7582 จะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์โครงสร้างบริเวณพื้นผิวของกะลาปาล์มน้ำมัน และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม

การวิเคราะห์โครงสร้างบริเวณพื้นผิวของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มจะศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อีมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) FEI รุ่น Quanta 450

ผลการวิจัย

ลักษณะทางกายภาพของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงพบว่า กะลาปาล์มมีค่าปริมาณความชื้น (%Moisture) สารระเหย (%Volatiles matter) เถ้า (%Ash) และคาร์บอนคงตัว (%Fixed Carbon) เท่ากับ 12.4±0.14, 86.5±0.14, 1.1±0.004 และ 0.039±0.034 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามี % moisture และ % volatile organic ที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ

ปริมาณ % fixed carbon ดังนั้นจึงทำให้กะลาปาล์มมีสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่ต่ำ และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่า Heating value จะพบว่ามีค่าเพียง 16.048±0.32 MJ/kg ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ganesan (2022) และ Asadullah, *et al.* (2013) อีกทั้งมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ซัลเฟอร์ (S) และไนโตรเจน (N) เท่ากับ 46.545, 5.400, 38.668, 0.011 และ 0.313 wt% ตามลำดับ

Figure 2 Physical characteristics of palm kernel shell (a) and torrefied palm kernel shell at 300 °C for durations of (b) 100, (c) 200, (d) 300, (e) 400, and (f) 500 seconds.

ร้อยละผลได้เชิงมวลของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม และดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชัน (Torrefaction severity index)

กะลาปาล์ม เมื่อป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์จะได้รับความร้อน จึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนัก และเมื่อพิจารณาร้อยละผลได้เชิงมวลของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม และค่าดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชันของกะลาปาล์มที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกันกับข้อมูลสำหรับร้อยละผลได้เชิงมวลของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม จะเป็นดังแสดงใน Figure 3 , 4 ตามลำดับ

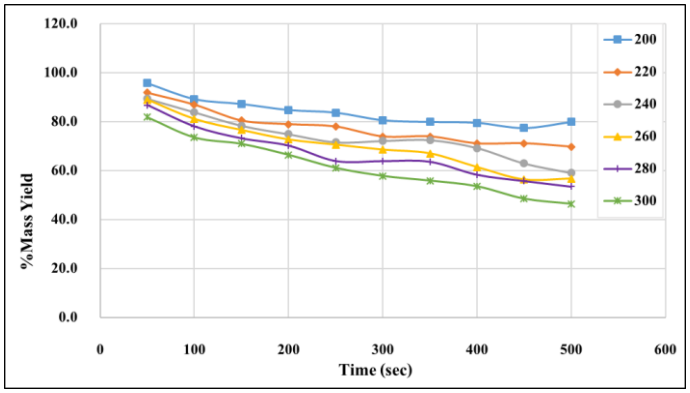


Figure 3 %Mass yield of torrefied palm kernel shell

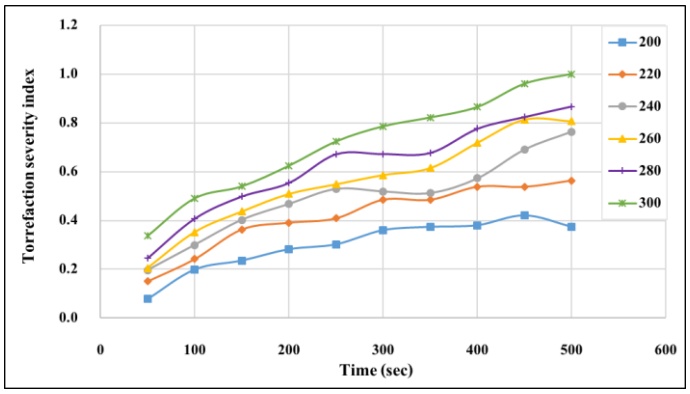


Figure 4 Torrefaction severity index of torrefied palm kernel shell

สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม

ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มที่ผลิตได้ในช่วงอุณหภูมิ 200-300 °C เมื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ผลที่ได้เป็นดังแสดงใน Figure 5

ค่าความร้อน (Heating value) ของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม

ค่าความร้อน เป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่สามารถบ่งบอกคุณภาพของเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี โดยเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีจะต้องมีค่าความร้อนที่สูง นั่นแสดงว่าเมื่อเกิดการเผาไหม้จะให้พลังงานออกมาสูงเช่นกัน ซึ่งผลการศึกษาค่าความร้อน และ Energy-mass co-benefit index ของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มเป็นดังแสดงใน Figure 6, 7

การวิเคราะห์ความเสถียรต่อความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม

ความเสถียรต่อความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวลจะทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) โดยจะแสดงการเปลี่ยนแปลงมวลซึ่งเป็นการสร้างกราฟระหว่างน้ำหนัก (mg) และอุณหภูมิ (°C) และแสดงค่า Derivative thermogravimetric analysis (DTA) ซึ่งเป็นการสร้างกราฟระหว่างอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา (dm/dt) และอุณหภูมิ (°C) โดยการสูญเสียน้ำหนักของชีวมวลที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การระเหยความชื้น และสารระเหยง่าย (อุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-200 °C)

ขั้นตอนที่ 2 การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ในช่วงอุณหภูมิ 200 – 315 °C และ 315 – 400 °C ตามลำดับ ขั้นตอนที่ 3 การสลายตัวของถ่านชาร์ และลิกนิน ในช่วงอุณหภูมิ 160 – 900 °C (Hasan *et al.*, 2022) ซึ่งความเสถียรต่อความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของกะลาปาล์มและทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม เป็นดังแสดงใน Figure 8

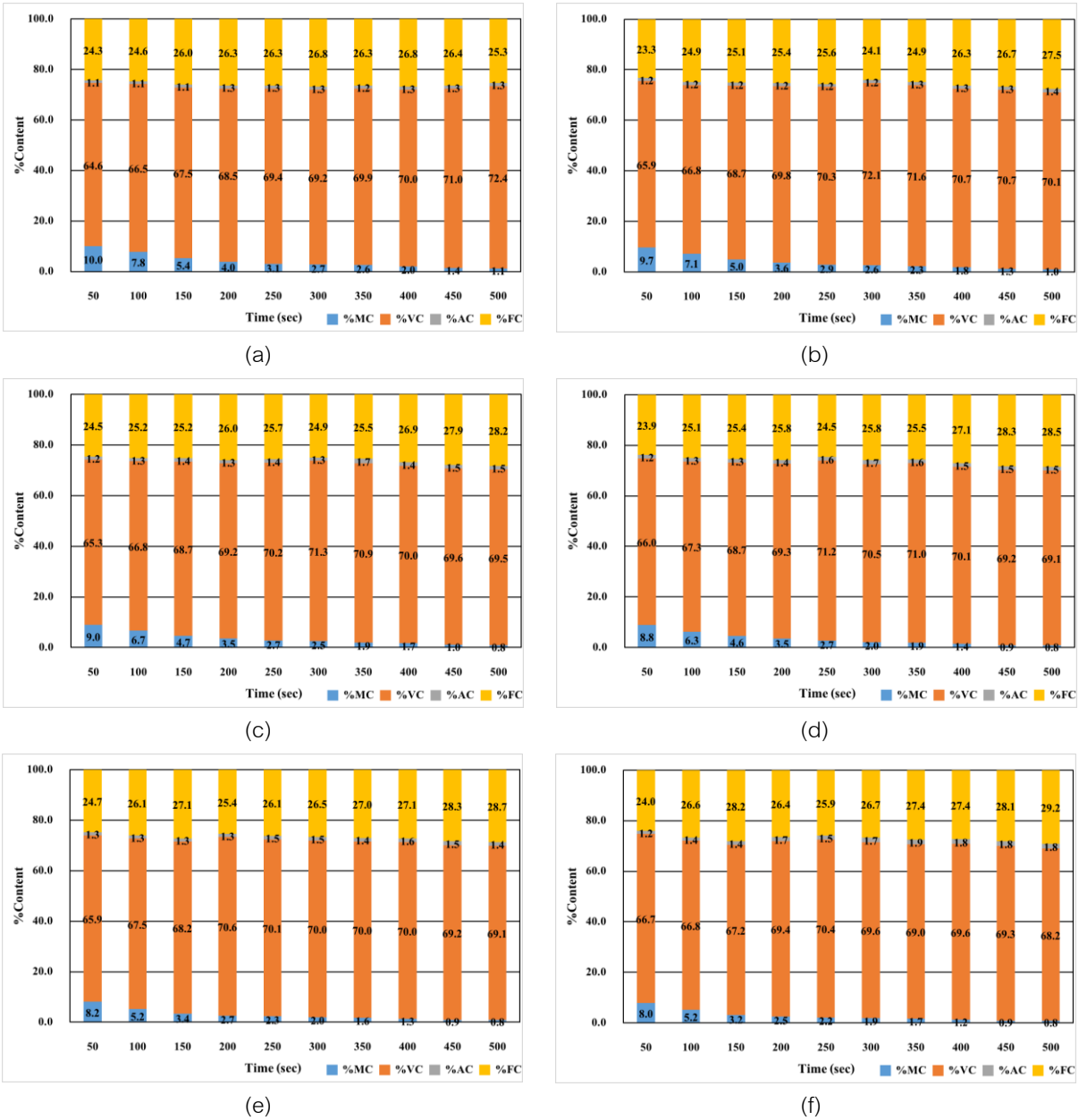


Figure 5 Quantity of moisture, volatile organic, ash and fixed carbon of torrefied palm kernel shell at (a) 200 °C (b) 220 °C (c) 240 °C (d) 260 °C (e) 280 °C (f) 300 °C

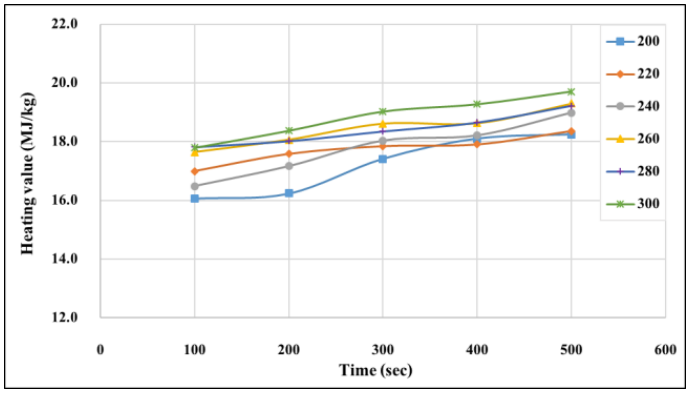


Figure 6 Heating value of torrefied palm kernel shell

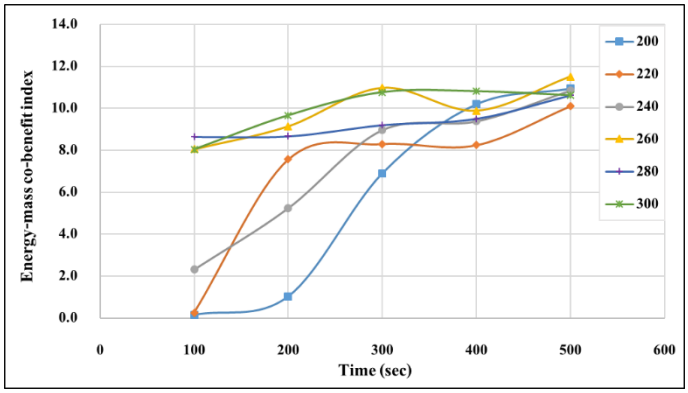
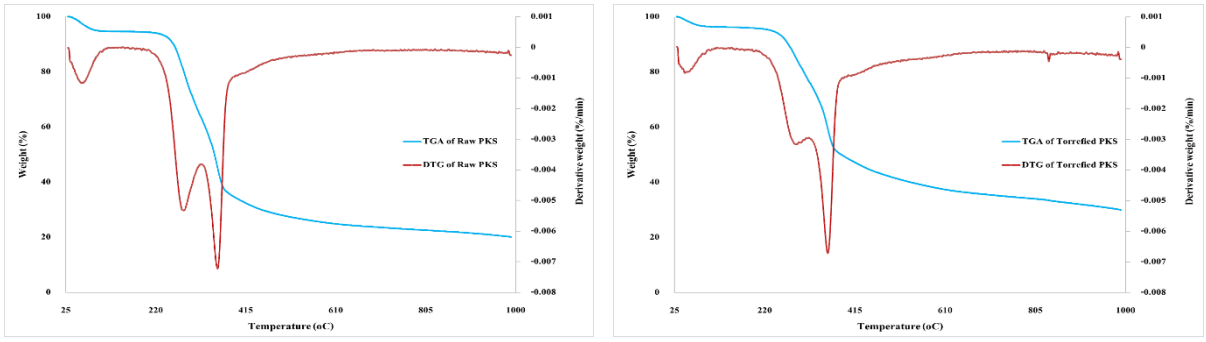


Figure 7 Energy-mass co-benefit index of torrefied palm kernel shell

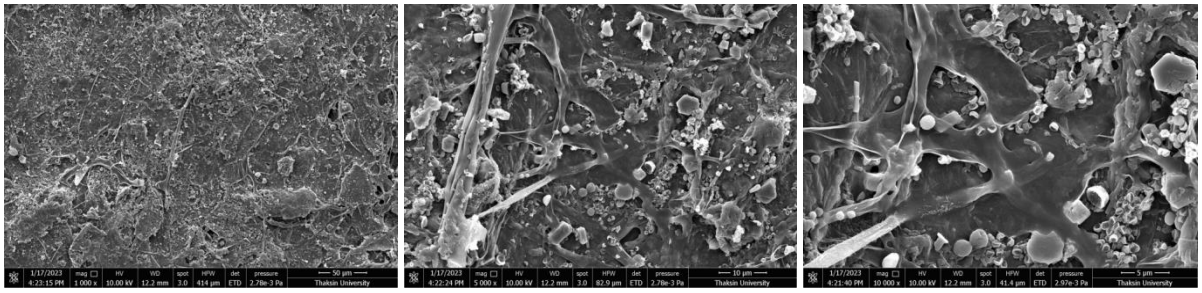


(a) (b)

Figure 8 The heat stability and temperature degradation of (a) palm kernel shell (b) torrefied palm kernel shell

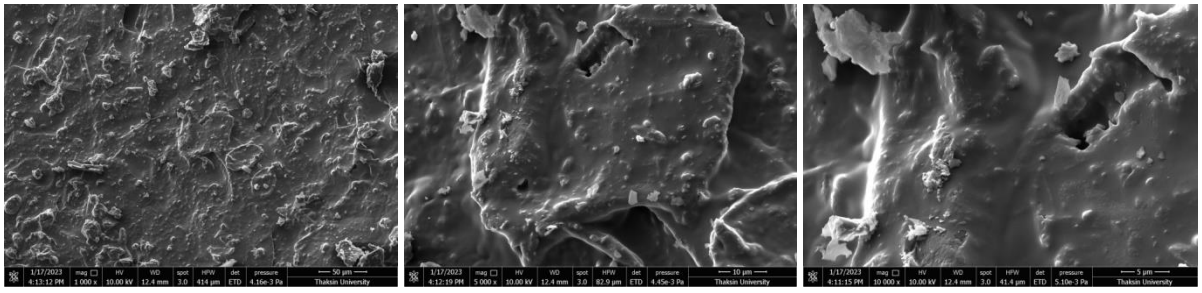
การวิเคราะห์โครงสร้างบริเวณพื้นผิวของกะลาปาล์มน้ำมัน และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม

ลักษณะโครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วย SEM ของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม เป็นดังแสดงใน Figure 9, 10



(a) (b) (c)

Figure 9 Scanning electron microscope (SEM) image showing the expanded surface of palm kernel shell (a) 1000X (b) 5000X and (c) 10000X



(a) (b) (c)

Figure 10 Scanning electron microscope (SEM) image showing the expanded surface of torrefied palm kernel shell (a) 1000X (b) 5000X and (c) 10000X

วิจารณ์ผลการวิจัย

ลักษณะทางกายภาพของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม

กะลาปาล์มจะเป็นส่วนที่จะอยู่ระหว่างเส้นใยปาล์มที่ติดเปลือกด้านนอกสุด กับเนื้อปาล์มที่อยู่ด้านในสุด ลักษณะทางกายภาพของกะลาปาล์มจะมีสีน้ำตาล เนื้อแข็ง ขนาดของกะลาปาล์มที่ได้จากกระบวนการหีบน้ำมันจะมีความแตกต่างกันมาก ตั้งแต่ขนาดเล็กมากไปจนถึงขนาดประมาณ 2.5 เซนติเมตร (Figure 2) ซึ่งเมื่อนำมาผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันจะพบว่าลักษณะสีของกะลาปาล์มจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ และระยะเวลาที่อยู่ภายในปฏิกรณ์ นั่นคือ สีของกะลาปาล์มจะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีดำ เมื่อระยะเวลาที่อยู่ในปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นจาก 100 วินาที เป็น 500 วินาที (Figure 2) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากการระเหยของความชื้น และสารระเหยง่ายที่มีอยู่ในกะลาปาล์ม อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นก็จะส่งผลให้กะลาปาล์มมีสีดำลักษณะคล้ายถ่านมากขึ้น (Hasan *et al.*, 2022) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ส่งผลให้มีองค์ประกอบของคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น

ร้อยละผลได้เชิงมวลของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม และดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชัน (Torrefaction severity index)

ร้อยละผลได้เชิงมวลของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิ และระยะเวลาที่กะลาปาล์มอยู่ในปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Figure 3 ซึ่งเป็นผลจากการสูญเสียความชื้น และสารระเหยง่ายที่มีอยู่ในกะลาปาล์ม หรือเกิดกระบวนการ devolatilization โดยความสามารถในการระเหยของความชื้น และสารระเหยง่ายจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ และระยะเวลาที่กะลาปาล์มอยู่ในปฏิกรณ์ นอกจากนี้ยังเป็นผลสืบเนื่องมาจากปฏิกิริยาการแตกออกของพอลิเมอร์ (depolymerization) จึงทำให้เส้นใยที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มีขนาดเล็กลง, ดีออกซิจีเนชัน (deoxygenation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลออกซิเจนลดลงหรือสูญเสียไปจากโมเลกุลภายในชีวมวล และคาร์บอไนเซชัน (carbonization) จะทำให้อะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของแก๊ส อะตอมคาร์บอนจะเรียงตัวเป็นชั้นจึงได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น (Lokmit *et al.*, 2023) ซึ่งเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส โดยจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำจะมีร้อยละผลได้เชิงมวลของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องมาจากที่อุณหภูมิต่ำจะสามารถเกิดการระเหยของความชื้นและโมเลกุลเล็ก ๆ ของสารระเหยง่ายได้เพียงเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้โครงสร้างโมเลกุลของ lignocellulosic เกิดการสลายตัวได้

เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชันของกะลาปาล์มจะเป็นดังแสดงใน Figure 4 ซึ่งแสดงว่าค่าดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชันของกะลาปาล์มจะแปรผกผันกับร้อยละผลได้เชิงมวลของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม นั่นคือ ที่ดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชันของกะลาปาล์มมีค่าต่ำ จะส่งผลให้ร้อยละผลได้เชิงมวลของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มมีค่าสูง และในทางกลับกัน เมื่อดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชันของกะลาปาล์มมีค่าสูงจะส่งผลให้ร้อยละผลได้เชิงมวลของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มมีค่าต่ำ ซึ่งเป็นผลจากการระเหยของความชื้น สารระเหยง่าย และการสลายตัวของ lignocellulosic สามารถเกิดได้ดีเมื่อค่าดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชันของกะลาปาล์มมีค่าสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Chen *et al.*, 2022b) ที่พบว่าอุณหภูมิ และเวลาจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชัน ดังนั้นคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์จะแปรผันตรงกับค่าดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชัน แต่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพทางด้านพลังงานลดลง

สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม

สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มผลที่ได้เป็นดังแสดงใน Figure 5 พบว่าปริมาณความชื้นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิ และระยะเวลาที่กะลาปาล์มอยู่ในปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิ และระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความชื้นเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ และระเหยออกจากกะลาปาล์มได้มากขึ้น (Ahmad *et al.*, 2023) ประกอบกับการหมุนเคลื่อนที่ตลอดเวลาในขณะที่กะลาปาล์มอยู่ในปฏิกรณ์จึงทำให้ความชื้นสามารถระเหยออกจากกะลาปาล์มได้ดียิ่งขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยที่มีในทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม จะพบว่าที่อุณหภูมิ 200 °C ปริมาณสารระเหยจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่กะลาปาล์มอยู่ในปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมินี้กะลาปาล์มยังมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงเป็นช่วงที่เกิดกลไกการระเหยของความชื้นเป็นหลัก ซึ่งเมื่อกะลาปาล์มยังมีความชื้นสูงอยู่จึงทำให้สารระเหยถูกกำจัดออกไปได้น้อย และเมื่อระยะเวลาในปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณความชื้นค่อย ๆ ลดลง จึงทำให้สารระเหยมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะพบว่าในช่วง 50 – 300 วินาที ปริมาณสารระเหยจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อ

ระยะเวลามากกว่า 300 วินาที ปริมาณสารระเหยจะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งเป็นผลจากในช่วงแรกจะเป็นการระเหยของความชื้น ซึ่งเมื่อความชื้นลดลงจึงส่งผลให้ปริมาณสารระเหยเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณความชื้นเหลือน้อยลงจึงเป็นขั้นตอนของการที่สารระเหยจะระเหยออกจากกะลาปาล์ม และเมื่อเกิดการระเหยมากขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณสารระเหยที่เหลืออยู่ในกะลาปาล์มมีปริมาณลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Longo *et al.*, 2022) ส่วนปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ และระยะเวลาที่กะลาปาล์มอยู่ในปฏิกรณ์ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิ และระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นผลจากการลดลงของปริมาณความชื้น และปริมาณสารระเหย ซึ่ง (Gao *et al.*, 2022) ได้อธิบายว่าอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส แต่ในขณะเดียวกันก็จะทำให้ปริมาณลิกนินที่เสถียรมีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุจะพบว่าปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจนจะมีค่าเท่ากับ 57.659% 5.309% 34.860% <0.01% และ 0.424% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุต่าง ๆ ของกะลาปาล์ม จะพบว่า ทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มจะมีปริมาณธาตุคาร์บอน และไนโตรเจนมากกว่า ในขณะที่ปริมาณธาตุไฮโดรเจน และออกซิเจนจะลดลง ซึ่งเป็นผลจากการสูญเสียความชื้น และสารระเหย และการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส

ค่าความร้อน (Heating value) ของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มจะพบว่ามีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของกะลาปาล์ม ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการทอร์รีแฟคชันจะสามารถช่วยให้ค่าความร้อนของกะลาปาล์มสูงขึ้นได้ โดยเมื่อสภาวะที่ใช้ในการทอร์รีแฟคชันมีอุณหภูมิ และระยะเวลาที่อยู่ในปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความร้อนของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มสูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากความชื้น และสารระเหยมีปริมาณน้อยลง ประกอบกับมีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้น อีกทั้งในขณะที่อยู่ในปฏิกรณ์ยังเกิดการสลายตัวของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสอีกด้วย จาก Figure 6 จะเห็นว่าทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มที่อุณหภูมิ 200 °C จะมีค่าความร้อนต่ำสุด และที่อุณหภูมิ 300 °C จะมีค่าความร้อนสูงสุด ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากกระบวนการ volatilization และ depolymerization สามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มสูงขึ้น และปริมาณออกซิเจนที่ลดลงของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น อีกทั้งเมื่อเกิดการสลายตัวของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้มีปริมาณลิกนินในทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มมากขึ้น ซึ่งปริมาณลิกนินก็มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนด้วยเช่นกัน โดยผลการวิจัยพบว่ากระบวนการทอร์รีแฟคชันจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของกะลาปาล์มจึงทำให้ค่าความร้อนมีค่าสูงขึ้น (Gajera *et al.*, 2022)

Energy-mass co-benefit index (EMCI) คือ ผลต่างระหว่างร้อยละผลได้ของพลังงานกับร้อยละผลได้เชิงมวลของเชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งควรจะมีค่ามากกว่า 10 (Devaraja *et al.*, 2022) และถูกใช้เป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงสภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนากะลาปาล์มเป็นเชื้อเพลิงแท่งด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ค่า EMCI ของกะลาปาล์มเป็นดังแสดงใน Figure 7 โดยค่าของ EMCI จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ และระยะเวลาในปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น ซึ่งค่ามากสุดจะอยู่ที่อุณหภูมิ 260 °C ที่ระยะเวลาในปฏิกรณ์ 500 วินาที จะให้ค่า EMCI เท่ากับ 11.5 ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิ และระยะเวลาต่ำกว่านี้จะส่งผลให้ร้อยละผลได้ของพลังงานมีค่าต่ำ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นและสารระเหยอยู่สูง แต่เมื่อใช้อุณหภูมิ และ

ระยะเวลาสูงกว่านี้จะส่งผลให้ร้อยละผลได้เชิงมวลของเชื้อเพลิงแข็งมีค่าต่ำ ซึ่งเป็นผลจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบของกะลาปาล์ม

การวิเคราะห์ความเสถียรต่อความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม

การสลายตัวของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม เป็นดังแสดงใน Figure 8 โดยการสูญเสียน้ำหนักของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนเหมือนรูปแบบการสลายตัวของชีวมวลทั่วไป โดยการสลายตัวของกะลาปาล์ม ในขั้นตอนที่ 1 จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 30.70 – 250.22 °C ขั้นตอนที่ 2 จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 250.22 – 527.74 °C และขั้นตอนที่ 3 จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 527.74 – 990.73 °C ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Chantanumat *et al.*, 2022) และการสลายตัวของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม ในขั้นตอนที่ 1 จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 30.49 – 250.94 °C ขั้นตอนที่ 2 จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 250.94 – 497.74 °C และขั้นตอนที่ 3 จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 497.74 – 990.31 °C โดยเมื่อพิจารณา peak ที่ปรากฏบนกราฟ DTG จะพบว่า peak แรกจะแสดงถึงการระเหยของน้ำ และสอง peak ถัดมาจะแสดงการเกิดปฏิกิริยา devolatilization และ combustion ขององค์ประกอบที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งเป็นการแสดงว่าที่อุณหภูมิในช่วงที่ peak ปรากฏจะมีอัตราการสลายตัวขององค์ประกอบสูง (Junga *et al.*, 2020) อีกทั้งเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การสลายตัวในขั้นตอนที่ 1 2 และ 3 ของกะลาปาล์ม จะมีค่าเท่ากับ 8.25% 64.93% และ 6.78% และเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม จะมีค่าเท่ากับ 6.20% 52.14% และ 11.74% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากะลาปาล์มจะมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักในขั้นตอนที่ 1 และ 2 มากกว่าทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม แต่ทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มจะมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักในขั้นตอนที่ 3 มากกว่ากะลาปาล์ม ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบของกะลาปาล์มเกิดการสลายตัวในขั้นตอนของกระบวนการทอร์รีแฟคชัน จึงทำให้เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มมีปริมาณน้อยกว่าในกะลาปาล์ม

การวิเคราะห์โครงสร้างบริเวณพื้นผิวของกะลาปาล์มน้ำมัน และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม

ลักษณะโครงสร้างที่วิเคราะห์ด้วย SEM ของกะลาปาล์ม และทอร์รีไฟด์กะลาปาล์ม เป็นดังแสดงใน Figure 9, 10 เมื่อพิจารณาพื้นผิวของกะลาปาล์มจะพบว่ามีลักษณะเป็นเส้นใยมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มมีความเรียบของพื้นผิวมากกว่า และเมื่อพิจารณาความเป็นรูพรุนของพื้นผิวจะพบว่าทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มจะมีรูพรุนที่ชัดเจนกว่ากะลาปาล์ม ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนของกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่ทำให้เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสที่มีอยู่บนพื้นผิวของกะลาปาล์ม ซึ่งการจะเกิดการสลายตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชัน (degree of torrefaction) และรูพรุนที่เพิ่มขึ้นของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มนั้นจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว ซึ่งจะช่วยให้ใช้พลังงานในการบดย่อยน้อยกว่ากะลาปาล์ม

สรุปผลการวิจัย

การศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันของกะลาปาล์มเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงโดยใช้ปฏิกรณ์ลำเลียงแบบสกรู ซึ่งประกอบด้วยส่วนของการระเหยความชื้น และส่วนของกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มได้แก่ อุณหภูมิ (200 – 300 °C) และเวลาที่อยู่ในปฏิกรณ์ (50 – 500 วินาที) ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาที่กะลาปาล์มอยู่ในปฏิกรณ์จะส่งผลให้สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของ

กะลาปาล์มดีขึ้น นั่นคือ ปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลง ในขณะที่ปริมาณเถ้า และคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ Heating value มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 16.075 – 19.713 MJ/kg อีกทั้งยังส่งผลให้ดัชนีความรุนแรงของการทำทอร์รีแฟคชันเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละผลได้เชิงมวลของทอร์รีไฟด์กะลาปาล์มมีค่าลดลง โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชันของกะลาปาล์ม จะกำหนดโดยค่า EMCI ที่มากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา 500 วินาที ดังนั้นปฏิกรณ์ลำเลียงแบบสกรูที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นจึงสามารถนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของวัสดุเหลือทิ้งจากกะลาปาล์มได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรมแห่งชาติ โดยมหาวิทยาลัยทักษิณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565

เอกสารอ้างอิง

Abdulyekeen, K.A., Daud, W.M.A.W., Patah, M.F.A. & Abnisa, F. (2023). Torrefaction of municipal solid waste to enhanced hydrophobic solid fuel: parametric optimisation and optimised torrefied solid products characterisation, grindability, and pyrolysis behaviour. *Biomass Conversion and Biorefnery,* 1-18.

Ahmad, R., Ahmad, A.G., Mohammed, S.A., Wan Ahmad, W.A.M., Vijean, V., Santiagoo, R., Ibrahim, N.R. & Udin, N. (2023). Influence of Torrefaction on Sewage Sludge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1135*(1), 012036.

Bampenrat, A., Sukkathanyawat, H. & Jarunglumlert, T. *(*2023*).* Agro-industrial Waste Upgrading via Torrefaction Process – A Case Study on Sugarcane Bagasse and Palm Kernel Shell in Thailand*. Journal of Ecological Engineering, 24*(3), 64-75.

Chantanumat, Y., Phetwarotai, W., Sangthong, S., Palamanit, A., Abu Bakar, M.S., Cheirsilp, B. & Phusunti, N. (2022). Characterization of bio-oil and biochar from slow pyrolysis of oil palm plantation and palm oil mill wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery, 13,* 13813-13825.

Chen, D., Cen, K., Gan, Z., Zhuang, X. & Ba, Y. (2022a). Comparative study of electric-heating torrefaction and solar-driven torrefaction of biomass: Characterization of property variation and energy usage with torrefaction severity. *Applications in Energy and Combustion Science, 9,* 100051.

Chen, W.-H., Aniza, R., Arpia, A.A., Lo, H.-J., Hoang, A.T., Goodarzi, V. & Gao, J. (2022b). A comparative analysis of biomass torrefaction severity index prediction from machine learning. *Applied Energy, 324,* 119689.

Devaraja, U.M.A., Senadheera, S.S. & Gunarathne, D.S. (2022). Torrefaction severity and performance of Rubberwood and Gliricidia. *Renewable Energy, 195,* 1341-1353.

Doddapaneni, T.R.K.C., Pärn, L. & Kikas, T. (2022). Torrefaction of Pulp Industry Sludge to Enhance Its Fuel Characteristics. *Energies, 15*(17), 6175.

Gajera, B., Tyagi, U., Sarma, A.K. & Jha, M.K. (2022). Impact of torrefaction on thermal behavior of wheat straw and groundnut stalk biomass: Kinetic and thermodynamic study. *Fuel Communications, 12,* 100073.

Gan, M.J., Lim, W.S., Ng, H.X., Ong, M.H., Gan, S., Lee, L.Y. & Thangalazhy-Gopakumar, S. *(*2019*).* Enhancement of Palm Kernel Shell Fuel Properties via Wet Torrefaction*:* Response Surface, Optimization, and Combustion Studies*. Energy&fuels, 33,* 11009-11202.

Gao, X., Zhou, Z., Coward, B., Wang, J., Tian, H., Yin, Y. & Cheng, Y. (2022). Improvement of wheat (T. aestivum) straw catalytic fast pyrolysis for valuable chemicals production by coupling pretreatment of acid washing and torrefaction. *Industrial Crops and Products, 187,* 115475.

Granado, M.P.P., Gadelha, A.M.T., Rodrigues, D.S., Antonio, G.C. & De Conti, A.C. (2023). Effect of torrefaction on the properties of briquettes produced from agricultural waste. *Bioresource Technology Reports, 21,* 101340.

Hasan, M.F., Omar, M.S., Sukiran, M.A., Nyakuma, B.B. & Muhamad Said, M.F. (2022). Torrefaction of fibrous empty fruit bunch under mild pressurization technique. *Renewable Energy, 194,* 349-358.

Jezerska, L., Sassmanova, V., Prokes, R. & Gelnar, D. (2023). The pelletization and torrefaction of coffee grounds, garden chaff and rapeseed straw. *Renewable Energy, 210,* 346-354.

Jifara Daba, B. & Mekuria Hailegiorgis, S. (2023). Torrefaction of corncob and khat stem biomass to enhance the energy content of the solid biomass and parametric optimization. *Bioresource Technology Reports, 21,* 101381.

Junga, R., Pospolita, J. & Niemiec, P. (2020). Combustion and grindability characteristics of palm kernel shells torrefied in a pilot-scale installation. *Renewable Energy, 147,* 1239-1250.

Karelius, Dirgantara, M., Rumbang, N., Suastika, K.G. & Akbar, A.R.M. *(*2020*).* Torrefaction of palm kernel shell using COMB method and its physicochemical properties*. Journal of Physics: Conference Series, 1422,* 1-7*.*

Krysanova, K., Krylova, A., Kulikova, M., Kulikov, A. & Rusakova, O. (2022). Biochar characteristics produced via hydrothermal carbonization and torrefaction of peat and sawdust. *Fuel, 328,* 125220*.*

Lokmit, C., Nakason, K., Kuboon, S., Jiratanachotikul, A. & Panyapinyopol, B. (2023). A comparison of char fuel properties derived from dry and wet torrefaction of oil palm leaf and its techno-economic feasibility. *Materials Science for Energy Technologies, 6,* 192-204*.*

Longo, A., Nobre, C., Sen, A., Panizio, R., Brito, P. & Gonçalves, M. (2022). Torrefaction Upgrading of Heterogenous Wastes Containing Cork and Chlorinated Polymers. *Environments*, *9*(8), 1-21.

Nebyvaev, A.V., Milovanov, O.Yu., Klimov, D.V., Kuz'min, S.N., Ryzhenkov, A.V., Dubina, V.A. & Zavizhenets, R.V. (2023). Studying the Sunflower Husk Ash Properties after Husk Treatment Using Various Torrefaction Methods. *Thermal Engineering, 70(4),* 290-298.

Orisaleye, J.I., Jekayinfa, S.O., Pecenka, R., Ogundare, A.A., Akinseloyin, M.O. & Fadipe, O.L. (2022). Investigation of the Effects of Torrefaction Temperature and Residence Time on the Fuel Quality of Corncobs in a Fixed-Bed Reactor. *Energies, 15,* 5284.

Piersa, P., Unyay, H., Szufa, S., Lewandowska, W., Modrzewski, R., Slezak, R. & Ledakowicz, S. (2022). An Extensive Review and Comparison of Modern Biomass Torrefaction Reactors vs. Biomass Pyrolysis—Part 1. *energies, 15*(6), 1-34.

Sarker, T.R., Azargohar, R., Stobbs, J., Karunakaran, C., Meda, V. & Dalai, A.K. (2022). Complementary effects of torrefaction and pelletization for the production of fuel pellets from agricultural residues: A comparative study. *Industrial Crops and Products, 181,* 114740*.*

Sarker, T.R., Nanda, S., Dalai, A.K. & Meda, V. (2021a). A Review of Torrefaction Technology for Upgrading Lignocellulosic Biomass to Solid Biofuels. *BioEnergy Research, 14*(2), 645-669.

Sarker, T.R., Azargohar, R., Dalai, A.K. & Meda, V. *(*2021b*).* Enhancement of fuel and physicochemical properties of canola residues via microwave torrefaction*. Energy Reports, 7,* 6338-6353*.*

Slezak, R., Unyay, H., Szufa, S. & Ledakowicz, S. *(2023).* An Extensive Review and Comparison of Modern Biomass Reactors Torrefaction vs. Biomass Pyrolizers—Part 2. *energies, 16*(5), 1-25.

Soponpongpipat, N., Nanetoe, S. & Comsawang, P. *(2020).* Thermal and Torrefaction Characteristics of a Small-Scale Rotating Drum Reactor. *Processes, 8,* 489.

Tumuluru, J.S., Ghiasi, B., Soelberg, N.R. & Sokhansanj, S. *(2021).* Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts. *Frontiers in Energy Research, 9,* 728140.

Waheed, A., Naqvi, S.R. & Ali, I. (2022). Co-Torrefaction Progress of Biomass Residue/Waste Obtained for High-Value Bio-Solid Products. *Energies, 15*(21), 8297.

Zhang, C., Ho, S.-H., Chen, W.-H., Xie, Y., Liu, Z. & Chang, J.-S. (2018). Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index. *Applied Energy, 220,* 598-604.