การปรับปรุงสมบัติของเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟคชันเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง

นางสาวณัฐวรรณ เสาแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การปรับปรุงสมบัติของเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟคชันเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง

นางสาวณัฐวรรณ เสาแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงร่างวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การปรับปรุงสมบัติของเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟคชันเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง

โดย นางสาวณัฐวรรณ เสาแก้ว

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

(ศาสตราจารย์ ดร.ธานินทร์ ศิลป์จารุ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นคร วรสุวรรณรักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพาชัย เจษฎาเจิม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนฤดี ผ่องอักษร)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิชัย สียางนอก)

ชื่อ : นางสาวณัฐวรรณ เสาแก้ว
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การปรับปรุงสมบัติของเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟคชันเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง
สาขาวิชา : เคมีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพาชัย เจษฎาเจิม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.มนฤดี ผ่องอักษร
ปีการศึกษา : 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันและความเป็นเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์จากเปลือกทุเรียน โดยศึกษาอุณหภูมิในช่วง 220 – 300 °C ระยะเวลาในการทอร์รีแฟกชัน คือ 30 นาที ความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สตัวกลาง คือ 0%, 5%, 10%, 15% และ 21% นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบระหว่างทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำและไม่ล้างเพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ที่อาจส่งผลต่อสมบัติเชื้อเพลิงและความชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและออกซิเจนในแก๊สตัวกลางช่วยเร่งการสลายตัวขององค์ประกอบอินทรีย์ในเปลือกทุเรียน เนื่องจากร้อยละผลได้เชิงมวลที่ลดลง ในขณะที่ร้อยละคาร์บอนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 300 °C และความเข้มข้นออกซิเจน 21% ซึ่งผลิตภัณฑ์มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนสูงถึง 78.82 และค่าความร้อนสูงสุด 35.21 MJ/kg การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและแผนภาพ Van Krevelen ยืนยันว่ากระบวนการดังกล่าวส่งผลให้ค่าความเป็นเชื้อเพลิงดีขึ้นผ่านปฏิกิริยา dehydration และ decarboxylation ซึ่งลดค่า H/C และ O/C ของผลิตภัณฑ์ลง เมื่อวิเคราะห์ความไม่ชอบน้ำด้วยเทคนิคมุมสัมผัส (Contract angle) และความชื้นสมดุล (EMC) ที่ 55% ของผลิตภัณฑ์พบว่า ความไม่ชอบน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางในการทอรีไฟด์มากขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 260 °C และปริมาณออกซิเจนร้อยละ 10 แต่ความไม่ชอบน้ำลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 280 °C โดยที่มุมสัมผัสจะลดลงตั้งแต่ปริมาณออกซิเจนที่ 5% แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์มีความชอบน้ำมากขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR และ XPS การเพิ่มออกซิเจนในกระบวนการมีผลทำให้หมู่ไฮดรอกซิล และคาร์บอกซิลิกเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 280°C และปริมาณออกซิเจน 10% ซึ่งการเพิ่มการเพิ่มขึ้นของกลุ่มคาร์บอกซิลิคอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความไม่ชอบน้ำลดลง อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 300°C ในทุกสภาวะความเข้มข้นของอากาศ แต่ผลิตภัณฑ์ก็มีความไม่ชอบน้ำลดลง ซึ่งพฤติกรรมนี้สอดคล้องกับที่พบในไบโอชาร์ ในส่วนของการล้างน้ำก่อน

กระบวนการที่อุณหภูมิ 300 °C ทุกความเข้นข้นของออกซิเจน พบว่าสามารถลดปริมาณขี้เถ้าได้ถึง 4–5 เท่า ช่วยลดปริมาณธาตุหรือสารอนินทรีย์ที่มีคุณสมบัติดูดความชื้น เช่น K, Ca, Mg และ Na ทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความชื้นสมดุลดลง และค่ามุมสัมผัสสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ดีขึ้น สรุปได้ว่า การควบคุมอุณหภูมิ ความเข้มข้นของอากาศ และการล้างน้ำก่อนกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ สามารถยกระดับคุณภาพของเปลือกทุเรียนให้เหมาะสมต่อการเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(มีจำนวนทั้งสิ้น xx หน้า)

คำสำคัญ : เปลือกทุเรียน ออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน ความไม่ชอบน้ำ ขี้เถ้า

_____ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

_____

Name : Miss Nuttawan Soukaew
Thesis Title : The Enhancement of Durian Peel Properties by Oxidative Torrefaction Process for Solid Fuel Production
Major Field : Industrial Chemistry
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Supachai Jadsadajerm, Ph.D.
Co-Advisor : Associate Professor Monrudee Phongaksorn, Ph.D.
Academic Year : 2025

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอังกฤษ

ABSTRACT

This study aimed to investigate the effects of oxidative torrefaction on fuel properties of torrefied products from durian peel. The experiments were conducted at temperatures ranging from 220 to 300°C, with a torrefaction duration of 30 minutes, under varying oxygen concentrations in the carrier gas (0%, 5%, 10%, 15%, and 21%). Additionally, the research compared the torrefied products from durian peel and ash-reduced durian peel by water washing, aiming to remove inorganic substances that could affect fuel characteristics and hydrophobicity of the resulting products. It revealed that increasing temperature and oxygen concentration accelerated the decomposition of organic components in the durian peel, as indicated by decreased mass yield and increased carbon content. Particularly at 300 °C with 21 % oxygen, the carbon content increased as high as to 78.82 % and had the higher heating value (HHV) of 35.21 MJ/kg. Elemental analysis and Van Krevelen diagrams confirmed that the oxidative torrefaction improved fuel properties through dehydration and decarboxylation reactions, which reduced the H/C and O/C ratios of the products. Analysis of hydrophobicity using contact angle measurements and equilibrium moisture content (EMC) at 55% relative humidity showed that hydrophobicity increased with higher temperature and oxygen concentration during torrefaction, notably at 260 °C and 10 % oxygen. However,

hydrophobicity decreased when the temperature increased to 280 °C, evident from the reduced contact angle at oxygen concentrations starting from 5%, indicating increased hydrophilicity. FTIR and XPS analyses showed increased hydroxyl and carboxylic functional groups at elevated oxygen concentrations, particularly at 280 °C with 10 % oxygen. The increase in carboxylic groups might be responsible for the observed reduction in hydrophobicity. However, at 300°C, under all tested oxygen concentrations, products displayed reduced hydrophobicity, aligning with behaviors typically observed in biochar. Pre-torrefaction water leaching at 300 °C across all oxygen levels effectively decreased ash content by 4–5 times, reducing hygroscopic inorganic elements (such as K, Ca, Mg, and Na). This resulted in lower equilibrium moisture content and higher contact angles, indicating improved hydrophobic properties. In conclusion, temperature control, oxygen concentration, and water leaching prior to oxidative torrefaction significantly influenced the fuel characteristics of the durian peel-derived products, efficiently enhancing their suitability as biomass fuel.

(Total xx Pages)

Keywords: Durian peel, Oxidative torrefaction, Hydrophobicity, Ash

_____ Advisor

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพาชัย เจษฎาเจิม อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ช่วยให้ข้อมูล รวมทั้งชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย ให้ความช่วยเหลือทางด้านความรู้ทางวิชาการ กระบวนการคิดตลอดจนสละเวลาอันมีค่าตรวจสอบความถูกต้องของงานผู้วิจัยด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง และได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้และความช่วยเหลือด้านต่างๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณในความกรุณาของผู้ที่ได้กล่าวถึงและผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ที่มีส่วนช่วยเหลือในการสนับสนุนด้วยดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านด้วยความจริงใจ ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจ และเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ณัฐวรรณ เสาแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ
กิตติกรรมประกาศ ..... ซ
สารบัญ ..... ฌ
สารบัญตาราง ..... ฏ
สารบัญรูปภาพ ..... ฑ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 พลังงานชีวมวล 5
2.2 เปลือกทุเรียน 6
2.3 กระบวนการทอร์รีแฟกชัน (Torrefaction) 9
2.4 กระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน 13
2.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ 25

3.1 เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ 25
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....26
3.3 การวิเคราะห์สมบัติด้านเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์.....28
บทที่ 4 ผลการทดลอง..... 32
4.1 ผลการศึกษาสีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน.....32
4.2 ผลการศึกษาร้อยละผลได้เชิงมวล 34
4.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ 35
4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของธาตุ.....36
4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง 40
4.6 ผลการวิเคราะห์แผนภาพของ Van Krevelen 41
4.7 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน 42
4.8 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ 44
4.9 ผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้เชิงมวล Energy yield และ Carbon yield.....48
4.11 ผลการวิเคราะห์มุมสัมผัส (Contact angle) 49
4.12 ผลการวิเคราะห์หาความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC) ..53
4.13 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดย FTIR.....54
4.14 การศึกษาการกำจัดปริมาณขี้เถ้าด้วยการล้างน้ำ (Water washing of durian peel).....58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... 73
5.1 สรุปผลการทดลอง.....73
5.2 ข้อเสนอแนะ 74
บรรณานุกรม 75

ภาคผนวก ก อิทธิพลของระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน 85

ภาคผนวก ข อิทธิพลของอุณหภูมิและร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน 87

ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน 90

ประวัติผู้เขียน 93

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3-1 สัดส่วนอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนในแก๊สผสมภายในระบบทอร์รีแฟกชัน.....28

ตารางที่ 4-1 สีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 -300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 0 15 และ 30 นาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน.....32

ตารางที่ 4-2 สีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 -300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาทีภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ.....33

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่างๆ 39

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่าง ๆ 47

ตารางที่ 4-5 ปริมาณขี้เถ้าผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้าง ที่อุณหภูมิ 300 °C ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ.....59

ตารางที่ 4-6 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุภายในขี้เถ้าของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ 60

ตารางที่ ก-1 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่เวลาต่างๆ 85

ตารางที่ ข-1 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่างๆ.....87

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่างๆ 90

ตารางที่ ค-2 ค่า ENERGY YIELD และ CARBON YIELD ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่าง ๆ 91

ตารางที่ ค-3 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่าง ๆ 92

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1 แสดงองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของมวลชีวภาพ และผนังเซลล์ของพืช [19].....5
ภาพที่ 2-2 ลักษณะของเปลือกทุเรียน [21].....8
ภาพที่ 2-3 แสดงผลของการทำทอร์รีแฟกชันต่อโครงสร้างของชีวมวล [26].....10
ภาพที่ 2-4 สมบัติของชีวมวลก่อนและกระบวนการทอร์รีแฟกชัน.....11
ภาพที่ 2-5 แผนภาพ VAN KREVELEN ของถ่านหิน [41].....19
ภาพที่ 2-6 หลักการทำงานของเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี [42].....21
ภาพที่ 2-7 หลักการของ X-RAY FLUORESCENCE [43].....21
ภาพที่ 2-8 มุมสัมผัสสามารถจำแนกสมบัติของวัสดุ [45].....23
ภาพที่ 3-1 TORREFACTION HORIZONTAL TUBE REACTOR.....25
ภาพที่ 3-2 เปลือกทุเรียนอบแห้ง.....26
ภาพที่ 3-3 เปลือกทุเรียน (A) ขนาดประมาณ 5×5 เซนติเมตร (B) ขนาดอนุภาค 250 ไมโครเมตร.....26
ภาพที่ 4-1 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 0 15 และ 30 นาที ภายใต้ในสภาวะไนโตรเจน.....34
ภาพที่ 4-2 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ .35
ภาพที่ 4-3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเปลือกทุเรียนและผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนร้อยละ 0 และ 21 36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4-4 ปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (A) 220 °C (B) 240 °C (C) 260 °C (D) 280 °C และ (E) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ 38

ภาพที่ 4-5 ค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ .40

ภาพที่ 4-6 แผนภาพ VAN KREVELEN ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ 42

ภาพที่ 4-7 การสลายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (A) 220 °C (B) 240 °C (C) 260 °C (D) 280 °C และ (E) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ 44

ภาพที่ 4-8 การวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (A) 220 °C (B) 240 °C (C) 260 °C (D) 280 °C และ (E) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ.....46

ภาพที่ 4-9 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้เชิงมวล ENERGY YIELD และ CARBON YIELD ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (A) 220 °C (B) 240 °C (C) 260 °C (D) 280 °C และ (E) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ 49

ภาพที่ 4-10 การวิเคราะห์มุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (A) 220 °C (B) 240 °C (C) 260 °C (D) 280 °C และ (E) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ.....50

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4-11 การวิเคราะห์มุมสัมผัสของเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน.....50

ภาพที่ 4-12 การวิเคราะห์มุมสัมผัสที่เวลา 20 วินาทีของของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่สภาวะไนโตรเจน.....51

ภาพที่ 4-13 การวิเคราะห์มุมสัมผัสที่เวลา 20 วินาทีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (A) 220 °C (B) 240 °C (C) 260 °C (D) 280 °C และ (E) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ 53

ภาพที่ 4-14 ความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ความชื้นสมดุลและมุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (A) 220 °C (B) 240 °C (C) 260 °C (D) 280 °C และ (E) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ.....54

ภาพที่ 4-15 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน.....55

ภาพที่ 4-16 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (A) 220 °C (B) 240 °C (C) 260 °C (D) 280 °C และ (E) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ.....56

ภาพที่ 4-17 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน (A) ร้อยละ 0 (B) ร้อยละ 5 (C) ร้อยละ 10 (D) ร้อยละ 15 และ (E) ร้อยละ 21 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ.....57

ภาพที่ 4-18 ความสัมพันธ์ของร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ.....61

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4-19 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเปลือกทุเรียนและผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนร้อยละ 0 และ 21 62

ภาพที่ 4-20 ปริมาณองค์ประกอบของ (A) เปลือกทุเรียน (B) ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำ (C) ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ 63

ภาพที่ 4-21 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ.....64

ภาพที่ 4-22 การสลายตัวทางความร้อนของของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและล้างด้วยน้ำ (A) 220 °C (B) 240 °C (C) 260 °C (D) 280 °C และ (E) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ 65

ภาพที่ 4-23 การวิเคราะห์แบบประมาณ (A) เปลือกทุเรียน (B) ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำ (C) ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ.....66

ภาพที่ 4-24 สเปกตรัม XPS ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนในย่านพลังงานของ C1S 67

ภาพที่ 4-25 สเปกตรัม XPS ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนในย่านพลังงานของ C1S 67

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4-26 สเปกตรัม XPS ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนในย่านพลังงานของ O1s.....68
ภาพที่ 4-27 สเปกตรัม XPS ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนในย่านพลังงานของ O1s.....68
ภาพที่ 4-28 การวิเคราะห์มุมสัมผัสที่เวลา 20 วินาทีของเปลือกทุเรียนเมื่อระยะเวลาผ่านไป 20 วินาที 69
ภาพที่ 4-29 การวิเคราะห์มุมสัมผัสที่เวลา 20 วินาทีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนผ่านการล้างด้วยน้ำที่ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ เมื่อผ่านระยะเวลา 20 วินาที.....70
ภาพที่ 4-30 ความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ความชื้นสมดุลและมุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนก่อนและหลังล้างน้ำที่ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ.....71
ภาพที่ 4-31 ความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ความชื้นสมดุลและปริมาณเถ้าของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ก่อนและหลังล้างน้ำที่ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ 72

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศก่อให้เกิดความเสี่ยงมากมายต่อสังคม สุขภาพ ความเป็นอยู่ที่ดีของมนุษย์ เศรษฐกิจ และความหลากหลายทางชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีศักยภาพในการปรับเปลี่ยนรูปแบบการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และเปลี่ยนแปลงการกระจายทรัพยากรภายในและระหว่างประเทศและภูมิภาค เพื่อตอบสนองต่อปัญหาเหล่านี้ ประเทศต่างๆมากมาย รวมถึงประเทศไทย [1] มีนโยบายเพื่อขับเคลื่อนประเทศไทยสู่สังคมคาร์บอนต่ำ เรียกว่า ยุทธศาสตร์การขับเคลื่อนการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพ-เศรษฐหมุนเวียน-เศรษฐกิจสีเขียว (Bio-Circular-Green Economy: BCG) ของไทย พ.ศ. 2564-2569 เศรษฐกิจ BCG ประกอบด้วยหลักการที่เกี่ยวข้องกันสามประการ ได้แก่ ด้านชีวภาพ คือ การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรและกระบวนการทางชีวภาพอย่างยั่งยืน โดยเน้นการใช้ชีวมวลและผลิตภัณฑ์จากชีวภาพ ด้านการหมุนเวียน คือ ลดของเหลือทิ้งให้เหลือน้อยที่สุดและปรับการใช้ทรัพยากรให้เหมาะสมที่สุด และด้านสีเขียว คือ เน้นที่การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนแนวทางปฏิบัติที่ยั่งยืน [2] ด้วยหลักการทั้งหมดนี้ การใช้ของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรหรือพลังงานชีวมวลเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลังงานชีวภาพจากพลังงานหมุนเวียนเพื่อความยั่งยืนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ในเวลาเดียวกัน [3]

ทุเรียนเป็นผลไม้เขตร้อนที่ได้รับความนิยมจากรสชาติและกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ ทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น และก่อให้เกิดขยะทางเกษตรกรรมจำนวนมากในรูปแบบของเปลือก เนื่องจากจะถูกทิ้งหลังจากการค้าขายและหลังการบริโภคทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม [4] เปลือกทุเรียนจึงนับเป็นชีวมวลอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งขยะจากเปลือกทุเรียนมีความแข็ง มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก จึงไม่สามารถย่อยสลายได้ง่ายโดยธรรมชาติ ดังนั้น ในช่วงของฤดูผลไม้ปริมาณขยะจะเพิ่มขึ้น [5] แต่ขยะจากเปลือกทุเรียนสามารถแปลงเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจได้ เนื่องจากเปลือกทุเรียนมีเซลลูโลสในระดับสูง (50–60%) ลิกนิน 5% และแป้ง 5% [6] ซึ่งปริมาณเซลลูโลสนั้นเป็นแหล่งกำเนิดธาตุคาร์บอน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความร้อนด้วย ดังนั้น เมื่อมีเซลลูโลสในเปลือกทุเรียนมากพอ จะสามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนจนผลิตค่าความร้อนสูง [7] นอกจากนี้ชีวมวลทางการเกษตรที่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงยังมีปัญหาและข้อกำจัดในการใช้เป็นพลังงานอยู่หลายประการ ได้แก่ มีปริมาณความชื้นสูง มีปริมาณออกซิเจนสูง ความหนาแน่นของพลังงานต่ำ ความยากลำบากในการเปลี่ยนเป็นอนุภาคขนาดเล็ก การขนส่งที่มีราคาแพง และความไม่เสถียรทางความร้อนซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนออกซิเจน/คาร์บอน (O/C) ที่สูง ทำให้เป็นปัญหาในการเตรียมชีวมวลเพื่อใช้ผลิตเป็น

พลังงานและมีประสิทธิภาพการเผาไหม้น้อยเมื่อเทียบกับถ่านหิน ดังนั้น จึงต้องปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของชีวมวลเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น [8][9]

การทอร์รีแฟกชันภายใต้สภาวะออกซิเจน หรือ สภาวะที่มีออกซิเจนบางส่วน มีอีกชื่อหนึ่งว่า ออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน (Oxidative torrefaction) เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลโดยใช้กระบวนการทางความร้อนเคมี อาจใช้ก๊าซออกซิไดส์ (Oxidizing gases) เป็นก๊าซตัวกลาง เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนออกไซด์หรือออกซิเจน โดยเป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนเคมีของชีวมวลที่ช่วงอุณหภูมิต่ำประมาณ 200-300°C และอัตราการให้ความร้อนจะต้องน้อยกว่า 50 °C /min [10] ชีวมวลที่ผ่านการทอร์รีแฟกชันแบบใช้ออกซิเจนจะถูกเผาพร้อมกับสารระเหยที่เกิดขึ้นในกระบวนการทางความร้อน และทำให้ลดการใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาการใช้ออกซิเจนในชีวมวลบางชนิด เช่น ซังข้าวโพด [11] สาหร่าย [12] ยูคาลิปตัส [13] เปลือกวอลนัท [14] และไผ่ [15] เป็นต้น สามารถเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลได้โดยที่ไม่ทำให้เกิดการลุกติดไฟหรือการเผาไหม้ (Combustion) นอกจากนี้การนำออกซิเจนไปใช้เป็นก๊าซตัวกลางยังมีต้นทุนที่ต่ำ สามารถลดอุณหภูมิในการดำเนินการได้ ซึ่งจะลดต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างมาก [16]

ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ได้จะมีสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น แต่จากงานวิจัยของ Zhao และคณะ [17] พบว่า เมื่อใช้ปริมาณออกซิเจนในก๊าซตัวกลางที่สูงเกินไป จะทำให้สมบัติความไม่ชอบน้ำลดน้อยลง คาดว่าเป็นผลมาจากปริมาณขี้เถ้าหรือสารอนินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นหลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันภายใต้สภาวะออกซิเจน เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว ธาตุที่มักจะอยู่ในเถ้าของชีวมวล ได้แก่ Al, Ca, Cl, Fe, K, Mg, P, Na, S, Mn, Si และ Ti ซึ่งเป็นธาตุที่อยู่ในเปลือกทุเรียนเช่นกัน และธาตุเหล่านี้มีส่วนทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น แร่ธาตุหรือเฟสของธาตุที่ก่อให้เกิดเถ้าบางชนิดอาจทำให้เกิดการระเหยและการก่อตัวของส่วนประกอบที่เป็นอันตรายจำนวนมากเพิ่มขึ้น การปล่อยฝุ่นละอองเพิ่มขึ้น และปริมาณของธาตุที่ละลายน้ำได้สูง [18]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเปลือกทุเรียนให้มีคุณภาพสูงเทียบเคียงกับเชื้อเพลิงฟอสซิลด้วยกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน เพื่อทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สตัวกลาง อุณหภูมิ และเวลา ต่อร้อยละผลได้และคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ค่าคาร์บอนคงตัว หมู่ฟังก์ชัน ค่าความร้อน องค์ประกอบของขี้เถ้า ปริมาณคาร์บอนและออกซิเจน และรวมถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำ ได้แก่ ความชื้นสมดุล และมุมสัมผัส นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าต่อความไม่ชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ทอริไฟด์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นแนวทางในการสนับสนุนการใช้ชีวมวลเป็นพลังงานทางเลือก เพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร และช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย นอกจากนี้ ไม่เพียงแต่มีประโยชน์ในการพัฒนาเทคโนโลยีการใช้ชีวมวลจากเปลือกทุเรียน แต่ยังตอบสนองต่อปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืนทางเศรษฐกิจ โดยเชื่อมโยงกับแนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจ

Bio-Circular-Green (BCG) ของไทย ซึ่งเน้นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน โดยไม่เพียงแต่ช่วยลดปริมาณขยะเกษตร แต่ยังเพิ่มคุณค่าของวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรเป็นพลังงานชีวมวลที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง การพัฒนานี้ยังช่วยสร้างความมั่นคงด้านพลังงานในประเทศและส่งเสริมการประหยัดทรัพยากรในระยะยาว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันของเปลือกทุเรียน
2. ศึกษาอิทธิพลผลของเวลา อุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนต่อร้อยละผลได้และสมบัติทางเคมีของความเป็นเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน (Torrefied durian peel)
3. เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ความไม่ชอบน้ำเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนไปเป็นเชื้อเพลิง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการทอร์รีแฟกชันของเปลือกทุเรียน ที่อุณหภูมิ 220 – 300°C
2. ศึกษาเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสมในกระบวนการทอร์รีแฟกชันของเปลือกทุเรียน ที่ 0, 15 และ 30 นาที
3. ศึกษาปริมาณของออกซิเจนในแก๊สตัวกลาง (แก๊สผสมระหว่างอากาศและแก๊สไนโตรเจน) ที่ร้อยละ 0, 24, 48, 72 และ 100 เพื่อให้แก๊สตัวกลางมีความเข้มข้นของออกซิเจนในระบบเท่ากับร้อยละ 0 5 10 15 และ 21
4. ศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันด้วยเทคนิค Proximate analysis Ultimate analysis Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) X-ray diffraction n (XRD) analysis X-ray fluorescence (XRF) analysis Scanning Electron Microscope (SEM) Contact angle และ Equilibrium Moisture Content (EMC)
5. ศึกษาสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน คือ ค่าความร้อนสูงสุด (Higher heating value, HHV)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

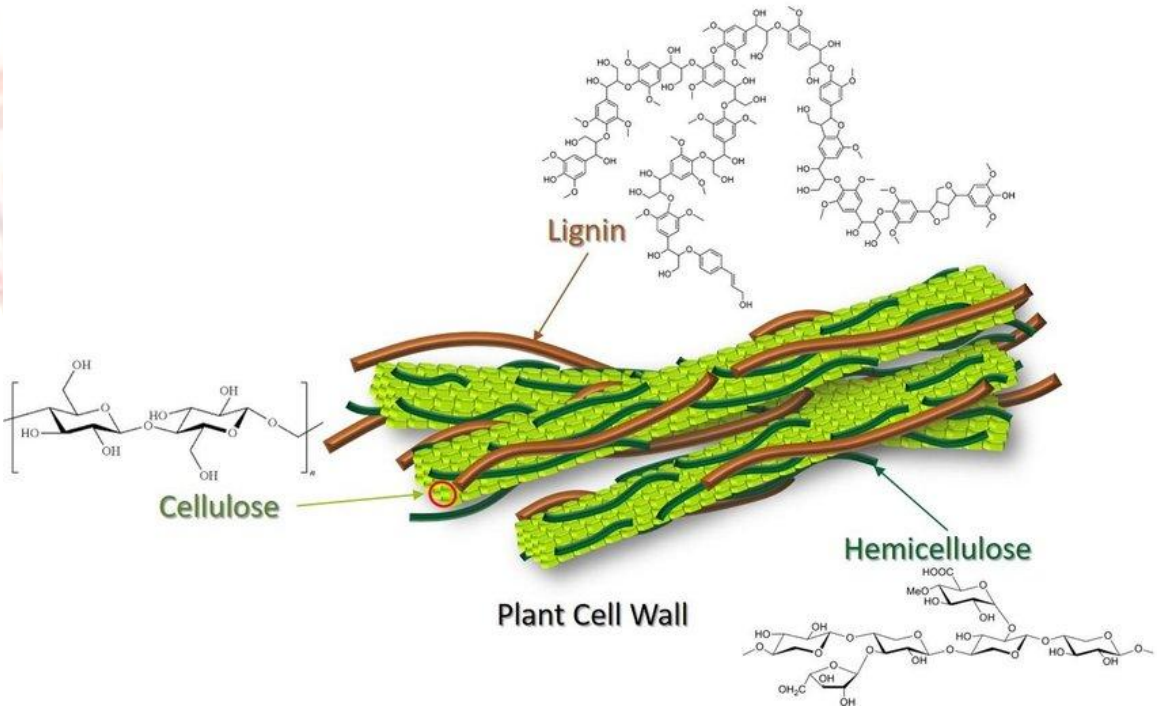
1. เป็นการพัฒนาทางด้านกระบวนการทางเคมีความร้อน และการใช้พลังงานทางเลือกในอนาคต
2. เพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร ทำให้สามารถสร้างมูลค่าจากของเสียเหล่านี้และสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน

3. ส่งเสริมการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ สู่ชั้นบรรยากาศ
4. เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากฟอสซิลและส่งเสริมการพัฒนาเศรษฐกิจสีเขียว ยังช่วยสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจ Bio-Circular-Green (BCG) ที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

บทที่ 2
ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานชีวมวล

พลังงานชีวมวลเป็นทรัพยากรหรือแหล่งพลังหมุนเวียนที่สำคัญและน่าสนใจต่อการนำมาพัฒนาอย่างมากเพราะนอกจากจะใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้แล้ว ชีวมวลยังมีราคาถูก หาได้ง่าย ยิ่งไปกว่านั้นการใช้พลังงานชีวมวลถือว่าเป็นการลดการปลดปล่อยคาร์บอน โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนและยังช่วยแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและวัสดุเหลือใช้ได้ในเวลาเดียวกัน ปัจจุบันมีการใช้ชีวมวลประเภทต่างๆ เช่น ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic biomass) ขยะมูลฝอย มูลสัตว์ และของเสียอินทรีย์ ซึ่งชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อผลิตเป็นพลังงาน เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของชีวมวลลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เป็นองค์ประกอบหลัก และอาจมีสารสกัดอื่น ๆ และสารอนินทรีย์จำนวนเล็กน้อยที่เชื่อมต่อกัน แสดงดัง**ภาพที่ 2.1** แสดงองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของมวลชีวภาพ และผนังเซลล์ของพืช



ภาพที่ 2-1 แสดงองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของมวลชีวภาพ และผนังเซลล์ของพืช [19]

2.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นสารประกอบอินททรีย์ที่พบทั่วไปในโครงสร้างผนังเซลล์ของชีวมวล สูตรโครงสร้างทาง เคมี $(C_6H_{10}O_5)_m$ โดยค่า m คือ ดีกรีพอลิเมอไรเซชันที่มีค่าอยู่ที่ 7,000 - 12,000 เป็นโฮโมโพลีแซ็กคาไรด์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยหน่วย β-D-glucopyranose ที่เชื่อมโยงด้วยพันธะไกลโคซิดิก (1, 4)-ไกลโคซิดิก เซลลูโลสมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า ส่วนประกอบอื่น ๆ ของลิกโนเซลลูโลส ที่สามารถตอบสนองต่อปริมาณพลังงานหลักในชีวมวล โมเลกุล เซลลูโลสมีแนวโน้มอย่างมากที่จะสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างและภายในโมเลกุล ซึ่งทำให้เกิดไมโครไฟบริลที่ เป็นผลึกซึ่งล้อมรอบด้วยเซลลูโลสอสัณฐาน (amorphous) ส่งผลให้เซลลูโลสมีความเสถียรทางความร้อนสูง กว่าของเฮมิเซลลูโลส โดยเซลลูโลสมีอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลสโดยปกติอยู่ ระหว่าง 260 ถึง 400 °C

2.1.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสมีสูตรโครงสร้างทางเคมี $(C_5H_8O_4)_m$ โดยค่า m คือ ดีกรีพอลิเมอไรเซชันที่มีค่าอยู่ที่ 100 - 200 เฮมิเซลลูโลสมีส่วนประกอบของของโมโนแซกคาไรด์พอลิมอร์หลายแบบหลายแขนง เช่น กลูโคส ไซโลส กาแลค โตส แมนโนส อาราบิโนส และกรดกลูโคโรนิก และมีอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ระหว่าง 220 - 315 °C โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสจะเปลี่ยนไปตามการระเหยของแสงและผลิตของเหลวแทนที่จะเป็นผลิตภัณฑ์ ที่เป็นของแข็ง เมื่อทำการทอร์รีแฟกชัน การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเสร็จสิ้นลง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็น ของเหลว

2.1.3 ลิกนิน

ลิกนินมีสูตรโครงสร้างทางเคมี $(C_9H_{10}O_3{\cdot}(OCH_3)0.9\text{-}1.7)_m$ โดยทำหน้าที่เป็นสารยึด เกาะสำหรับโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ในระหว่างการอัดแน่นหรือการอัดเป็นก้อน อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของลิกนินอยู่ระหว่าง 135 ถึง 165 °C เมื่ออุณหภูมิในระหว่างการทำให้ เกิดความหนาแน่น มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะให้คล้ายแก้วและความชื้นอยู่ระหว่าง 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก ลิกนินในสารชีวมวลจะอ่อนตัวลงและช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาคส่วน หลักของลิกนินให้มีความเสถียรทางความร้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการย่อยสลายลิกนินให้สมบูรณ์ต้องใช้เวลาและ อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงพอสมควร แม้ว่าลิกนินจะอ่อนตัวลงในอุณหภูมิที่ต่ำ 80 - 90 °C แต่อุณหภูมิ ของการสลายตัวด้วยความร้อนจะอยู่ในช่วง 160 - 900 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูง

2.2 เปลือกทุเรียน

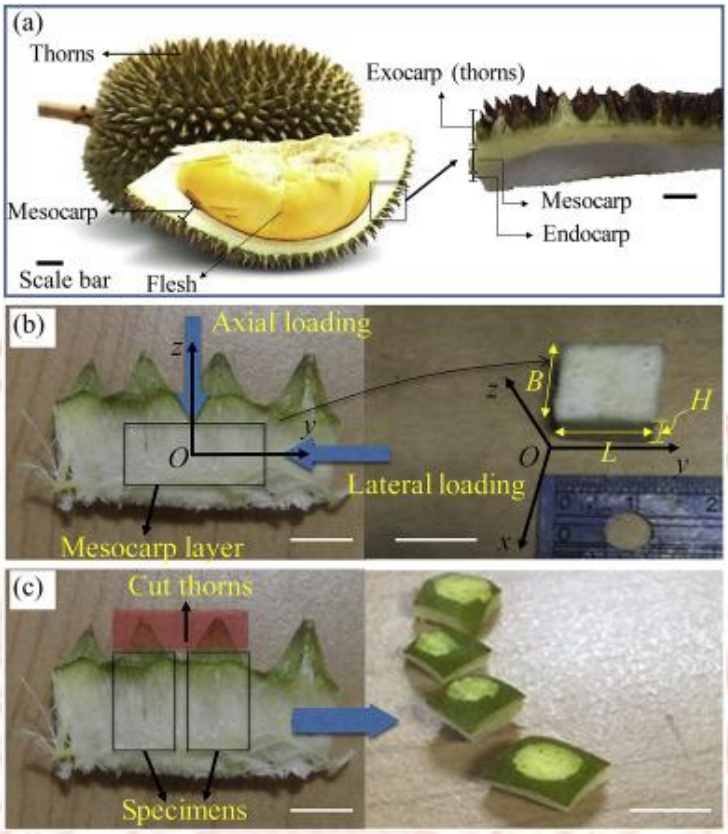
เปลือกทุเรียน (Durio zibethinus) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการบริโภคผลไม้ทุเรียน ซึ่งสามารถพบได้มากในประเทศเขตร้อน โดยเฉพาะในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ประเทศไทย มาเลเซีย และอินโดนีเซีย โดยเปลือกทุเรียนมีสัดส่วนประมาณ 60–70% ของน้ำหนักผลทุเรียนทั้งหมด ทำให้เกิดของเสียในปริมาณมากจากอุตสาหกรรมการเกษตรและการบริโภคในแต่ละฤดูกาล ซึ่งเปลือกทุเรียนจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลส (lignocellulosic biomass) ซึ่งมี

องค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) ประมาณ 30–40% เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ประมาณ 15–25% และลิกนิน (Lignin) ประมาณ 15–20% และธาตุและเถ้า (Ash content) ประมาณ 5–10% (อาจมากกว่านี้ขึ้นอยู่กับดินและการปนเปื้อน) [20]

เปลือกทุเรียนเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีเอกลักษณ์ ทำหน้าที่หลักในการปกป้องเนื้อผลไม้ที่อยู่ภายในจากความเสียหายทางกายภาพ แมลง และจุลินทรีย์ โครงสร้างและสมบัติของเปลือกทุเรียนเป็นผลมาจากการปรับตัวทางวิวัฒนาการเพื่อให้มั่นใจถึงการอยู่รอดและการขยายพันธุ์ของต้นทุเรียน โดยเปลือกทุเรียนประกอบด้วยหลายชั้นของเนื้อเยื่อที่มีลักษณะและหน้าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ชั้นนอกสุด (Exocarp หรือ Pericarp) เป็นชั้นที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมโดยตรง มีลักษณะเป็นหนามแหลม (spines) ที่แข็งแรง กระจายอยู่ทั่วพื้นผิว หนามเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการป้องกันการถูกทำลายโดยสัตว์และอาจมีส่วนช่วยในการระบายออกซิเจน ชั้นกลาง (Mesocarp) เป็นชั้นเนื้อเยื่อที่อยู่ระหว่างชั้นนอกและชั้นใน มีความหนาและแข็งแรง ทำหน้าที่รองรับและปกป้องเนื้อผลไม้ภายใน นอกจากนี้ ยังเป็นส่วนที่มีเส้นใยจำนวนมาก ซึ่งมีส่วนช่วยในการเสริมความแข็งแรงเชิงกล และชั้นในสุด (Endocarp) เป็นชั้นที่อยู่ติดกับเนื้อผลไม้ มีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ และอาจมีโครงสร้างที่ซับซ้อนเพื่อรองรับแต่ละพูของทุเรียน แสดงดัง**ภาพที่ 2.2** ลักษณะของเปลือกทุเรียน

ลักษณะเด่น คือ หนามแหลม (Spines) หนามทุเรียนมีความแข็งแรงและแหลมคม มีโครงสร้างที่ซับซ้อนภายใน ประกอบด้วยเซลล์ที่มีผนังหนาและอาจมีการสะสมของสารลิกนิน ทำให้มีความแข็งแรงเชิงกลสูง การจัดเรียงตัวของหนามทั่วเปลือกช่วยกระจายแรงกระแทกและป้องกันการเจาะทะลุ ความหนา เปลือกทุเรียนมีความหนาค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นอีกหนึ่งกลไกในการป้องกันทางกายภาพ ความหนาของเปลือกช่วยลดแรงกระแทกที่อาจส่งถึงเนื้อผลไม้ภายใน และเส้นใย (Fibers) ชั้น mesocarp มีเส้นใยจำนวนมากที่เรียงตัวอย่างมีระเบียบ เส้นใยเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นเซลล์สเคลอเรนไคมา (sclerenchyma cells) ที่มีผนังเซลล์หนาและแข็งแรง ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงและความเหนียวของเปลือก ทำให้เปลือกทนทานต่อการแตกหัก

เนื่องจากเปลือกทุเรียนมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลส และมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลหรือผลิตภัณฑ์ชีวภาพอื่น ๆ



ภาพที่ 2-2 ลักษณะของเปลือกทุเรียน [21]

Thangalazmy และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงจากเปลือกทุเรียนผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้และวิเคราะห์ลักษณะของผลิตภัณฑ์ ในการศึกษานี้ ได้ทำการไพโรไลซิสเปลือกทุเรียนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C โดยมีอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 60 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ไบโอออยล์ ไบโอชาร์ และก๊าซ จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกันไปตามอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 500 °C ให้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุด (42.3% โดยน้ำหนัก) ซึ่งมีค่าความร้อนสูงสุด 27.1 เมกกะจูล/กิโลกรัม องค์ประกอบหลักในไบโอออยล์ ได้แก่ กลุ่มสารประกอบฟีนอล กรดอะซิติก และสารประกอบที่มีออกซิเจนอื่นๆ ไบโอชาร์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนสูง (68.5%) และมีค่าความร้อนสูง 20.5 เมกกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งก๊าซที่ได้มีองค์ประกอบหลักเป็น CO, CO_2, CH_4 และ H_2 จากการศึกษาสรุปได้ว่า เปลือกทุเรียนเป็นแหล่งชีวมวลที่มีศักยภาพในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวและของแข็งผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยการควบคุมอุณหภูมิสามารถปรับปรุงปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ [22]

Haryati และคณะ (2018) ได้ศึกษาการทอร์รีแฟกชันของเปลือกทุเรียนและกากอ้อยเพื่อผลิตเชื้อเพลิงแข็งในการเป็นเชื้อเพลิงแข็งทางเลือก การทดลองดำเนินการที่อุณหภูมิ 200 - 350 °C โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติที่ได้จากเปลือกทุเรียนและกากอ้อย ผลการทดลองพบว่า เชื้อเพลิงแข็งจาก

เปลือกทุเรียนมีค่าความร้อนสูงสุดที่ 6,157 แคลลอรี่/กรัม และอัตราการเผาไหม้ที่ 0.0398 กรัม/วินาที ซึ่งต่ำกว่าเชื้อเพลิงแข็งจากกากอ้อยที่มีอัตราการเผาไหม้ 0.0509 กรัม/วินาที อัตราการเผาไหม้ที่ต่ำกว่าทำให้เชื้อเพลิงแข็งจากเปลือกทุเรียนมีระยะเวลาในการเผาไหม้นานขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิง [23]

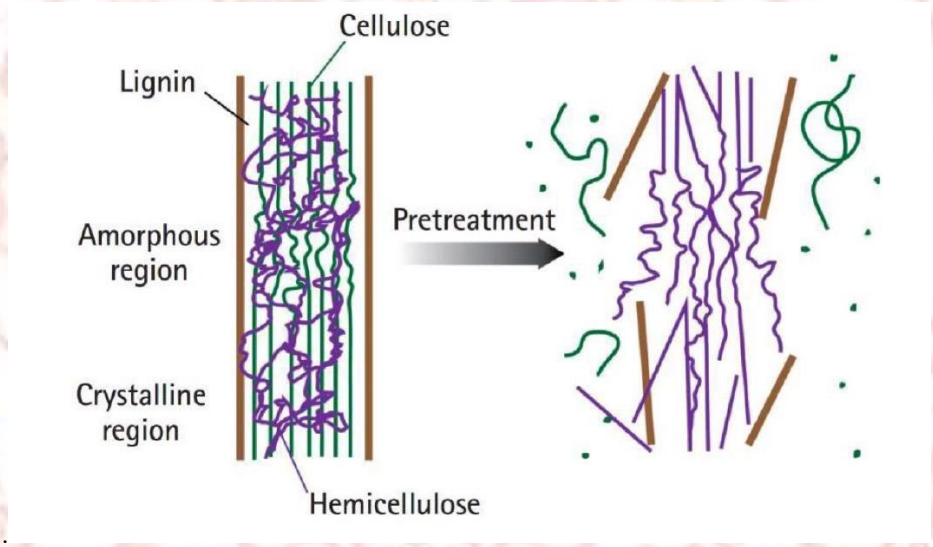
Pimsamarn และคณะ (2024) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอร์รีแฟกชันของเปลือกทุเรียนภายใต้สภาวะบรรยากาศที่แตกต่างกัน ได้แก่ บรรยากาศของออกซิเจน (Air) และไนโตรเจน (N_2) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อสมบัติทางเชื้อเพลิง ในการศึกษานี้ ได้ทำการทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 200, 220, 240, 260, 280, 300 และ 320 °C ระยะในการดำเนินงาน 0 15 และ 30 นาที จากผลการทดลองพบว่า การใช้ออกซิเจนในการทอร์รีแฟกชันช่วยเร่งการสลายตัวทางความร้อนได้ โดยสามารถลดร้อยละผลได้เชิงมวลจาก 94.65% เหลือเพียง 30.63% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 200 °C เป็น 300°C ภายใต้ระยะในการดำเนินงาน 30 นาที ค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูง มีค่า 19.02 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เป็น 35.26 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 300°C ในขณะที่การใช้ไนโตรเจนสามารถให้ค่าความร้อนสูงสุดเพียง 32.49 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และการวิเคราะห์แบบประมาณ พบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาในการดำเนินงานมีส่วนสำคัญต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันของเปลือกทุเรียนแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบดั้งเดิมในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งการเลือกเงื่อนไขการทอร์รีแฟกชันที่เหมาะสม เช่น การควบคุมอุณหภูมิ บรรยากาศ และเวลา สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเปลือกทุเรียนได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการพัฒนากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในอนาคต [24]

Herlambang และคณะ (2025) ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากของเสียทางการเกษตรเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงาน โดยเลือกใช้เปลือกทุเรียนและเปลือกโกโก้ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่พบได้ทั่วไปในประเทศอินโดนีเซีย มาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเชื้อเพลิงในรูปแบบเชื้อเพลิงอัดแข็ง การทดลองดำเนินการที่อุณหภูมิ 300°C อัตรการให้ความร้อน 50 °C /min ผลการทดลองพบว่า เชื้อเพลิงอัดแข็งที่ได้จากเปลือกโกโก้มีความชื้นร้อยละ 9.78, เถ้า 28.32, สารระเหย 29.41 และคาร์บอนคงตัว 32.49 ในขณะที่เชื้อเพลิงอัดแข็ง จากเปลือกทุเรียนมีความชื้นร้อยละ 7.06, เถ้า 10.47, สารระเหย 34.94 และคาร์บอนคงตัว 47.53 โดยค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแข็งจากเปลือกทุเรียนมีค่าสูงกว่า คือ 6,448 แคลอรี/กรัม เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอัดแข็ง จากเปลือกโกโก้ที่มีค่า 4,872 แคลอรีต่อกรัม [25]

2.3 กระบวนการทอร์รีแฟกชัน (Torrefaction)

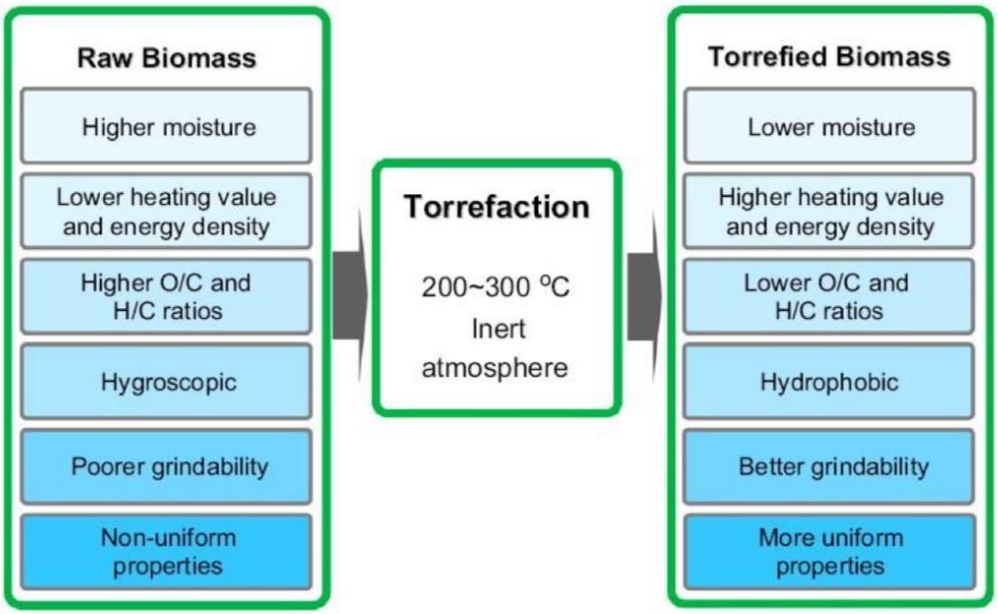
กระบวนการทอร์รีแฟกชันเป็นกระบวนการสลายตัวทางเคมีความร้อนของชีวมวล ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของแข็งที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันจะมีสมบัติทางความร้อนและการแปรสภาพใกล้เคียง

กับถ่านหิน โดยเป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนเคมีของชีวมวลที่ช่วงอุณหภูมิต่ำประมาณ 200-300 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย และอัตราการให้ความร้อนจะต้องน้อยกว่า 50 °C /min ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันหรือชีวมวลทอร์รีไฟด์ (Torrefied biomass) มีลักษณะเป็นของแข็งมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เช่น ค่าความร้อนสูงสุด (Higher Heating Value, HHV หรือ Gross calorific value, GCV) ปริมาณคาร์บอน (Carbon content) ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) และค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ที่ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณออกซิเจน (Oxygen content) และความชื้น (Moisture content) ให้กับชีวมวล และยังสามารถสลายพอลีแซคคาไรด์สายยาวของวัสดุชีวมวล ทำให้วัสดุชีวมวลสามารถเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงคุณภาพสูง ซึ่งส่งผลต่อการสลายตัวทางความร้อนของโครงสร้างชีวมวลโดยจะเพิ่มขึ้นตามองค์ประกอบของชีวมวล แสดงดัง**ภาพที่ 2.3** แสดงผลของการทำทอร์รีแฟกชันต่อโครงสร้างของชีวมวล



ภาพที่ 2-3 แสดงผลของการทำทอร์รีแฟกชันต่อโครงสร้างของชีวมวล [26]

งานวิจัยหลากหลายงาน แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันสามารถปรับปรุงสมบัติของชีวมวลหลังจากผ่านกระบวนการได้ โดยสามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชีวมวลก่อนและหลัง กระบวนการทอร์รีแฟกชัน แสดงดัง**ภาพที่ 2.4** สมบัติของชีวมวลก่อนและกระบวนการทอร์รีแฟกชัน



ภาพที่ 2-4 สมบัติของชีวมวลก่อนและกระบวนการทอร์รีแฟกชัน

Arias และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทอร์รีแฟกชันของไม้สน (pine) และไม้บีช (beech) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของทอร์รีแฟกชันต่อคุณสมบัติเหล่านี้ ซึ่งมีความสำคัญต่อการใช้งานชีวมวลในกระบวนการเผาไหม้และแก๊สซิฟิเคชัน ในการศึกษานี้ได้ทำการทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 225, 250, 275 และ 300 °C เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการบดของชีวมวลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังจากการทอร์รีแฟกชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าชีวมวลทอร์รีไฟด์มีความเปราะ เป็นผงละเอียดได้ง่าย นอกจากนี้ความว่องไวต่อปฏิกิริยาของชีวมวลทอร์รีไฟด์ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยมีการเผาไหม้ที่รวดเร็วและสมบูรณ์มากขึ้น จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันไม่เพียงแต่ปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานของชีวมวลเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการบดและความว่องไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานชีวมวลในระบบพลังงานต่างๆ [27]

Yan และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติการเผาไหม้ของไม้ไผ่ด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มค่าความร้อนและลดปริมาณความชื้นของไม้ไผ่ ในการศึกษานี้ ได้ทำการทอร์รีแฟกชันไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 220, 250 และ 280 °C เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากผลการทดลองพบว่า ค่าความร้อนสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความร้อนสูงสุด เพิ่มขึ้นจาก 17.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เป็น 26.1 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 280 °C นอกจากนี้ ปริมาณความชื้นและอัตราส่วน O/C และ H/C ลดลงอย่างมากหลังจากการทอร์รีแฟกชัน ซึ่งบ่งชี้ถึงการปรับปรุงคุณสมบัติการเผาไหม้ จากผลการศึกษาสามารถ

สรุปได้ว่า กระบวนการทอร์รีแฟกชันเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานของไม้ไผ่ ทำให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล [28]

Chen และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของฟางข้าวโพดและฟางฝ้ายหลังจากการทอร์รีแฟกชัน ที่อุณหภูมิ 200, 230, 260 และ 290 °C จากผลการทดลองพบว่า สีของชีวมวลที่ผ่านการทอร์รีแฟกชันแล้วเข้มขึ้น มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดขึ้นและใช้พลังงานในการบดลดลง ปริมาณความชื้นและออกซิเจนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นอย่างมาก [29]

Małgorzata Wilk และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกระบวนการทอร์รีแฟกชันต่อวัสดุ ชีวมวลไม้ 2 ชนิด (WB1 และ WB2) และ กากตะกอนน้ำเสีย ที่อุณหภูมิ 230 260 และ 290 °C ระยะเวลาในการดำเนินงาน 30 60 และ 90 นาที จากผลการทดลองพบว่า กระบวนการทอร์รีแฟกชันทำให้คุณสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างชีวมวลไม้ทั้งสองตัวอย่างดีขึ้น ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลมากกว่าระยะเวลาในการดำเนินงาน หลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันทำให้มีปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงที่เพิ่มมากขึ้น ความชื้นต่ำและคุณสมบัติความแข็งแรงที่ดีขึ้น แสดงให้เห็นว่าชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำมาทำเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งจากใช้เครื่องมือวิเคราะห์ในการอธิบายกระบวนการทอร์รีแฟกชันโดยละเอียดนั้น สามารถยืนยันการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีในชีวมวลได้ และทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมในอนาคต [30]

Wei-Hsin Chen และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาการทำทอร์รีแฟกชันของชีวมวลไม้สองประเภท คือ ไม้ป็อปลาร์ (Hardwood) และไม้เฟอร์ (Softwood) ที่อุณหภูมิ 200 และ 230°C โดยทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสี ความชื้น และมุมสัมผัส จากผลการทดลองพบว่า สีของไม้ที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันจะมีสีเข้มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจาก เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ชีวมวลไม้ทั้งสองประเภทที่ผ่านการทำทอร์รีแฟกชันจะมีค่า EMC ที่จะลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งไม้เฟอร์สามารถลดการดูดซับความชื้นสูงสุดถึงร้อยละ 57.39 ที่อุณหภูมิ 230 °C และการทดสอบมุมสัมผัสของไม้ที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันอยู่ในช่วง 94–113° แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสส่งผลให้มีการกำจัดกลุ่มไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิล ทาร์ควบแน่นภายในรูพรุนทำให้ขัดขวางไม่ให้ความชื้นผ่านเข้าไปในของแข็งได้ และช่วยป้องกันการเกิดไอน้ำภายในรูพรุนอีกด้วย ดังนั้น การปรับปรุงชีวมวลสามารถช่วยการจัดเก็บและการขนส่งไบโอชาร์ที่ผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือมีอายุการจัดเก็บที่ยาวนานขึ้น ซึ่งสามารถลดการเกิดเชื้อรา ช่วยในการกักเก็บคาร์บอน และสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ [31]

Congyu Zhang และคณะ (2019) ได้ทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสาหร่าย 2 ชนิดที่ ได้แก่ Nannochloropsis Oceanica และ Chlorella sp. ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนและมีออกซิเจนผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300 °C ระยะในการดำเนินงาน 15 30 45 และ 60 นาที จากผลการทดลองพบว่า สาหร่ายที่ทำในสภาวะออกซิเจน

ทำให้มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาตรและขนาดรูพรุนจะลดลง ซึ่งเกิดจากการสลายตัวทางความร้อนและการเกิดปฏิกิริยา oxidation ของไขมันและโปรตีน ซึ่งทำให้ไปอุดโครงสร้างของรูพรุน และมุมสัมผัสของสาหร่ายที่ทำในสภาวะไนโตรเจนจะมีมุมสัมผัสเพิ่มขึ้น แสดงถึงความไม่ชอบน้ำ สำหรับสภาวะที่มีออกซิเจนที่มีอุณหภูมิสูงจะมีมุมสัมผัสลดลง ดังนั้น ชีวมวลที่ทำในสภาวะออกซิเจนที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยลดต้นทุนการดำเนินการและยังทำให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมด้วย [12]

M. Khairy และคณะ (2024) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการผลิตชีวมวลเพื่อเป็นพลังงาน โดยศึกษาเปลือกถั่ว (BH) และลำต้นงา (SS) ที่อุณหภูมิ 200, 225, 250, 275, และ 300 °C ระยะในการดำเนินงาน 30 และ 60 นาที ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน จากผลการทดลองพบว่ากราฟ TGA ของ SS และ BH ซึ่งบ่งบอกถึงการสลายตัวเนื่องจากความร้อน เมื่อผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันมีการสลายตัวที่ยากมากขึ้น คือ ในช่วงแรกน้ำ (30 - 180 °C) สารระเหยจะระเหยระหว่าง ช่วงที่สอง (180 – 600 °C) เป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเป็นหลักและลิกนินบางส่วน และเซลลูโลสส่วนใหญ่ช่วงที่สาม (600–1000 °C) SS และ BH เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ทำให้กราฟเลื่อนไปทางขวา เนื่องจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดการสลายตัวยากขึ้น ความชันที่ลดลงของกราฟ TGA ส่วนใหญ่เกิดจากการกำจัดสารระเหยเมื่ออุณหภูมิของการทำทอร์รีแฟกชันเพิ่มขึ้น และกราฟ DTG ใช้เพื่อตรวจสอบการสูญเสียมวล พบว่า เฮมิเซลลูโลสจะลดลงหรือถูกกำจัดแล้วหลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ดังนั้น การทอร์รีแฟกชันเป็นการปรับปรุงเบื้องต้นที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งของชีวมวลโดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการสลายตัวด้วยความร้อน [32]

2.4 กระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน

การทอร์รีแฟกชันภายใต้สภาวะออกซิเจน หรือ สภาวะที่มีออกซิเจนบางส่วน มีอีกชื่อหนึ่งว่า ออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน (Oxidative torrefaction) อาจใช้ก๊าซออกซิไดส์ (Oxidizing gases) ตัวอื่น ๆ เป็นก๊าซตัวกลาง เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ อาร์กอน หรือออกซิเจน ชีวมวลที่ผ่านการทอร์รีแฟกชันแบบใช้ออกซิเจนจะถูกออกซิไดซ์พร้อมกับสารระเหยที่เกิดขึ้นในกระบวนการทางความร้อน และทำให้ลดการใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว ก๊าซตัวกลางที่เป็นออกซิเจนสามารถใช้ทดแทนก๊าซเฉื่อยในกระบวนการทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิต่ำได้ สามารถเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลได้โดยที่ไม่ทำให้เกิดการลุกติดไฟหรือการเผาไหม้ (Combustion) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีคุณสมบัติของชีวมวลใกล้เคียงกับกระบวนการทอร์รีแฟกชันภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย นอกจากนี้การนำออกซิเจนไปใช้เป็นก๊าซตัวกลางยังมีต้นทุนที่ต่ำกว่าก๊าซเฉื่อย สามารถลดอุณหภูมิในการดำเนินการได้ ซึ่งจะลดต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างมาก

Yoshimitsu Uemura และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอร์รีแฟกชันจากทะลายปาล์ม (EFB) ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 220 250 และ

300 °C โดยใช้ความเข้มข้นออกซิเจนที่ร้อยละ0 3 9 และ 15 และขนาดของ EFB คือ 0.375 1.5 3 และ 6 มิลลิเมตร จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้นทำให้ร้อยละผลได้และร้อยละผลได้ของพลังงานลดลง แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สูง คือ ร้อยละ 85-95 และค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน [33]

Wei-Hsin Chen และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบไม่ใช้ออกซิเจนและแบบมีออกซิเจนของชีวมวล 4 ชนิด คือ เส้นใยปาล์มน้ำมัน เส้นใยมะพร้าว ยูคาลิปตัส และ ต้นซีดาห์ญี่ปุ่น ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้ความเข้มข้นออกซิเจนที่ร้อยละ0 5 15 และ 21 จากผลการทดลองพบว่า ไม่ว่าชีวมวลทั้ง 4 ชนิด จะมีประสิทธิภาพของชีวมวลที่ทำในสภาวะในไนโตรเจนจะดีกว่าที่มีออกซิเจน ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าทอร์รีแฟกชันแบบไม่ใช้ออกซิเจนทำให้เกิดโครงสร้างเป็นรูพรุน ซึ่งเกิดจากการลดลงของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนที่สูงขึ้น จะทำให้เส้นใยเกิดรูพรุนเล็กๆ ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันของส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลส และชีวมวลที่มีลิกนินมากจะมีความทนต่อออกซิเจนมากกว่าชีวมวลเส้นใย ทำให้เหมาะสมที่จะผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำเพื่อลดต้นทุนการดำเนินงาน [34]

Yoshimitsu Uemura และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอร์รีแฟกชันของกะลาปาล์มน้ำมัน (PKS) ซึ่งเป็นหนึ่งในเศษเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 220 250 และ 300 °C อุณหภูมิ โดยที่ความเข้มข้นของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ0 3 9 12 และ 15 จากการทดลองพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนจะมีผลมากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น ค่าความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการสูญเสียมวลและพลังงานมากขึ้น และผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาในชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันนั้นแตกต่างกันสำหรับสภาวะไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่ในสภาวะออกซิเจนจะเกิดการสลายตัวมากกว่าสภาวะไนโตรเจน ซึ่งเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน [35]

Congyu Zhang และคณะ (2019) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณออกซิเจนในกระบวนการทอร์รีแฟกชันของชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ Walnut shell, Xanthoeras sorbifolia shell และ Sapindus mukorossi shell ที่อุณหภูมิ 250 และ 300 °C ระยะในการดำเนินงาน 10 20 และ 30 นาที โดยใช้ความเข้มข้นออกซิเจนที่ร้อยละ0 5 15 และ 21 จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาและความเข้มข้นของออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น ผลของร้อยละเชิงมวล ค่าความร้อนสูง และพลังงานที่ได้ ส่งผลให้พลังงานและผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นลดลง แต่ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้กลับมีค่าเพิ่มขึ้น และในแผนภาพของ van Krevelen อัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C พบว่ามีการกำจัดไฮโดรเจน การกำจัดออกซิเจน และการกำจัดคาร์บอน [14]

Lei Zhang และคณะ (2022) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันและลักษณะเชิงโครงสร้างก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบไม่มีออกซิเจนและมีออกซิเจนบางส่วนของแกลบ โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 220 270 และ 300 °C ภายใต้ก๊าซตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ อาร์กอน ออกซิเจน และก๊าซเสีย จากผลการทดลองพบว่า พันธะ C = O ของหมู่คาร์บอนิลลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและการอะเซทิเลชันพันธะ C-O (อยู่ในไซแลนหรือลิกนิน) และ C-O-C (อยู่ในเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส) ลดลงด้วย เนื่องมาจากการสลายตัวหรือการย่อยสลายทางความร้อน นอกจากนี้ และพันธะ O–H ของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นกลุ่มที่ชอบน้ำนั้นลดลงเช่นกันทำให้สามารถเพื่อเพิ่มคุณสมบัติไม่ชอบน้ำของแกลบได้ แสดงให้เห็นว่า การทำทอร์รีแฟกชันแบบใช้ออกซิเจนสามารถปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มปริมาณคาร์บอนได้ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนและความชื้นในแกลบลดลง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเพิ่มปริมาณคาร์บอนและปรับปรุงความหนาแน่นของพลังงานของแกลบ [36]

Xiaobing Cao และคณะ (2022) ได้ทำการศึกษาลิกนินที่ถูกสกัดมาจากเศษเหลือจากการแปรรูปไม้ไผ่เพื่อนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ที่อุณหภูมิ 230 260 และ 290 °C โดยใช้ความเข้มข้นออกซิเจนที่ร้อยละ 0 3 5 8 10 และ 15 จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสามารถเพิ่มค่าความร้อนและกลุ่มไฮดรอกซิลของลิกนินลดลงด้วย ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา deacetylation ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ การลดลงของคาร์บอนิลในลิกนินก็ลดลงเช่นกัน เกิดจากปฏิกิริยา decarboxylation และ decarboxylation และเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้น หมู่ฟังก์ชันประเภทต่างๆ ในลิกนินถูกกำจัดออกไปด้วย โดยที่ออกซิเจนในชีวมวลส่วนใหญ่ถูกกำจัดออกไปผ่านการก่อตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและกรดอะซิติก ดังนั้นกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบมีออกซิเจนเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุงชีวมวล ซึ่งสนับสนุนการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นพลังงานและสารเคมีที่มีมูลค่าสูงด้วยกระบวนการความร้อนทางเคมี [37]

Jadsadajerm และคณะ (2020) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของออกซิเจนต่อกระบวนการทอร์รีแฟกชันของต้นกระถินยักษ์ โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์อัตราการเกิดก๊าซและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน การทดลองดำเนินการที่อุณหภูมิ 220, 240 และ 260 °C ภายใต้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ 2%, 5%, 10% และ 22% เพื่อเปรียบเทียบกับสภาวะที่ใช้ไนโตรเจนบริสุทธิ์ จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อการสลายตัวของชีวมวล โดยพบว่าร้อยละของผลผลิตโดยมวลลดลงเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้น สำหรับผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เกิดขึ้น ได้แก่ H_2O, CO_2 และ CO โดยการวัดอัตราการเกิดก๊าซด้วยเทคนิค TG-MS พบว่าออกซิเจนมีบทบาทสำคัญในสองลักษณะ คือ ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ซึ่งออกซิเจนช่วยเร่งปฏิกิริยาการคายน้ำและการคาร์บอกซิเลชัน ส่งผลให้ค่าอัตราส่วน O/C ลดลง ขณะที่ในช่วงอุณหภูมิสูง ออกซิเจนในระบบมีทำให้การเกิดการเผาไหม้บางส่วน (Patial combustion) ซึ่งเป็นสาเหตุให้ผลผลิตโดยมวลลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ ยังพบว่าคุณสมบัติของ

ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด โดยปริมาณคาร์บอนของชีวมวลเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และลดลงเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนสูงเกินระดับที่เหมาะสม สำหรับค่าความร้อนสูงสุดพบว่า ที่อุณหภูมิ 260 °C ภายใต้ความเข้มข้นของออกซิเจน 5% ค่าความร้อนสูงสุดเพิ่มขึ้นถึง 21.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของออกซิเจนมีบทบาทสำคัญต่อกลไกการสลายตัวเชิงความร้อนของกระถินยักษ์ และส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ การควบคุมระดับออกซิเจนอย่างเหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในด้านพลังงาน [38]

Zhong Zhao และคณะ (2022) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงแกลบด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชัน โดยจะทำที่อุณหภูมิ 220, 270 และ 300 °C ในสภาวะก๊าซเฉื่อยและออกซิเจน โดยใช้ความเข้มข้นออกซิเจนที่ร้อยละ0 6 10 และ 21 จากผลการทดลองพบว่าการดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิไม่สูงมากสามารถดูดซับโมเลกุลน้ำได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะเร่งการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสทำให้ปริมาณของกลุ่มที่มีความชอบน้ำสูง คือ คาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลลดลงอย่างมาก และการเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญต่อการกำจัดกลุ่มที่ชอบน้ำออกจากพื้นผิวของอนุภาคแกลบเช่นกัน แต่เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนมากเกินไป ส่งผลให้เกิดกลุ่มที่ชอบน้ำใหม่ขึ้นมา ดังนั้น คุณสมบัติไม่ชอบน้ำของแกลบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจน [17]

Sun Yong Park และคณะ (2023) ได้ทำการศึกษากระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลด้วยกระบวนการทางความร้อน โดยศึกษาเศษไม้ 4 ชนิด คือ Liriodendron tulipifera [LT] Populus canadensis [PC] softwood chips (Pinus rigida [LP] และ Pinus koraiensis [KP] เพื่อเปรียบเทียบสภาวะที่มีออกซิเจนน้อยและออกซิเจนมาก ที่อุณหภูมิ 230 250 270 290 และ 310 °C การทดลองดำเนินการเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า สภาวะที่มีออกซิเจนสูงทำให้ร้อยละผลได้ลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะที่มีออกซิเจนน้อย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา decarbonization, dehydrogenation และ deoxygenation อัตราส่วนองค์ประกอบคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 62.88 และค่าความร้อนของชีวมวลเพิ่มขึ้นจากจาก 19.18 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เป็น 28.96 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีความใกล้เคียงกับถ่านหิน แสดงถึงศักยภาพของชีวมวลในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่เพื่อใช้ทดแทนถ่านหิน [39]

Haiqing Sui และคณะ (2024) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอร์รีแฟกชันของลำต้นของฝ้ายเพื่อนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยจะทำที่อุณหภูมิ 220 260 และ 300 °C ระยะในการดำเนินงาน 30 นาที ใช้ความเข้มข้นออกซิเจนที่ร้อยละ 0 3 6 10 และ 21 จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติหลักของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้แก่ ความหนาแน่น ความแข็งแรงในการอัด ความทนทาน ความไม่ชอบน้ำ พลังงาน และค่าความร้อนที่ดียิ่งขึ้น เป็นผลให้คุณสมบัติการอัดเม็ดดีขึ้น ทำให้เชื้อเพลิงจากลำต้นฝ้ายมีคุณภาพสูงที่สามารถนำไปใช้งานได้ [40]

2.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

2.5.1 ร้อยละผลได้เชิงมวล (Mass yield)

ร้อยละผลเชิงมวลเป็นพารามิเตอร์หลักในการตรวจสอบผลกระทบของกระบวนการทอร์รีฟคชันต่อการสูญเสียมวล ซึ่งผลได้เชิงมวลเป็นตัวแปรสำคัญที่อ้างอิงถึงปริมาณมวลชีวภาพดั้งเดิมที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ เป็นของแข็งหลังจากการทอร์รีแฟกชัน ผลร้อยละผลได้เชิงมวล คำนวณได้จากเปอร์เซ็นต์ของมวลชีวมวลหลังจากการทอร์รีแฟกชันเทียบกับมวลของชีวมวลก่อนทอร์รีแฟกชัน ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\text{ร้อยละผลได้เชิงมวล} = \frac{\text{ชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน (กรัม)}}{\text{ชีวมวลก่อนผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน (กรัม)}} \times 100 \qquad (2.1)$$

2.5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis)

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาส่วนประกอบในตัวอย่างและทำให้ประเมินสมบัติได้โดยประมาณ การวิเคราะห์ความเป็นเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะถูกวิเคราะห์โดยใช้วิธีวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิความร้อน (Thermogravimetry) เป็นเทคนิคที่ใช้โดยตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเมื่อเทียบกับเวลาที่ อุณหภูมิคงที่หรือเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ ส่วนใหญ่เรียกว่า การวิเคราะห์โดยวิธีชั่ง น้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) ใช้อุปกรณ์ที่สำคัญคือเครื่องชั่งสารเชิงความร้อน (Thermobalance) หรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analyzer) ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ มวลของสารตัวอย่างซึ่งอยู่ในบรรยากาศที่ถูกควบคุมจะถูกบันทึก อย่างต่อเนื่องกราฟที่ได้จาก TGA เรียกว่า TGA Thermogram หรือ Thermal Decomposition curve เป็น ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมวลเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิ ซึ่งการวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวล จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก

1. ความชื้น (moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่หลังจากการอบแห้ง ความชื้นของเชื้อเพลิง แข็งมีผลโดยตรงต่อค่าความร้อนโดยหากเชื้อเพลิงแข็งมีความชื้นมากจะทำให้สูญเสียความร้อนไปกับการ ระเหยความชื้นในระหว่างการเผาไหม้ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงในการจุดติดเชื้อเพลิงนั้นส่งผลให้ค่าความร้อนที่ ได้ต่ำลง

2. สารระเหยได้ (Volatile matter: VM) เป็นส่วนที่เผาไหม้ได้(combustibles) ที่เป็นสารอินทรีย์หรือ สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถระเหยออกจากตัวเชื้อเพลิงได้ง่ายเมื่อมีการให้ความร้อนแก่ตัว เชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงที่ดีควรมีสารระเหยได้อยู่ในระดับที่เหมาะสมจึงจะทำให้จุดติดไฟได้ง่าย ถ้ามีสารระเหย ได้น้อยเกินไปจะทำให้จุดติดไฟได้ยากและเกิดการลุกไหม้อย่างช้าๆ แต่ถ้ามีสารระเหยได้ในปริมาณที่มาก เกินไปจะทำให้เกิดเขม่าและควันสูงในช่วงแรกของการเผาไหม้

3. เถ้า (ash) เป็นสารอนินทรีย์ที่เผาไหม้ไม่ได้ (incombustibles) ที่เหลือจาก การเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่ ดีไม่ควรมีเถ้าในปริมาณมากเกินไป เนื่องจากจะทำให้มีประสิทธิภาพในการให้พลังงานความร้อนต่ำ

4. คาร์บอนคงตัว (fixed carbon: FC) เป็นส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustibles) ที่เป็นสารอินทรีย์หรือ สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ถือเป็นส่วนที่ให้พลังงานหลักของเชื้อเพลิง ดังนั้น หากเชื้อเพลิงมี สัดส่วนของคาร์บอนคงตัวมาก จะทำให้ลุกติดไฟได้ยาก แต่ถ้าลุกติดไฟแล้วจะเผาไหม้ได้นาน และมีค่าความ ร้อนสูง

2.5.3 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Utimate analysis)

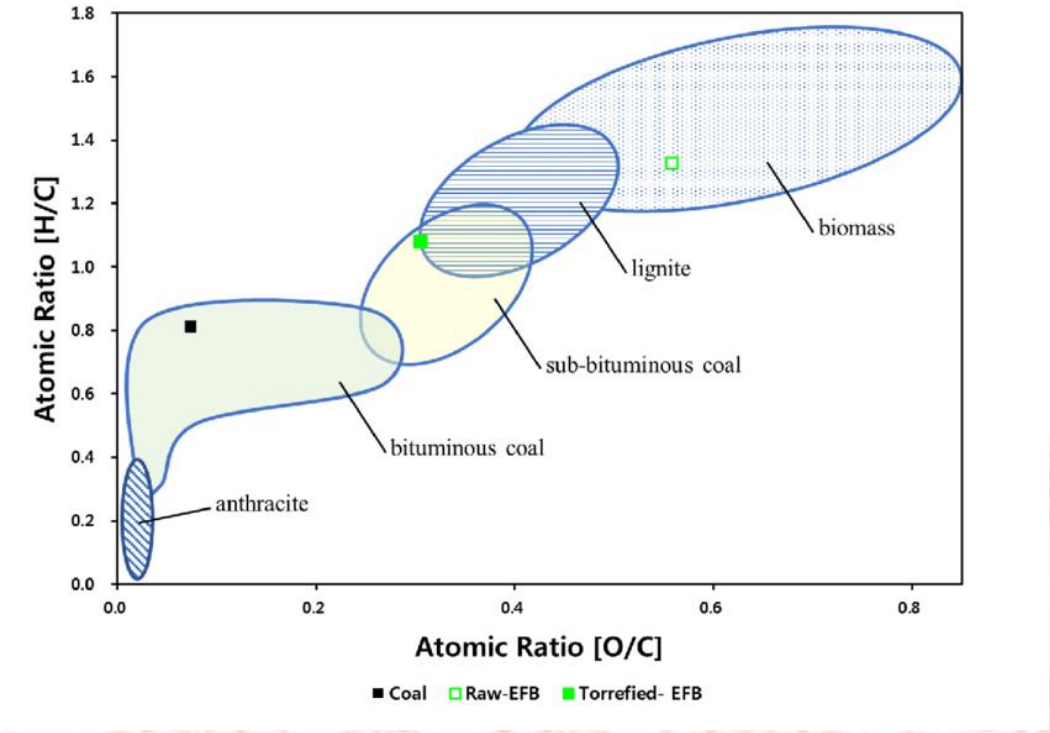
เป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบของตัวอย่าง โดยหาปริมาณธาตุต่าง ๆ ในตัวอย่าง ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน ใช้ในการประเมินความบริสุทธิ์และองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบต่างๆ และสามารถนำไปใช้กับตัวอย่างต่างๆ ได้หลากหลายประเภท เช่น สารที่เป็นของแข็ง ของเหลว สารระเหย และสารที่มีความหนืด วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ สามารถวิเคราะห์ได้จากวิมาตรฐาน ASTM D 5373 ด้วยเครื่องมือ CHNSO Analyzer เนื่องจากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในชีวมวลเชื้อเพลิง สามารใช้การประเมินค่าความร้อน (Heating Value) ปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในชีวมวลมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความร้อน เนื่องจากเมื่อเกิดการเผาไหม้ คาร์บอนและไฮโดรเจนจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ในขณะที่ออกซิเจนมีผลทำให้ค่าความร้อนลดลง เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่ไม่ให้พลังงาน ดังนั้น การรู้ปริมาณของธาตุเหล่านี้สามารถใช้ในการคำนวณค่าความร้อนสูงสุด (Higher Heating Value: HHV) ได้ และการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุสามารถนำมาเปรียบเทียบกับถ่านหินหรือเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่น ๆ ได้ โดยชีวมวลที่มี O/C และ H/C ต่ำ มักมีสมบัติทางพลังงานใกล้เคียงกับถ่านหินลิกไนต์หรือบิทูมินัส

2.5.4 แผนภาพ van Krevelen (Van Krevelen Diagram)

แผนภาพ Van Krevelen สามารถใช้ประเมินระดับความเป็นถ่านหิน (coalification) โดยที่แกน X คือ อัตราส่วน O/C (โดย molar ratio) และ แกน Y คือ อัตราส่วน H/C (โดย molar ratio) โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งของวัสดุกับตำแหน่งมาตรฐานของถ่านหินในแต่ละระดับ เช่น พีต (peat) และลิกไนต์ (lignite) มี H/C และ O/C สูง ใกล้เคียงกับชีวมวล บิทูมินัส (bituminous coal) มี H/C และ O/C ลดลง และแอนทราไซท์ (anthracite) มีค่าทั้งสองต่ำที่สุด

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของวัสดุอินทรีย์ โดยเฉพาะชีวมวลในระหว่างกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน เช่น การทอร์รีแฟกชัน (torrefaction), ไพโรไลซิส (pyrolysis), และการเผาไหม้ (combustion) โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) กับออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) แผนภาพ Van Krevelen จึงเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการแสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงกันระหว่างชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนกับถ่านหิน การ

ลดลงของอัตราส่วน O/C และ H/C ของชีวมวลหลังจากการบำบัดด้วยความร้อน ทำให้ตำแหน่งบนแผนภาพเคลื่อนที่เข้าใกล้บริเวณของถ่านหินที่มีลำดับชั้นต่างๆ ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการเหล่านี้สามารถปรับปรุงสมบัติทางเคมีของชีวมวลให้คล้ายคลึงกับเชื้อเพลิงฟอสซิลมากขึ้น จึงแสดงถึงศักยภาพของกระบวนการในการเปลี่ยนชีวมวลให้มีสมบัติด้านพลังงานและความเสถียรใกล้เคียงกับถ่านหิน



ภาพที่ 2-5 แผนภาพ Van Krevelen ของถ่านหิน [41]

2.5.5 ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value; HHV)

ค่าความร้อนสูง หมายถึง ค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด ซึ่งรวมถึงค่าความร้อน แฝงที่ได้จากการกลั่นตัวเป็นไอ (ความร้อน แฝงในที่นี้คือค่าความร้อนเมื่อไอน้ำกลั่นตัวเป็นของเหลว) โดยค่าความร้อนในกรณีนี้พิจารณาว่าน้ำซึ่งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์จากการ เผาไหม้อยู่ในสภาพของเหลว โดยค่าความร้อนอาจรายงานในหน่วยต่างๆ กัน เช่น MJ/kg, BTU/lb, Cal/g, หรือ kCal/kg

2.5.6 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) เป็นเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีที่ใช้ไมเคิลสันอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michelson interferometer) ในการทำหน้าที่แยกแสงที่ผ่านออกจากเซลล์บรรจุสารตัวอย่างออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ เป็นการวัดปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนด้วยสารด้วยพลังงานในช่วงแสง

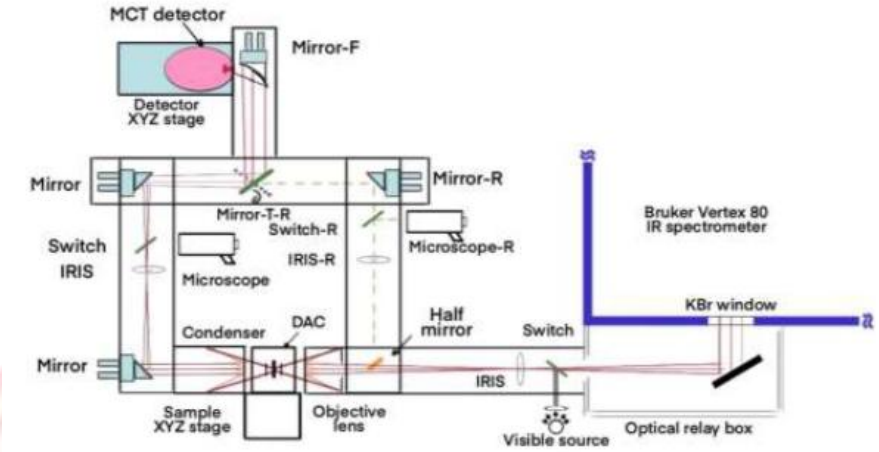
อินฟราเรด เนื่องจากโมเลกุลของสารดูดกลืนแสงอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของแสงอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป จึงใช้สันนิษฐานหมู่ฟังก์ชันในสารได้ โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้วแสงที่ผ่านมาแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของการส่องผ่านของแสงและเลขคลื่น

หลักการทำงานของเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ไมเคิลสันอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ที่มีหลายความถี่จากแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรด เข้าไปยังไมเคิลสันอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ แสงจะถูกส่งเข้าสู่ตัวแยกแสง โดยตัวแยกแสงจะทำหน้าที่แบ่งแยกแสง และแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง ทำให้ลำแสงจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ลำแสงครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่อยู่กับที่และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นลำแสงจะสะท้อนกลับมาที่ตัวแยกแสง จะเกิดการแทรกสอดเสริมหรือหักล้าง หรือการแทรกสอดแบบทำลายล้างของแต่ละความยาวคลื่น เรียกกว่า อินเทอร์เฟอโรแกรม (Interferogram) อินเทอร์เฟอโรแกรมที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันนั้นจะมีการสะท้อนไปที่ส่วนวางสารตัวอย่าง โดยตัวอย่างจะมีการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดไว้บางส่วน ในบางความยาวคลื่น ส่วนคลื่นอินฟราเรดที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะผ่านเข้าสู่ตัวตรวจวัด สัญญาณที่ได้คอมพิวเตอร์จะทำการแปลงสัญญาณอินเทอร์เฟอโรแกรมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Fourier Transform ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการแปลงจะถูกนำไปเขียนเป็นสเปกตรัมอินฟราเรดแสดงเป็นกราฟระหว่างปริมาณความเข้มของแสงกับความถี่หรือเลขคลื่น การดูดกลืนช่วงอินฟราเรดของโมเลกุลมีข้อกำหนดที่สำคัญ 2 ประการดังนี้

1. โมเลกุลนั้นต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) โมเลกุลหรือสารอนินทรีย์ที่มีความหนาแน่นของประจุ (charge density) แตกต่างกันระหว่างอะตอมทั้ง 2 จะให้การดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดได้ เรียกว่า IR active สำหรับโมเลกุลที่ประกอบด้วย 2 อะตอมที่เหมือนกัน จึงจะไม่มีความแตกต่างของความหนาแน่นประจุ การสั่นของโมเลกุลจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ จะไม่ให้การดูดกลืนคลื่นอินฟราเรด

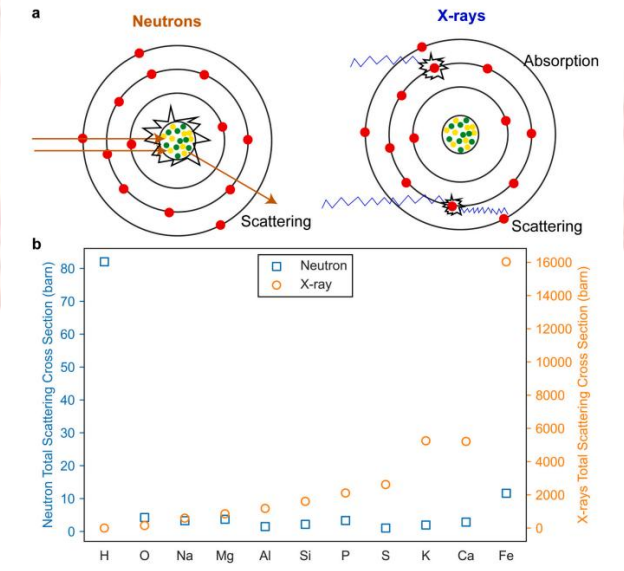
2. พลังงานของคลื่นอินฟราเรดที่ให้กับโมเลกุลจะต้องมีค่าที่พอดีกับผลต่างของระดับพลังงานการสั่นที่เกี่ยวข้องกับการแทรนซิชัน ลักษณะหรือรูปแบบการสั่นของพันธะที่อยู่ระหว่าง 2 อะตอม มีลักษณะหลายรูปแบบ มีการยืดหดตามแนวแกน (stretching) มีการงอ (bending) มีทั้งความยาวพันธะมีการเปลี่ยนแปลง และการสั่นแบบบิด (blending) ส่งผลให้มุมพันธะมีการเปลี่ยนแปลง การสั่นแบบบิดและแบบงอของแต่ละพันธะในโมเลกุลจะมีความถี่ของการสั่นตรงกับระดับพลังงานที่มีค่าแน่นอน เมื่อโมเลกุลได้รับคลื่นอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับการสั่นของโมเลกุล ก็จะดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดความถี่นั้น ทำให้เกิดการแทรนซิชันของการสั่น (vibrational transition) และให้แถบการดูดกลืนที่เป็นพีคแคบๆ พลังงานจากคลื่นอินฟราเรดที่ถ่ายเทให้แก่พันธะของโมเลกุลจะไปเพิ่มแอมพลิจูดของการสั่นโมเลกุลนั้น นั่นคือ โมเลกุลจะมีพลังงานมากกว่าปกติ เมื่อโมเลกุลกลับสู่สภาวะพื้น จะปล่อยพลังงานในรูปแบบความร้อนออกมา



ภาพที่ 2-6 หลักการทำงานของเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี [42]

2.5.7 เอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)

X-ray Fluorescence หรือ XRF เป็นเทคนิควิเคราะห์ธาตุที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยใช้หลักการที่ว่า เมื่ออะตอมในตัวอย่างได้รับพลังงานจากรังสีเอ็กซ์ อิเล็กตรอนในชั้นพลังงานในของอะตอมจะถูกกระตุ้นให้ออกจากวงโคจร ทำให้เกิดช่องว่างซึ่งจะถูกเติมเต็มโดยอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานที่สูงกว่า การเคลื่อนที่นี้ปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescent X-rays) ซึ่งมีพลังงานจำเพาะต่อธาตุแต่ละชนิด แสดงดัง**ภาพที่ 2.7** หลักการของ X-ray Fluorescence โดยที่เครื่อง XRF จะตรวจวัดรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่ปล่อยออกมา และแปลงเป็นสัญญาณเพื่อแสดงชนิดและปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่าง เทคนิคนี้ใช้สำหรับวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ตั้งแต่โซเดียม (Na) ถึงยูเรเนียม (U) ทั้งในรูปแบบของแข็ง ผง หรือของเหลว



ภาพที่ 2-7 หลักการของ X-ray Fluorescence [43]

2.5.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) เป็นการศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง ด้วยการใช้ลำอิเล็กตรอน (electron beam) ส่องกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างเพื่อให้เกิดอันตรกิริยานำมาแปลงเป็นสัญญาณประเภทต่างๆ แล้วแปลงผลรวมชนิดของสัญญาณประเภทนั้น ผลลัพธ์มาใช้งานเทคนิคนี้ คือภาพเสมือนสามมิติ ที่มีความละเอียดได้สูงถึงหลักสิบในหน่วยนาโนเมตร จากลักษณะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

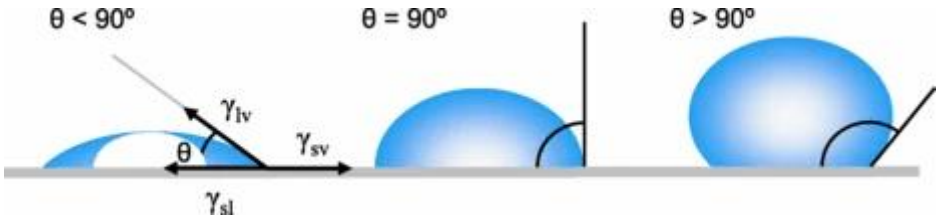
หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนหรือปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจำนวนมาก ซึ่งอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ผ่านชุดเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อบีบให้กลุ่มอิเล็กตรอนเป็นลำอิเล็กตรอน (electron beam) รวมถึงปรับขนาดและความเข้มของลำอิเล็กตรอน เพื่อความคมชัดจากนั้นคอยล์สวิตภาพ (scan coil) จะทำหน้าที่บังคับทิศทางของลำอิเล็กตรอนให้อยู่ในกรอบตามแนวตั้งและแนวนอนบนระนาบของผิวตัวอย่าง แล้วลำอิเล็กตรอนจะถูกบีบโฟกัสให้กระจอมยังไปบนผิวเป้าหมายของตัวอย่างด้วยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ในระหว่างที่การกระทบลำอิเล็กตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับตัวอย่างได้เป็นสัญญาณแตกต่างกันได้หลายประเภท เครื่องตรวจวัด (detector) จึงมีหลายประเภทเพื่อจับสัญญาณตามประเภทของสัญญาณนั้น เมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงชนกับพื้นผิววัตถุ จะเกิดอันตรกิริยาก่อให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons, SE) และอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (backscattered electrons, BSE) ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (detector) เพื่อแปลงเป็นภาพที่แสดงลักษณะพื้นผิวหรือความแตกต่างขององค์ประกอบธาตุในตัวอย่าง โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิให้ข้อมูลด้านลักษณะผิวที่ละเอียด ในขณะที่อิเล็กตรอนสะท้อนกลับให้ข้อมูลด้านความแตกต่างขององค์ประกอบธาตุเนื่องจากความต่างของเลขอะตอมเฉลี่ย [44]

2.5.9 การวิเคราะห์หามุมสัมผัส (Contact Angle Analysis)

การวิเคราะห์มุมสัมผัส (Contact Angle Analysis) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการประเมินสมบัติของพื้นผิวของวัสดุ โดยเฉพาะสมบัติด้านการเปียก (wettability) ซึ่งบ่งบอกถึงระดับความสามารถในการดูดซึมของพื้นผิวนั้น ๆ โดยทั่วไป มุมสัมผัสจะวัดจากมุมที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลว ที่หยดลงบนพื้นผิวของแข็ง และเส้นสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิว

มุมสัมผัสสามารถจำแนกสมบัติของวัสดุได้ [45] ดังนี้

- มุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา: วัสดุมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)
- มุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา: วัสดุมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic)
- มุมสัมผัสมากกว่า 150 องศา: วัสดุมีสมบัติซูเปอร์ไฮโดรโฟบิก (Superhydrophobic)



ภาพที่ 2-8 มุมสัมผัสสามารถจำแนกสมบัติของวัสดุ [45]

การวิเคราะห์หามุมสัมผัสมีเทคนิคหลากหลายวิธีที่ใช้ [46] ดังนี้

1. วิธีหยดนิ่ง (Sessile Drop Method): เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด โดยการวางหยดของเหลวบนพื้นผิวและถ่ายภาพด้านข้างของหยด จากนั้นจึงวิเคราะห์ภาพเพื่อวัดมุมที่เส้นสัมผัส วิธีนี้เหมาะสำหรับการวัดมุมสัมผัสสถิต (static contact angle)

2. วิธีหยดเลื่อน (Sliding Drop Method): วัดมุมสัมผัสขณะที่หยดของเหลวกำลังเคลื่อนที่บนพื้นผิว โดยวัดมุมสัมผัสด้านหน้า (advancing angle) และด้านหลัง (receding angle) วิธีนี้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพื้นผิวและแรงยึดเกาะ (adhesion)

3. วิธี Wilhelmy Plate: แผ่นของแข็งจะถูกจุ่มลงในของเหลว และแรงที่กระทำต่อแผ่นจะถูกวัดเพื่อคำนวณมุมสัมผัส วิธีนี้เหมาะสำหรับการวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือเป็นผง

4. วิธี Capillary Rise: วัดความสูงที่ของเหลวลอยขึ้นในหลอดแก้วขนาดเล็ก (capillary tube) มุมสัมผัสสามารถคำนวณได้จากความสูงของของเหลว รัศมีของหลอด และแรงตึงผิวของของเหลว

5. Dynamic Contact Angle Measurement: เทคนิคที่วัดมุมสัมผัสขณะที่ปริมาตรของหยดของเหลวมีการเปลี่ยนแปลง หรือขณะที่เส้นสัมผัสกำลังเคลื่อนที่บนพื้นผิว ให้ข้อมูลเกี่ยวกับพลศาสตร์ของการเปียก

2.5.10 การวิเคราะห์หาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC)

ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) คือ ปริมาณความชื้นที่วัสดุสามารถดูดซับไว้ได้จนกระทั่งเกิดภาวะสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ กล่าวคือ เมื่ออัตราการดูดซับและการคายความชื้นเท่ากัน ค่าดังกล่าวเป็นดัชนีสำคัญในการประเมินสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุชีวมวล เนื่องจากมีผลต่อพฤติกรรมการเก็บรักษา เสถียรภาพ และประสิทธิภาพในการเผาไหม้ โดยทั่วไป การวิเคราะห์หาค่า EMC จะกระทำภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่คงที่ ด้วยวิธีการทดลองแบบ gravimetric method ซึ่งใช้การชั่งน้ำหนักวัสดุเป็นระยะจนมวลของวัสดุมีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงของ EMC จะขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ ความละเอียดของผิว ความพรุน และองค์ประกอบทางเคมี เช่น กลุ่มฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) ที่สามารถดูดซับไอน้ำได้ดี ความสำคัญของ EMC มีบทบาทในหลายด้าน เช่น ชี้วัดความสามารถในการเก็บรักษาเชื้อเพลิงชีวมวล ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ หาก EMC สูง จะทำให้พลังงานบางส่วนถูก

ใช้เพื่อระเหยน้ำออกจากวัสดุก่อนเริ่มการเผาไหม้ มีผลต่อความเสี่ยงของการเกิดเชื้อราและการเน่าเสีย

2.5.11 สเปกโตรสโกปีรังสีเอกซ์แบบโฟโตอิเล็กตรอน (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

X-ray Photoelectron Spectroscopy หรือ XPS เป็นเทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวที่สามารถระบุชนิดธาตุออกซิเดชันสเตต (oxidation state) และสภาวะเคมีขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระดับพื้นผิวของวัสดุ (ประมาณ 1–10 นาโนเมตร) โดยอาศัยหลักการของเอฟเฟกต์โฟโตอิเล็กตริก (photoelectric effect) ในกระบวนการ XPS ตัวอย่างจะถูกยิงด้วยรังสีเอกซ์พลังงานสูง (เช่น Al Kα หรือ Mg Kα) ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานเฉพาะของอะตอมดูดซับพลังงานแล้วหลุดออกมาเป็นโฟโตอิเล็กตรอน เครื่องตรวจจับจะวัดพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนเหล่านี้ และคำนวณเป็นพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะของธาตุและสภาพแวดล้อมทางเคมีของอะตอมนั้น ๆ ข้อมูลที่ได้จาก XPS จึงช่วยให้สามารถวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุได้อย่างละเอียด ทั้งในแง่ขององค์ประกอบและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เช่น การเกิดออกไซด์ การเคลือบผิว หรือการยึดเกาะของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ กับพื้นผิว

บทที่ 3
วิธีดำเนินการ

3.1 เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์

3.1.1 เปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทอง จังหวัดระยอง

3.1.2 ก๊าซตัวกลาง

3.1.2.1 แก๊สไนโตรเจน (N_2 ความบริสุทธิ์ 99.999%)

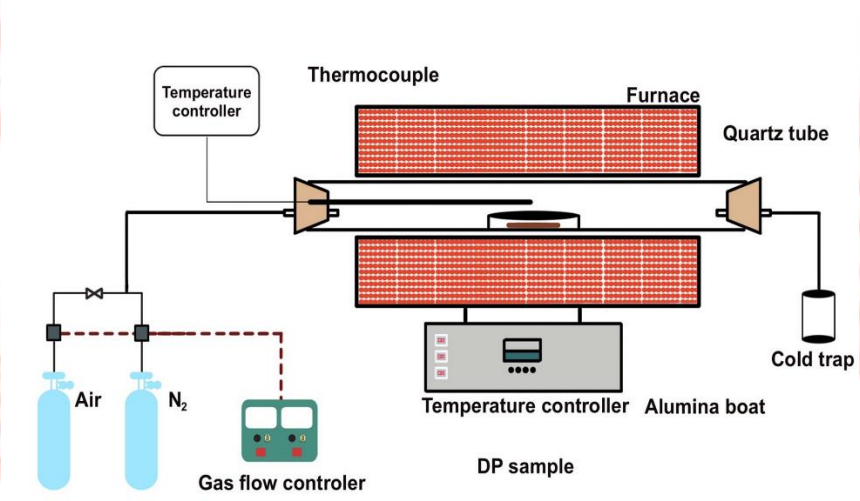
3.1.2.2 ออกซิเจน (Air zero)

3.1.3 เครื่องบด Universal Cutting Mill รุ่น PULVERISETTE 19 บริษัท Fritsch ใช้ตะแกรงคัดขนาด 4 มิลลิเมตร และ 250 ไมโครเมตร

3.1.4 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Electronic balance) รุ่น ME303 บริษัท Mettler Toledo

3.1.5 ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (Hot air oven) รุ่น FD53 บริษัท Binder

3.1.6 Torrefaction Horizontal Tube Reactor ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร และความยาว 50 เซนติเมตร



ภาพที่ 3-1 Torrefaction Horizontal Tube Reactor

3.1.7 บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร

3.1.8 เครื่องให้ความร้อนพร้อมปั่นกวนสารละลาย (Hotplate stirrer) รุ่น G-MAG HS 7 บริษัท IKA

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

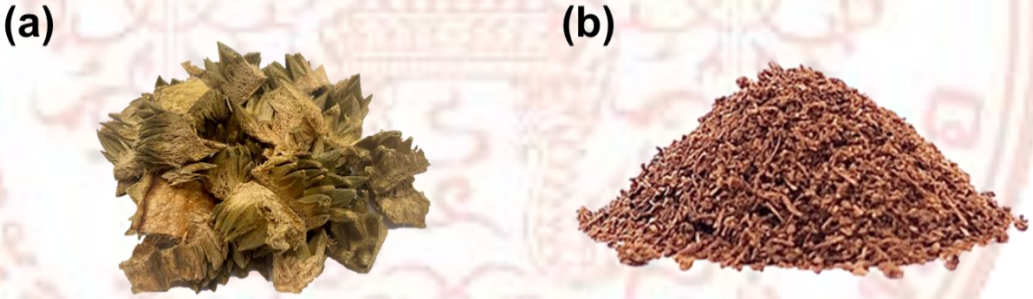
3.2.1 การเตรียมชีวมวล

1. นำเปลือกทุเรียนสดไปอบให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง



ภาพที่ 3-2 เปลือกทุเรียนอบแห้ง

2. นำเปลือกทุเรียนมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ให้ได้ขนาดประมาณ 5×5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปบดให้ได้ขนาดอนุภาค 250 ไมโครเมตร



ภาพที่ 3-3 เปลือกทุเรียน (a) ขนาดประมาณ 5×5 เซนติเมตร (b) ขนาดอนุภาค 250 ไมโครเมตร

3. นำเปลือกทุเรียนมาอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บในโถดูดความชื้น

3.2.2 การปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลด้วยกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน

3.2.2.1 การทดสอบผลของเวลา

1. ชั่งเปลือกทุเรียน 3 กรัม ใส่ลงใน Alumina boat
2. นำ Alumina boat ใส่เข้าไปในตรงกลางของรีแอคเตอร์ท่อควอตซ์
3. เปิดก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อให้ไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ออกซิเจนภายในท่อควอตซ์

4. เปิดสวิตช์ไฟของรีแอคเตอร์ ตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ โดยในการทดลองนี้ศึกษา อุณหภูมิ 220 240 260 280 และ 300 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศที่มีก๊าซไนโตรเจน และคงอุณหภูมิภายในรีแอคเตอร์ตามอุณหภูมิที่ศึกษาเป็นเวลา 0 15 และ 30 นาที
5. หยุดการทำงานของรีแอคเตอร์ แล้วปล่อยให้รีแอคเตอร์เย็นตัวลง จนถึงอุณหภูมิประมาณ 50 °C จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้ภายหลังผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชัน และเก็บตัวอย่างบรรจุงลงในขวดแก้ว
6. คำนวณร้อยละผลได้เชิงมวล ดังสมการที่ 3.1

$$\text{Mass yield} = \frac{M_{tor}}{M_{raw}} \times 100 \qquad (3.1)$$

โดยที่ M_{raw} คือ มวลของเปลือกทุเรียน (กรัม)
M_{tor} คือ มวลของเปลือกทุเรียนทอร์รีไฟด์ (กรัม)

7. ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ เรียกว่า ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน (TDP)

3.2.2.2 การทดสอบผลของความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซตัวกลาง

1. ชั่งน้ำหนักเปลือกทุเรียน 3 กรัม ใส่ลงใน Alumina boat
2. นำ Alumina boat ใส่เข้าไปในตรงกลางของรีแอคเตอร์ท่อควอตซ์
3. เปิดออกซิเจนเข้าท่อควอตซ์ตามปริมาณออกซิเจนร้อยละ 5 10 15 และ 21 ตามตารางที่ 3.1 แสดงอัตราการไหลของไนโตรเจนและออกซิเจนภายในรีแอคเตอร์ท่อควอตซ์
4. เปิดสวิตช์ไฟของรีแอคเตอร์ ตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ โดยในการทดลองนี้ศึกษา อุณหภูมิ 220 240 260 280 และ 300 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะบรรยากาศที่มีก๊าซไนโตรเจน และคงอุณหภูมิภายในรีแอคเตอร์ตามอุณหภูมิที่ศึกษาเป็นเวลา 30 นาที
5. หยุดการทำงานของรีแอคเตอร์ แล้วปล่อยให้รีแอคเตอร์เย็นตัวลง จนถึงอุณหภูมิประมาณ 50 °C จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้ภายหลังผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชัน และเก็บตัวอย่างบรรจุงลงในขวดแก้ว
6. คำนวณร้อยละผลได้เชิงมวล ดังสมการที่ 3.1
7. ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

ตารางที่ 3-1 สัดส่วนอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนในแก๊สผสมภายในระบบทอร์รีแฟกชัน

อัตราส่วนการไหลของแก๊สผสม (มิลลิลิตร/นาที)		ความเข้มข้นของออกซิเจน (ร้อยละ)
แก๊สไนโตรเจน	ออกซิเจน	
150	0	0
76	24	5
52	48	10
28	72	15
0	150	21

3.2.2.3 การทดสอบผลของการลดปริมาณขี้เถ้าด้วยวิธีการล้างด้วยน้ำ

1. ชั่งน้ำหนักเปลือกทุเรียน 20 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำ 400 มิลลิลิตรลงบีกเกอร์
3. นำบีกเกอร์วางลงบนเครื่องให้ความร้อน 60 °C พร้อมปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. เมื่อครบเวลาแล้วกรองน้ำออก นำไปอบที่ 70 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บในโถดูดความชื้น
5. นำเปลือกทุเรียนที่ล้างน้ำแล้วไปผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ที่สภาวะออกซิเจนร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ เรียกว่า TWDP

3.3 การวิเคราะห์สมบัติด้านเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์

3.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis)

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเปลือกทุเรียนโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนของเปลือกทุเรียนทอร์รีไฟด์โดยใช้ Thermogravimetric analyzer หรือ TGA (METTLER TOLEDO) ตามมาตรฐาน ASTM D7582 [47] ซึ่งผลการวิเคราะห์จะได้ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon, FC) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter, VM) และปริมาณเถ้า (Ash) ซึ่งมีวิธีทำดังนี้

1. ชั่งผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนประมาณ 3 กรัมใส่ลงในถ้วยอลูมินา
2. นำถ้วยอลูมินาวางลงบนเครื่องชั่งภายในเครื่อง TGA
3. ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนจะถูกให้ความร้อน ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที จะให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25 – 110 °C ละพักไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจะให้ความร้อนต่อจนถึง

อุณหภูมิ 900 °C หลังจากนั้นคงอุณหภูมิไว้แล้วเปลี่ยนจากก๊าซไนโตรเจนเป็นออกซิเจนเป็นเวลา 15 นาที

3.3.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุ (Ultimate analysis)

วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุที่สำคัญของเปลือกทุเรียน ซึ่งสามารถหาปริมาณร้อยละของธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) ด้วยเครื่อง CHNO Analyzer (J-Science JM10) ตามมาตรฐาน ASTM D5373-16 [48] ผลการวิเคราะห์คิดเป็นร้อยละธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดโดยน้ำหนักของเปลือกทุเรียน ซึ่งมีวิธีทำดังนี้

1. เริ่มจากนำถ้วยใส่ตัวอย่างเปล่าวางบนเครื่องชั่งน้ำหนัก
2. ใช้ช้อนตักตัวอย่างเพื่อเติมตัวอย่างลงถ้วยใส่ตัวอย่าง
3. ทำการปิดปากถ้วยใส่ตัวอย่าง พับเพื่อไม่ให้มีออกซิเจนอยู่ภายใน ปิดด้านบนของภาชนะแล้วพับขอบลงสองรอบเพื่อให้แน่ใจว่าตัวอย่างได้รับการปิดไว้ภายในอย่างแน่นหนา และตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีตัวอย่างรั่วไหล
4. นำเข้าเครื่องเข้าวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNO Analyzer

3.3.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Functional group)

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนโดยใช้ Fourier Transform Infrared Spectrometer หรือ FTIR (Bruker, alpha II)

1. ทำการบดผสมตัวอย่างกับโพตัสเซียมโบร์ไมด์ (KBr) ในอัตราส่วน 1:20 ให้ละเอียดเข้ากันด้วยโกร่ง
2. นำไปอัดเป็นแผ่นเรียกว่า KBr-disc
3. ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ด้วยตัวแปรต่างๆ ดังนี้

Range	:	400 – 4,000	cm^{-1}
Number of scans	:	16	รอบ/ครั้ง
Resolution	:	4.0	cm^{-1}
Interval	:	1.0	cm^{-1}

3.3.4 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุภายในขี้เถ้า

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุของขี้เถ้า โดยใช้ โดยใช้ X-ray Fluorescence Spectrometer ซึ่งสามารถตรวจหาองค์ประกอบได้ทั้งเชิงปริมาณของธาตุและเชิงคุณภาพของธาตุแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่ในเถ้าเปลือกทุเรียน มีวิธีทำดังนี้

1. อบเปลือกทุเรียนและผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เทผงลงใน sample cup ที่มีก้นบาง
3. วางตัวอย่างบน sample holder
4. กำหนดโปรแกรมการวิเคราะห์โดยกำหนดธาตุ Na, Mg, Al, Si, P, S, K และ Ca

3.3.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ (Morphology)

การวิเคราะห์โครงสร้างบริเวณพื้นผิวของเปลือกทุเรียนและก่อนและหลังกระบวนการทอร์รีแฟกชัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น QUANTA 450 มีวิธีทำดังนี้

1. อบเปลือกทุเรียนและผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. จากนั้นเทตัวอย่างลงบนแผ่นคาร์บอนที่วางอยู่บนจานตัวอย่าง
3. ใช้คีมคีบจานตัวอย่างออกจากอุปกรณ์วางจานใส่ตัวอย่าง
4. นำตัวอย่างไปใส่ในช่องเสียบตัวอย่างของสตรับ และนำตัวอย่างเข้าเครื่องวิเคราะห์

3.3.6 การวิเคราะห์หามุมสัมผัส

การวัดค่ามุมสัมผัสนั้นใช้หลักการ Sessile drop [31] เพื่อดูรูปร่างของหยดน้ำที่ตกลงบนพื้นผิวของเปลือกทุเรียนด้วยเทคนิค Contact angle มีวิธีทำดังนี้

1. อบเปลือกทุเรียนและผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. จากนั้นเทตัวอย่างลงบนเทปกาวจนทั่ว
3. นำไปวางบนเครื่อง Contact angle และหยดน้ำลงบนตัวอย่าง จากนั้นจับเวลา 20 วินาทีเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของหยดน้ำ

3.3.7 การวิเคราะห์หาความชื้นสมดุล

การวัดค่าความชื้นสมดุลจะทำโดยการปล่อยให้เปลือกทุเรียนสัมผัสกับออกซิเจนแวดล้อม ที่จะบ่งบอกถึงปริมาณความชื้นที่สามารถมีอยู่ได้ในวัสดุของสภาวะสิ่งแวดล้อมนั้นๆ ซึ่งจะควบคุมความชื้นเป็น 55% ใช้เวลา 24 ชั่วโมง [31] จากนั้นนำไปหาความชื้นสมดุลโดยใช้สมการที่แสดง ดังสมการที่ 3.2

$$EMC\ (\%) = \frac{M_{wet} - M_{dried}}{M_{dried}} \times 100 \qquad (3.2)$$

โดยที่ EMC หมายถึง การวัดค่าความชื้นสมดุล (ร้อยละ)

M_{wet} หมายถึง น้ำหนักหลังทำความชื้นสมดุล (กรัม)

M_{dried} หมายถึง น้ำหนักก่อนทำความชื้นสมดุล (กรัม)

3.3.8 ค่าความร้อนสูงสุด (Higher Heating Value, HHV)

ค่าความร้อนสูงของเปลือกทุเรียนก่อนและหลังกระบวนการทอร์รีแฟกชันได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ เพื่อทำนายค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวลหลังกระบวนการทอร์รีแฟกชัน โดยใช้สมการของ Friedl [49] ดังสมการที่ 3.3

$$HHV\ (MJ/kg) = 5.22C^2 - 319C - 1647H + 38.6CH + 133N + 21{,}028 \qquad (3.3)$$

โดยที่ HHV หมายถึง ค่าความร้อนสูง (เมกกะจูล/กิโลกรัม)

C หมายถึง ปริมาณคาร์บอน (ร้อยละ)

H หมายถึง ปริมาณไฮโดรเจน (ร้อยละ)

N หมายถึง ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละ)

3.3.9 Energy yield และ Carcon yield

ค่า Energy yield และ Carcon yield สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของค่าความร้อนสูงสุด และร้อยละผลได้เชิงมวล และร้อยละของคาร์บอนและร้อยละผลได้เชิงมวล โดยใช้สมการที่ 3.4 และ 3.5

$$\text{Energy yield} = \frac{HHV_{tor} \times \text{Mass yield}_{tor}}{HHV_{Raw}} \quad (3.4)$$

$$\text{Carbon yield} = \frac{\text{Carbon content}_{tor} \times \text{Mass yield}_{tor}}{\text{Carbon content}_{Raw}} \quad (3.5)$$

โดยที่ HHV_{tor} หมายถึง ค่าความร้อนสูงของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ (เมกกะจูล/กิโลกรัม)

HHV_{raw} หมายถึง ค่าความร้อนสูงของเปลือกทุเรียน (เมกกะจูล/กิโลกรัม)

Mass yield_{tor} หมายถึง ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ (ร้อยละ)

$\text{Carbon content}_{tor}$ หมายถึง ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ (ร้อยละ)

$\text{Carbon content}_{raw}$ หมายถึง ร้อยละผลได้เชิงมวลของเปลือกทุเรียน (ร้อยละ)

3.3.10 การวิเคราะห์สเปกโตรสโกปีรังสีเอกซ์แบบโฟโตอิเล็กตรอน

การวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นผิวเพื่อตรวจสอบพันธะเคมีที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว โดยใช้ X-Ray Photoelectron Spectroscopy (Kratos, axis ultra dld) การวิเคราะห์ดำเนินการภายใต้สภาวะสุญญากาศสูง โดยใช้รังสีเอกซ์ชนิด Al Kα และตรวจวัดสเปกตรัมแบบ wide scan เพื่อระบุองค์ประกอบธาตุ และแบบ high-resolution scan เพื่อวิเคราะห์สถานะเคมีของธาตุเฉพาะ คือ C1s และ O1s

บทที่ 4

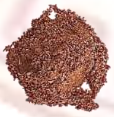
ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาสีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน

4.1.1 ผลของระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์

ผลการศึกษาสีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 0 15 และ 30 นาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน แสดงดัง**ตารางที่ 4.1** พบว่า สีของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันแล้ว จะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 220 °C ที่ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 0 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงมีสีน้ำตาลเข้ม เนื่องจากอุณหภูมิและระยะเวลายังไม่มากพอ ซึ่งอุณหภูมิที่สูงกว่า 280 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 15 นาที ผลิตภัณฑ์จะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีดำ และเมื่ออุณหภูมิที่สูงที่สุดและระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานที่สุด คือ อุณหภูมิที่ 300 °C ที่ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที จะเห็นได้ว่ามีสีที่เข้มมากที่สุด กล่าวคือ อุณหภูมิที่สูงขึ้นและระยะเวลาที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่นานขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ทีได้มีสีเข้มขึ้น [50] แสดงถึง การเกิดปฏิกิริยา Maillard Reaction ซึ่งในกระบวนการทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลและกรดอะมิโน ซึ่งกรดอะมิโนจะทำปฏิกิริยากับกลุ่มคาร์บอนิลของน้ำตาลเพื่อสร้างสารประกอบเชิงซ้อนที่ก่อให้เกิดกลิ่นและการเปลี่ยนสี ซึ่งสามารถทำให้เกิดสารที่มีสีเข้มและมีผลต่อสีของวัสดุชีวมวล [51]

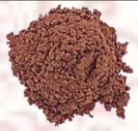
ตารางที่ 4-1 สีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 -300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 0 15 และ 30 นาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน

ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	220	240	260	280	300
0					
15					
30					

4.1.2 ผลของปริมาณออกซิเจนในแก๊สตัวกลาง

ผลการศึกษาสีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 แสดงดัง**ตารางที่ 4.2** พบว่า การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนมีสีที่เข้มขึ้น เมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นของปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น แต่ยังไม่เกิดการเผาไหม้เนื่องจากอุณหภูมิการจุดติดไฟของเปลือกทุเรียนจะสูงกว่าอุณหภูมิที่ศึกษา ซึ่งอุณหูมิการเผาไหม้ของเปลือกทุเรียนจะอยู่ในช่วง 130.2 – 481.9 °C [52] นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันแต่เพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สตัวกลางเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าสีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ได้มีสีที่เข้มขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น เปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์ररีแฟกชันที่อุณหภูมิ 260 °C ภายใต้ความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 5 จะมีสีที่เข้มกว่าความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 0 เนื่องจากออกซิเจนสามารถเร่งอัตราการสลายตัวชีวมวลจากความร้อนได้ ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ เป็นผลมาจากการสลายตัวของปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันและเร่งการสลายตัวของโมเลกุลขนาดใหญ่ในชีวมวลได้จากกระบวนการทางความร้อนเคมี ซึ่งทำให้ตัวอย่างเปลี่ยนสี [53] [14] การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนนั้นสามารถบ่งบอกถึงสมบัติของชีวมวลที่ดีขึ้น และจะถูกศึกษาสมบัติในหัวข้อถัดไป

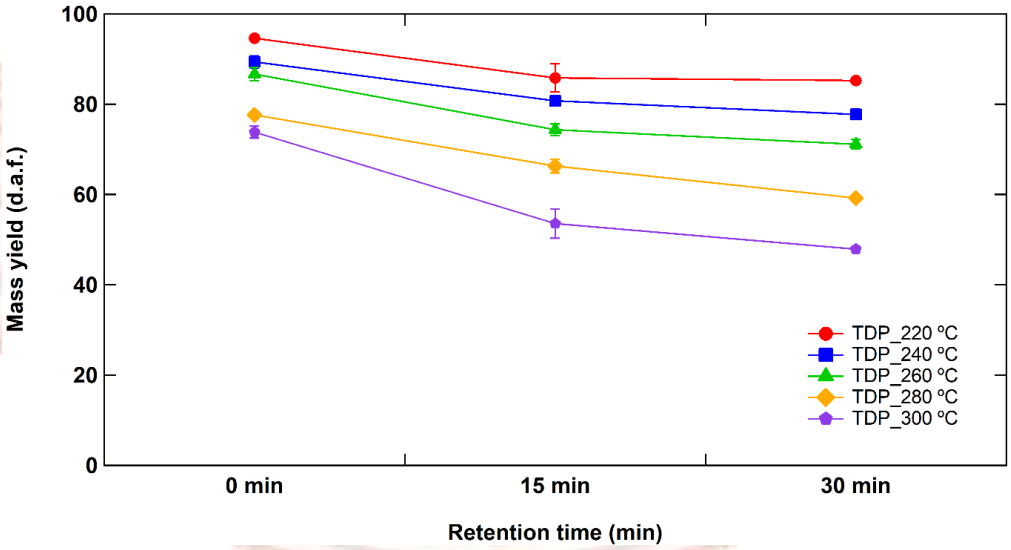
ตารางที่ 4-2 สีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 -300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาทีภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ

ความเข้มข้นของปริมาณออกซิเจน (%)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	220	240	260	280	300
0					
5					
10					
15					
21					

4.2 ผลการศึกษาร้อยละผลได้เชิงมวล

4.2.1 ผลของระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์

ผลการศึกษาร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 0 15 และ 30 นาที แสดงดัง**ภาพที่ 4.1** พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้เชิงมวลของเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนทอร์รีแฟกชันในสภาวะไนโตรเจน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 0 นาที ร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงจากร้อยละ 94.59 88.89 86.66 77.62 และ 73.82 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเพิ่มระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็น 15 นาที ร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงจากร้อยละ 85.83 81.64 74.34 66.30 และ 53.56 และที่ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มากที่สุดคือ 30 นาที ร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากร้อยละ 85.26 77.85 71.10 60.32 และ 47.87 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็น 15 นาทีและ 30 นาที ร้อยละผลได้เชิงมวลจะเริ่มช้าลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิต่ำ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาการสลายตัวจะเริ่มคงที่ที่ 30 นาที เนื่องจากเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน จึงเป็นระยะเวลาการคงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟกชันของเปลือกทุเรียน



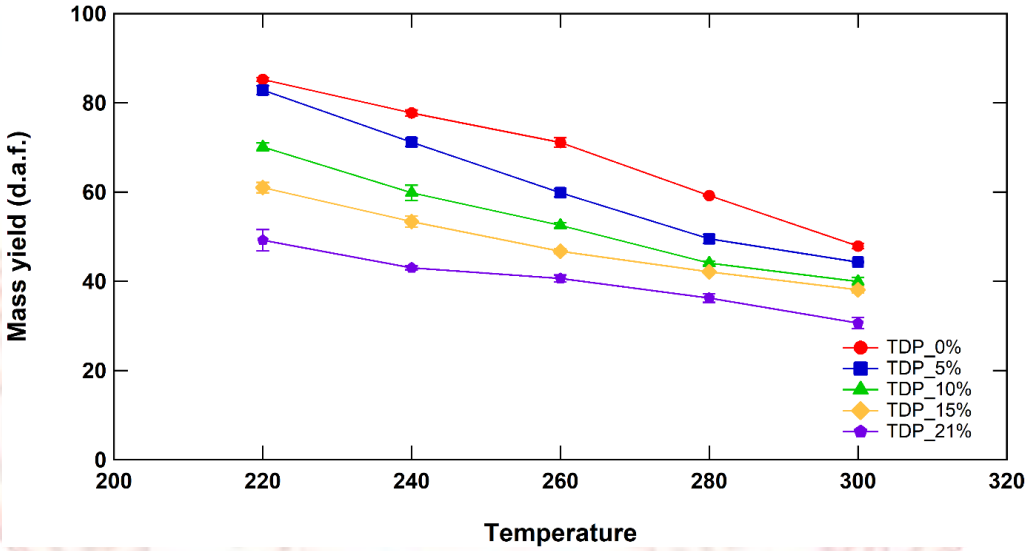
ภาพที่ 4-1 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 0 15 และ 30 นาที ภายใต้ในสภาวะไนโตรเจน

4.2.2 ผลของปริมาณแก๊สตัวกลางในออกซิเจน

ผลการศึกษาร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 แสดง**ดังภาพที่ 4.2** พบว่าภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความ

เข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ที่อุณหภูมิ 220 °C มีร้อยละผลได้เชิงมวลเป็นร้อยละ 85.26, 82.84, 70.12, 61.03, และ 48.81 ตามลำดับ อุณหภูมิ 240 °C มีร้อยละผลได้เชิงมวลเป็นร้อยละ 77.85, 71.17, 59.83, 53.40, และ 43.01 ตามลำดับ อุณหภูมิ 260 °C มีร้อยละผลได้เชิงมวลเป็นร้อยละ 71.10, 59.86, 52.55, 46.70 และ 40.60 ตามลำดับ อุณหภูมิ 280 °C มีร้อยละผลได้เชิงมวลเป็นร้อยละ 61.63, 49.50, 44.09, 42.09 และ 35.87 ตามลำดับ และอุณหภูมิ 300 °C ร้อยละผลได้เชิงมวลเป็นร้อยละ 47.87, 44.27, 39.97, 37.78 และ 30.63 ตามลำดับ

จากผลการทดลองปริมาณแก๊สตัวกลางในออกซิเจนจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละผลได้เชิงมวลมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากออกซิเจนที่เป็นแก๊สตัวกลางมีผลอย่างมากในปฏิกิริยาออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน สามารถช่วยเร่งการสลายตัวของเปลือกทุเรียน ส่งผลให้ร้อยละผลได้เชิงมวลมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน [54] โดยการสลายตัวที่มากขึ้นจะทำให้สมบัติเปลี่ยนแปลงในทางที่ดีขึ้น ซึ่งสมบัติของทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน เช่น ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ค่าความร้อน และความไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะถูกวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป



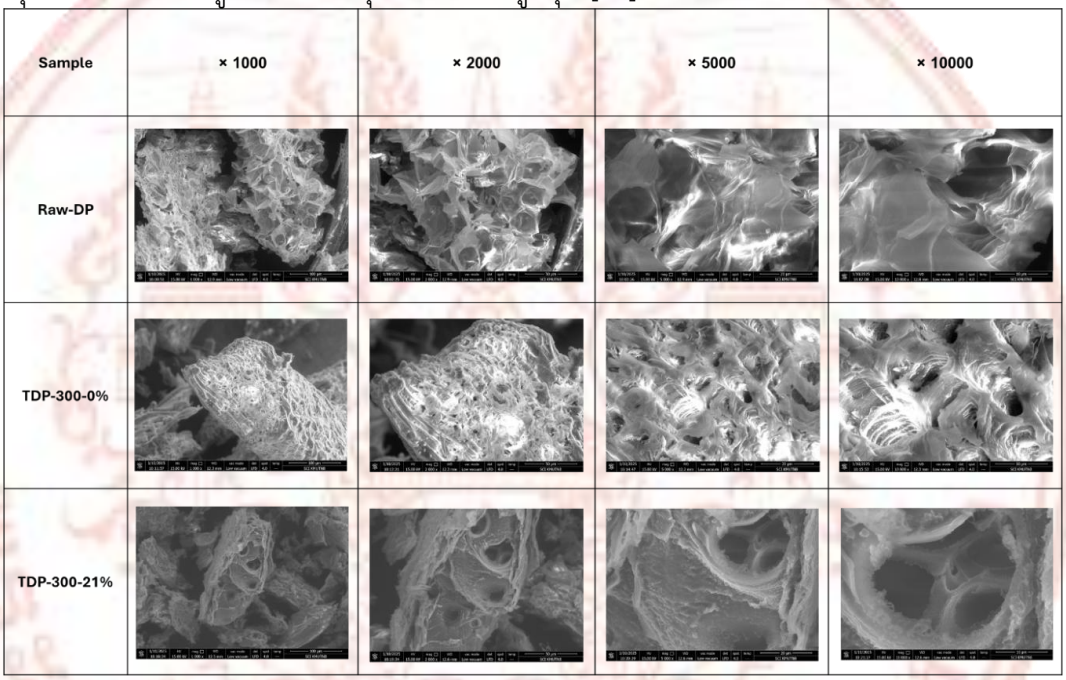
ภาพที่ 4-2 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ

4.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเปลือกทุเรียนและผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนร้อยละ 0 และ 21 ซึ่งลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดัง**ภาพที่ 4.3** พบว่า ตัวอย่างเปลือกทุเรียนที่ไม่ได้ผ่านการทอร์รีแฟกชันมีลักษณะเป็นเส้นใย พื้นผิวมีลักษณะไม่มีรอยแตกหรือรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันภายใต้สภาวะออกซิเจนร้อยละ 0 จะเห็นได้ว่ามีการเกิดรูพรุนเล็ก ๆ แสดงให้เห็นถึงการเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงของเปลือกทุเรียน อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการทอร์รีแฟกชันในสภาวะที่มีออกซิเจนร้อยละ

21 พบว่า รูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน มีลักษณะเป็นรูพรุนอย่างเด่นชัดมากกว่าสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนมีบทบาทสำคัญให้มีความเป็นรูพรุนสูงขึ้น และยังกระตุ้นให้เกิดการสลายตัวของเปลือกทุเรียน ซึ่งสอดคล้องกับผลของร้อยละผลได้เชิงมวล

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพนี้จะช่วยปรับปรุงทั้งพฤติกรรมทางความร้อนได้ โดยวัสดุที่มีรูพรุนสูงจะเอื้อต่อการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น คาดว่าผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ในออกซิเจนจะมีพฤติกรรมทางความร้อนที่ดีขึ้น อีกทั้งรูพรุนที่เพิ่มขึ้นยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ ซึ่งอาจส่งผลดีต่อการดูดซับหรือใช้ในกระบวนการอื่น ๆ เช่น การผลิตถ่านกัมมันต์ ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันจึงเป็นวิธีที่มีศักยภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติของเปลือกทุเรียนเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นหรือวัสดุสำหรับเตรียมตัวดูดซับหรือวัสดุที่มีความเป็นรูพรุน [55]



ภาพที่ 4-3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเปลือกทุเรียนและผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนร้อยละ 0 และ 21

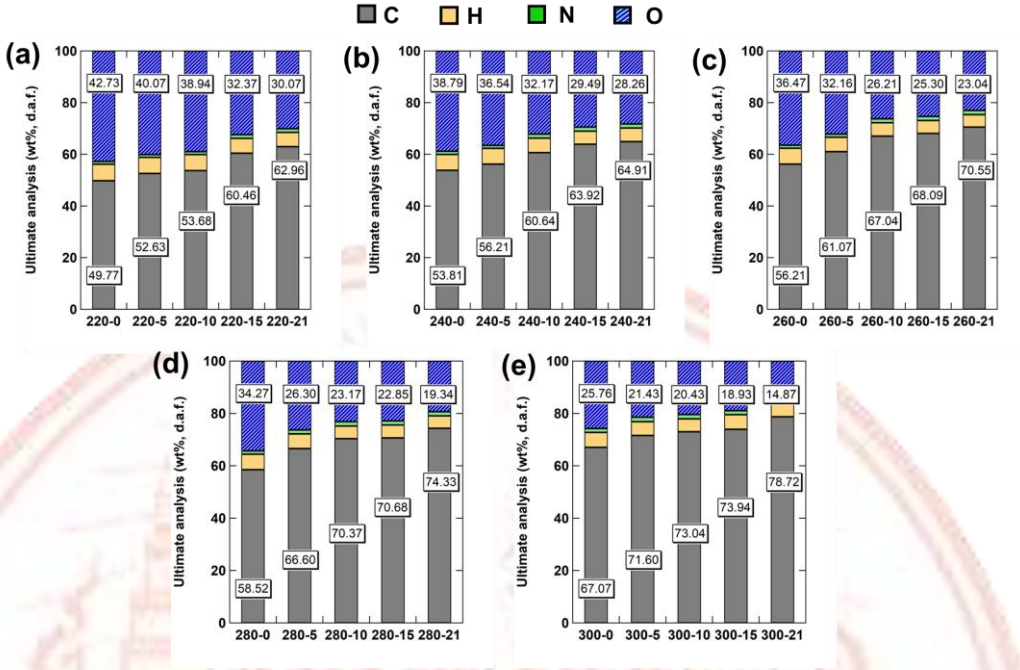
4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของธาตุ

ผลการศึกษาการวิเคราะห์ของเปลือกทุเรียนก่อนผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 48.00 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.50 ไนโตรเจนร้อยละ 1.06 และออกซิเจนร้อยละ 44.43 องค์ประกอบของเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที แสดงดัง**ภาพที่ 4.4** พบว่า ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางเท่ากัน แต่เพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ได้มีร้อยละคาร์บอนเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 0 ร้อยละคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 49.77 เป็น 53.81, 56.21, 58.52 และ

67.07 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 220 เป็น 240, 260, 280 และ 300 °C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีผลทำให้ร้อยละคาร์บอนเพิ่มขึ้น

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลาง ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ได้มีร้อยละคาร์บอนเพิ่มขึ้นเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 280 °C มีร้อยละคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 58.52 เป็น 66.60, 70.37, 70.68 และ 74.33 เมื่อปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็น 5 10 15 และ 21 ตามลำดับ และร้อยละคาร์บอนเพิ่มขึ้นอย่างมากที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 300 °C ร้อยละคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 67.07 เป็น 71.60, 73.04, 73.94 และ 78.72 เมื่อปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็น 5 10 15 และ 21 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางมีผลอย่างมากที่ทำให้ร้อยละคาร์บอนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีอิทธิพลมากกว่าอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิในการทำออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่เท่ากันเปรียบเทียบกับปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางที่เพิ่มขึ้น จะทำให้มีร้อยละของคาร์บอนมากกว่า ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 260 °C จะมีคาร์บอนร้อยละ 56.21 และ 70.55 โดยมีปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 0 และ 21 ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของธาตุสามารถสรุปได้ คือ ออกซิเจนสามารถใช้แทนแก๊สเฉื่อยได้ในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน เนื่องจากออกซิเจนสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนได้ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบดีมากยิ่งขึ้น คือ ร้อยละคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ 300 °C และปริมาณออกซิเจนที่ร้อยละ 21 ดังนั้น การควบคุมทั้งสองปัจจัยนี้มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ และยังสามารถลดอุณหภูมิลงได้โดยการเพิ่มปริมาณออกซิเจน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับกระบวนการดั้งเดิมที่ไม่ใช้ออกซิเจน หากต้องการลดอุณหภูมิในกระบวนการ สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนเพื่อคงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 260 °C ที่มีปริมาออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 10 ร้อยละคาร์บอนที่เท่ากันเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 300 °C ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน หรือที่อุณหภูมิ 260 °C ที่ปริมาณออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 21 ก็ยังมีร้อยละคาร์บอนที่เท่ากันกับอุณหภูมิ 280 °C ที่มีปริมาณออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 15 แสดงให้เห็นว่า การใช้ร้อยละออกซิเจนที่เหมาะสม สามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการได้ ซึ่งอาจช่วยลดต้นทุนพลังงานโดยยังคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับกระบวนการแบบดั้งเดิม



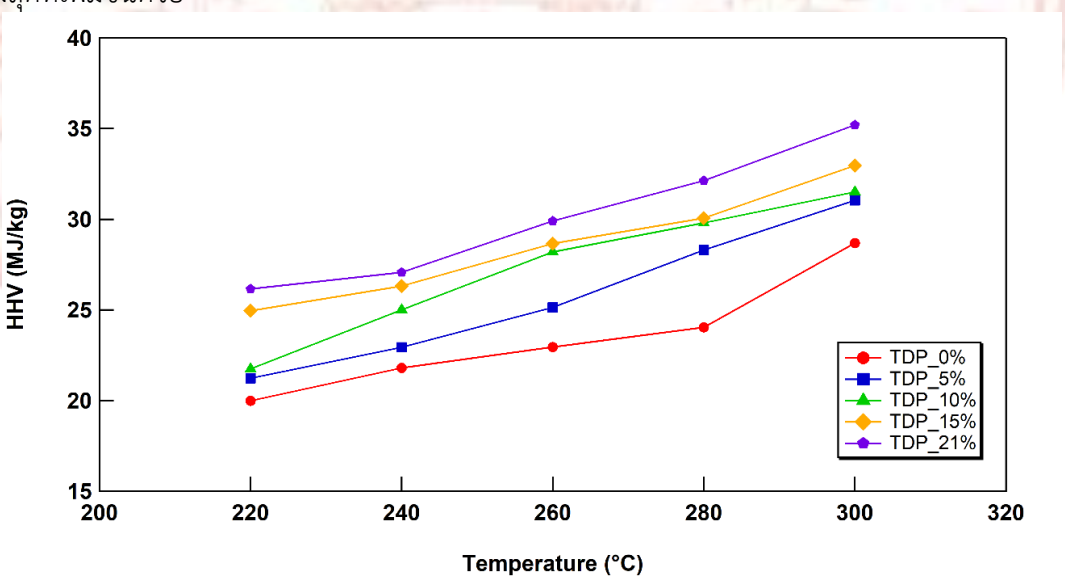
ภาพที่ 4-4 ปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (a) 220 °C (b) 240 °C (c) 260 °C (d) 280 °C และ (e) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณออกซิเจน (%)	C	H	N	O
		(%d.a.f)			
เปลือกทุเรียน		48.00	6.50	1.06	44.43
220	0	49.77	6.39	1.11	42.73
	5	52.63	6.20	1.09	40.07
	10	53.68	6.24	1.14	38.94
	15	60.46	5.74	1.43	32.37
	21	62.96	5.54	1.43	30.07
240	0	53.81	6.14	1.25	38.79
	5	56.21	6.10	1.15	36.54
	10	60.64	5.64	1.55	32.17
	15	63.92	5.07	1.53	29.49
	21	64.91	5.30	1.54	28.26
260	0	56.21	6.13	1.19	36.47
	5	61.07	5.57	1.19	32.16
	10	67.04	5.19	1.55	26.21
	15	68.09	5.03	1.55	25.30
	21	70.55	4.81	1.60	23.04
280	0	58.52	5.93	1.28	34.27
	5	66.60	5.59	1.52	26.30
	10	70.37	4.82	1.64	23.17
	15	70.68	4.89	1.58	22.85
	21	74.33	4.72	1.62	19.34
300	0	67.07	5.71	1.46	25.76
	5	71.60	5.24	1.72	21.43
	10	73.04	4.88	1.66	20.43
	15	73.94	5.62	1.51	18.93
	21	78.72	4.84	1.56	14.87

4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง

ผลการศึกษาค่าความร้อนสูงสุดของเปลือกทุเรียนที่ยังไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันมีค่า 19.22 เมกกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 แสดง**ดังภาพที่ 4.5** พบว่า ที่อุณหภูมิ 220 °C มีค่าความร้อนสูงสุด 19.98 เมกกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเปลือกทุเรียนยังไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 300 °C จะมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 28.69 เมกกะจูล/กิโลกรัม ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 0 ยิ่งไปกว่านั้น การเพิ่มปริมาณปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางเข้าไปในกระบวนการ จะส่งผลให้ค่าความร้อนสูงสุดเพิ่มขึ้นเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 260 °C จะมีค่าความร้อนสูงสุดจาก 22.95 เป็น 25.13, 28.20, 28.66 และ 29.90 เมกกะจูล/กิโลกรัม เมื่อปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็น 5 10 15 และ 21 นาทีตามลำดับ ค่าความร้อนสูงสุดที่มากที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 300 °C ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 21 ซึ่งเป็นอุณหภูมิและความเข้มข้นในออกซิเจนที่มากที่สุด ส่งผลให้ความร้อนสูงสุดเป็น 35.21 เมกกะจูล/กิโลกรัม จากผลการทดลองสรุปได้ว่าอุณหภูมิและปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางมีผลทำให้เปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันจะมีค่าความร้อนสูงสุดเพิ่มขึ้น เนื่องจากออกซิเจนที่เป็นแก๊สตัวกลางส่งผลให้เกิดการกำจัดออกซิเจนออก ส่งผลให้ปริมาณร้อยละของคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนเพิ่มขึ้น ทำให้เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าความร้อนสูงสุด จะได้ค่าความร้อนสูงสุดที่เพิ่มขึ้นด้วย

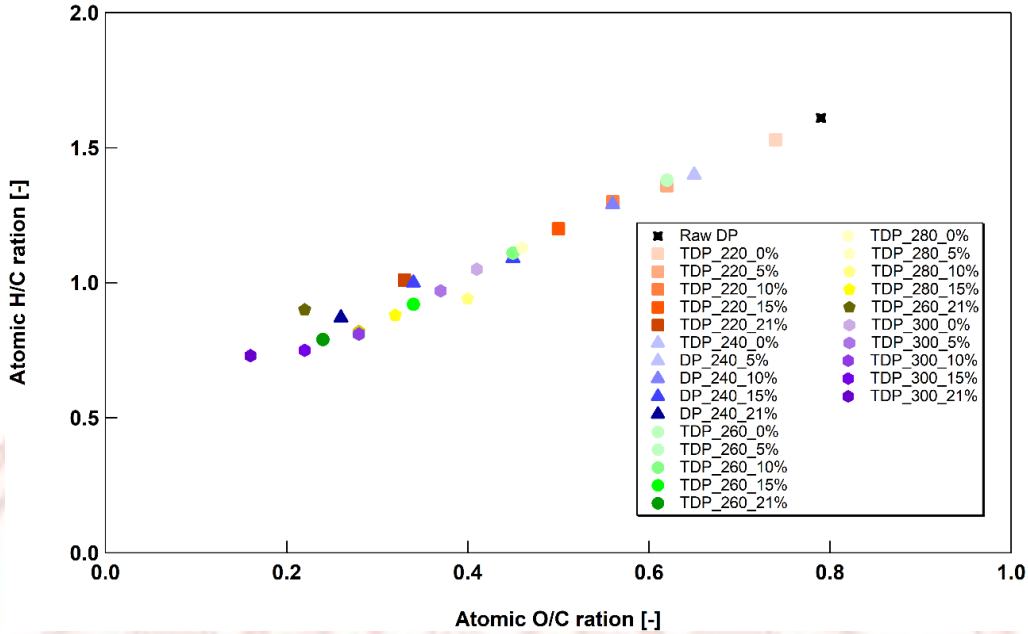


ภาพที่ 4-5 ค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ

4.6 ผลการวิเคราะห์แผนภาพของ Van Krevelen

ความแตกต่างระหว่างเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน และผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน สามารถแสดงผ่านแผนภาพ โดยใช้ Van Krevelen ดัง**ภาพที่ 4.6** ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบ ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ในรูปแบบของสัดส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และ ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) พบว่า อัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C ของเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟหชันมีค่า 1.61 และ 0.79 ตามลับดับ เมื่อนำเปลือกทุเรียนไปผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ที่อุณหภูมิ 220 °C มีอัตราส่วนอะตอม H/C มีค่า 1.15, 1.40, 1.38, 1.13 และ 1.05 ตามลำดับ O/C มีค่า 0.74, 0.65, 0.62, 0.46 และ 0.41 ตามลำดับ อุณหภูมิ 240 °C มีอัตราส่วนอะตอม H/C มีค่า 1.36, 1.29, 1.11, 0.97 และ 0.94 ตามลำดับ O/C มีค่า 0.62, 0.56, 0.45, 0.40 และ 0.37 ตามลำดับ อุณหภูมิ 260 °C มีอัตราส่วนอะตอม H/C มีค่า 1.30, 1.09, 0.82, 0.88 และ 0.81 ตามลำดับ O/C มีค่า 0.56, 0.45, 0.34, 0.32 และ 0.28 ตามลำดับ อุณหภูมิ 280 °C มีอัตราส่วนอะตอม H/C มีค่า 1.20, 1.00, 0.82, 0.81 และ 0.75 ตามลำดับ O/C มีค่า 0.50, 0.34, 0.28, 0.26 และ 0.22 ตามลำดับ และ อุณหภูมิ 300 °C มีอัตราส่วนอะตอม H/C มีค่า 1.01, 0.87, 0.79, 0.75 และ 0.73 ตามลำดับ O/C มีค่า 0.33, 0.26, 0.24, 0.22 และ 0.16 ตามลำดับ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนจะมีอัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C ที่ลดลง โดยอัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C มีลักษณะเปลี่ยนแปลงเฉียงไปทางซ้ายล่าง แสดงถึงการกำจัดปริมาณความชื้นที่อยู่ในชีวมวลซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งของกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน เนื่องจากกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน เป็นกระบวนการทางความร้อน ซึ่งเปลือกทุเรียนจะได้รับความร้อน และเกิดการสลายพันธะโควาเลนต์ (Covalent) ในโครงสร้างเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ออกซิเจนจำนวนมากถูกกำจัดออกไปในรูปของ H_2O และ CO_2 ด้วยปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ทำให้เกิดการสูญเสียในรูปแบบสารระเหยที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบา ส่งผลให้สัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน และสัดส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมีค่าลดลง [56]



ภาพที่ 4-6 แผนภาพ Van Krevelen ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ

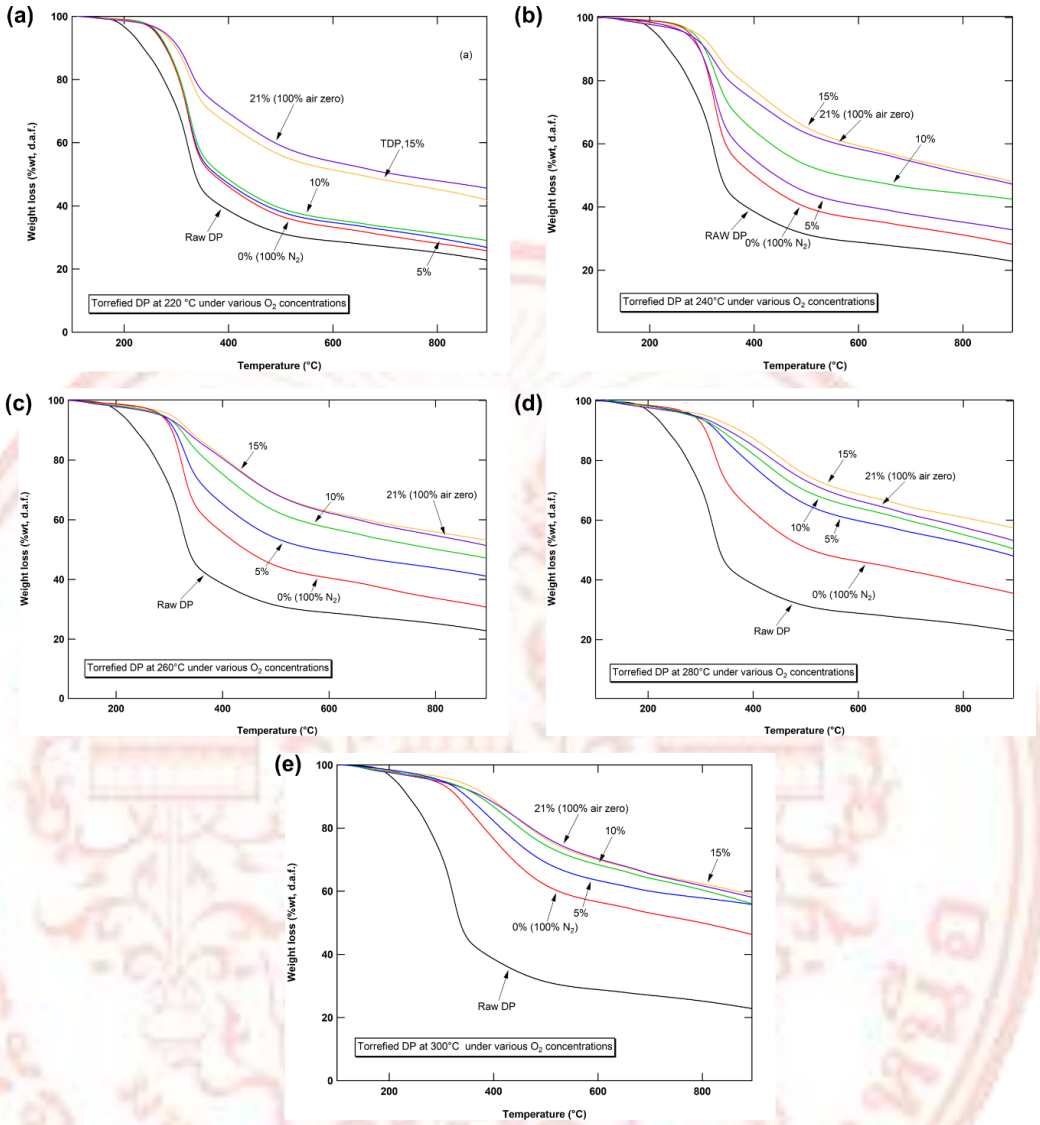
4.7 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน

ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ แสดงดัง **ภาพที่ 4.7** การสลายตัวของเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน (กราฟเส้นสีดำ) จะมีการสลายตัวเร็วที่สุด ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิเป็น 220 °C ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 0, 5 และ 10 กราฟที่ได้จะมีลักษณะเลื่อนไปทางขวา และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางเป็นร้อยละ 15 และ 21 ในกระบวนการทอร์รีแฟกชัน กราฟผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนจะมีความเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด คือ เส้นจะแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ซึ่งที่อุณหภูมิเป็น 240 และ 260 °C ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนเป็นร้อยละ 15 และ 21 ลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกันของผลิตภัณฑ์บ่งชี้ว่าพฤติกรรมของกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันมีความคล้ายคลึงกัน และผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 280 และ 300 °C จะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเลื่อนไปทางขวามากขึ้น แต่ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางเป็นร้อยละ 21 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟมีลักษณะที่ตกลงมาต่ำกว่าที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนเป็นร้อยละ 15 ซึ่งแตกต่างจากอุณหภูมิอื่น

ซึ่งการทำทอรีไฟด์ที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 21 อาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือเกิดการเผาไหม้บางส่วน (Partial combustion) เกิดขึ้นในเปลือกทุเรียนระหว่างการทอร์รีแฟกชัน ปริมาณออกซิเจนสูงอาจกระตุ้นให้ผลิตภัณฑ์ทอรีไฟด์เกิดการแตกตัวของสารประกอบอินทรีย์มากขึ้น ทำให้วัสดุสูญเสียมวลง่ายขึ้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิส [57] ส่งผลให้ความเสถียรทางความร้อนในผลิตภัณฑ์ที่สภาวะนี้ลดลง ทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์มากกว่า

เมื่อพิจารณาที่ร้อยละผลได้ไบโอชาร์ (Char yield) ที่ 900 °C เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันมีค่าร้อยละผลได้ไบโอชาร์ ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการทอร์รีแฟกชัน โดยมีร้อยละผลได้ไบโอชาร์ประมาณร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ 900 °C เมื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 220 °C จะมีค่าร้อยละผลได้ไบโอชาร์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแนวโน้มนี้ยังคงต่อเนื่อง ในอุณหภูมิ 240 และ 260 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนในกระบวนออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน ส่งผลให้มีค่าร้อยละผลได้ไบโอชาร์ไว้ได้มากขึ้น ในทางตรงกันข้าม การมีออกซิเจนในบรรยากาศกระบวนการจะเร่งการสลายตัวขององค์ประกอบคาร์บอน ส่งผลให้ไบโอชาร์ลดลง และที่อุณหภูมิ 280 และ 300 °C ไบโอชาร์ที่สูงที่สุดยังคงได้จากผลิตภัณฑ์ที่ทอร์รีไฟด์ในสภาวะออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 15 ขณะที่สภาวะออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 21 จะลดลง ดังนั้น ที่อุณหภูมิสูงและปริมาณออกซิเจนที่มีปริมาณมาก จะเกิดการเผาไหม้บางส่วนขึ้นบนพื้นผิวของเปลือกทุเรียน ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิว ส่งผลให้ผลได้ไบโอชาร์ลดลง [58]

จากผลการทดลอง ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเปลือกทุเรียนที่ยังไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างในองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกทุเรียนก่อนและหลังผ่านการปรับปรุงระยะการสูญเสียมวล ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายที่เหลือจะถูกเรียกว่า คาร์บอนคงที่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 900 °C เป็นผลมาจากการสลายตัวด้วยความร้อนที่เกิดจากการปล่อยสารระเหยการสลายตัวของไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนคงตัวจนการทำให้เป็นถ่าน ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีต่อความเป็นเชื้อเพลิง [59] มีความคงทนและเสถียรมากขึ้นเนื่องจากการทอร์รีแฟกชันทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์แน่นขึ้น [56] ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่แตกตัวง่ายหรือสูญเสียคาร์บอนในระหว่างการเก็บรักษาและยังมีการเผาไหม้ที่ยาวนานขึ้น ซึ่งผลผลิตของคาร์บอนคงที่ที่เหลือมากขึ้นและทนต่อความร้อนมากขึ้นมีประโยชน์หลายด้านที่สามารถนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรมและการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น การผลิตคาร์บอน ฮาร์ดคาร์บอน ไบโอชาร์ วัสดุดูดซับต่าง ๆ หรือนำไปใช้ในแบตเตอรี่หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือเชื้อเพลิง เป็นต้น เป็นการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนที่มีประสิทธิภาพสูง



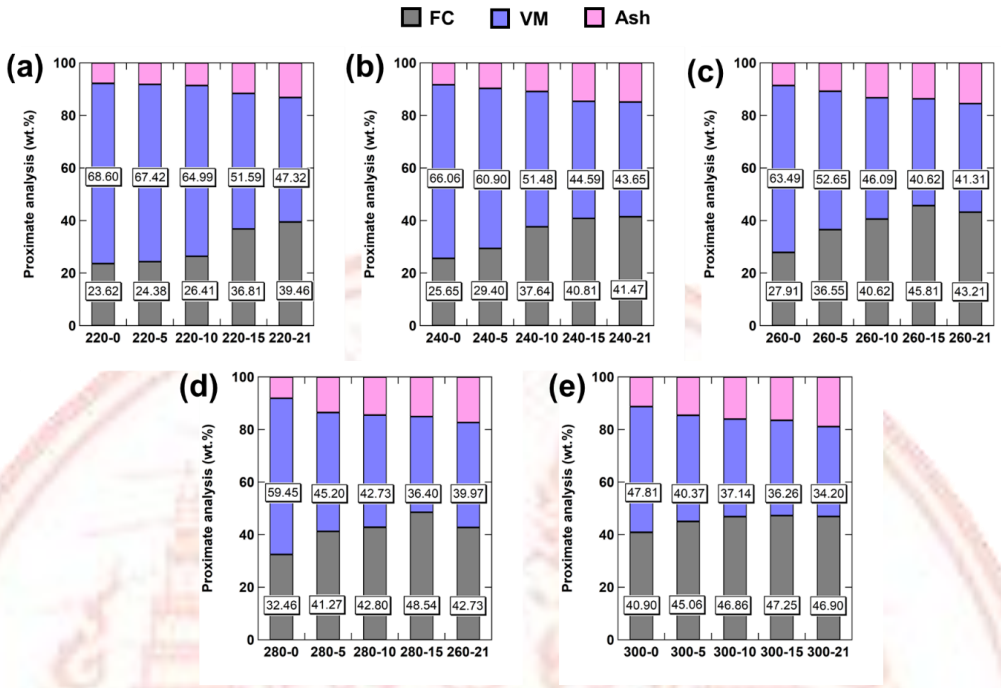
ภาพที่ 4-7 การสลายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (a) 220 °C (b) 240 °C (c) 260 °C (d) 280 °C และ (e) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ

4.8 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ

การวิเคราะห์แบบประมาณมาจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการสลายตัวทางความร้อน เนื่องจากสามารถวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัว (F.C.) สารระเหย (VM) และเถ้า (Ash) ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 แสดงดัง**ภาพที่ 4.8** พบว่า เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน มีค่าคาร์บอนคงตัวร้อยละ 21.11 สารระเหยร้อยละ 72.12 และเถ้าร้อยละ 6.78 ในกระบวนการทอร์รีแฟกชันที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนร้อยละ 0 จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพของเชื้อเพลิงให้ได้ตามระดับ

ที่ต้องการ ซึ่งจะมีค่าคาร์บอนคงตัวร้อยละ 22.62 25.65 27.91 32.46 และ 40.90 ที่อุณหภูมิ 220 240 260 280 และ 300 °C ตามลำดับ โดยที่สารระเหยจะลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในกระบวนการ เช่น ที่อุณหภูมิ 240 °C มีค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25.65 29.40 37.64 40.81 และ 41.47 ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันสามารถคายพลังงานออกมาได้ จึงทำให้กระบวนการนี้ใช้พลังงานน้อยกว่า และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบหลักในเปลือกทุเรียน ได้แก่ สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้าโดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นและปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่มีออกซิเจนมากที่สุดคือร้อยละ 21 ปริมาณเถ้าจะสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งจะมีปริมาณเถ้า 13.20 14.89 15.48 17.30 และ 18.90 อุณหภูมิ 220 240 260 280 และ 300 °C ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่า การออกซิเดชันที่พื้นผิวสามารถทำให้ส่วนประกอบที่สามารถเผาไหม้ในเปลือกทุเรียนถูกใช้งานไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่มีออกซิเจนร้อยละ 15 และ 21 มีค่าลดลงจากร้อยละ 47.25 เป็น 46.90 ตามลำดับที่อุณหภูมิ 300 °C ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มากที่สุดมีค่าร้อยละ 48.54 ที่อุณหภูมิ 280 °C

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณสารระเหยมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสารระเหยที่มีน้ำหนักเบาจำนวนมากจะถูกปล่อยออกมาในกระบวนการปรับปรุงชีวมวลซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายและสลายตัวขององค์ประกอบอินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสบางส่วน และลิกนินเล็กน้อย เนื่องจากลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่ของหน่วยอะโรมาติกที่มีเสถียรภาพทางความร้อนค่อนข้างสูง ดังนั้นการย่อยสลายทางความร้อนของลิกนินจึงต่ำมากในกระบวนการเผาชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส และการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันในออกซิเจนยังส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนมากขึ้น แต่การใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้เกิดการออกซิเดชันของเฮมิเซลลูโลสอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้คาร์บอนคงตัวลดลง [60] ดังนั้น การเลือกปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันจะมีผลต่อคุณภาพของเชื้อเพลิงของเปลือกทุเรียน โดยในกระบวนการที่อุณหภูมิต่ำควรเพิ่มตัวออกซิเดชันมากขึ้น ขณะที่ในกระบวนการที่อุณหภูมิสูง ควรเพิ่มตัวออกซิเดชันน้อยลงเพื่อปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงให้ดีที่สุด ซึ่งสามารถช่วยลดต้นทุนในการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลได้ [61]



ภาพที่ 4-8 การวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (a) 220 °C (b) 240 °C (c) 260 °C (d) 280 °C และ (e) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่าง ๆ

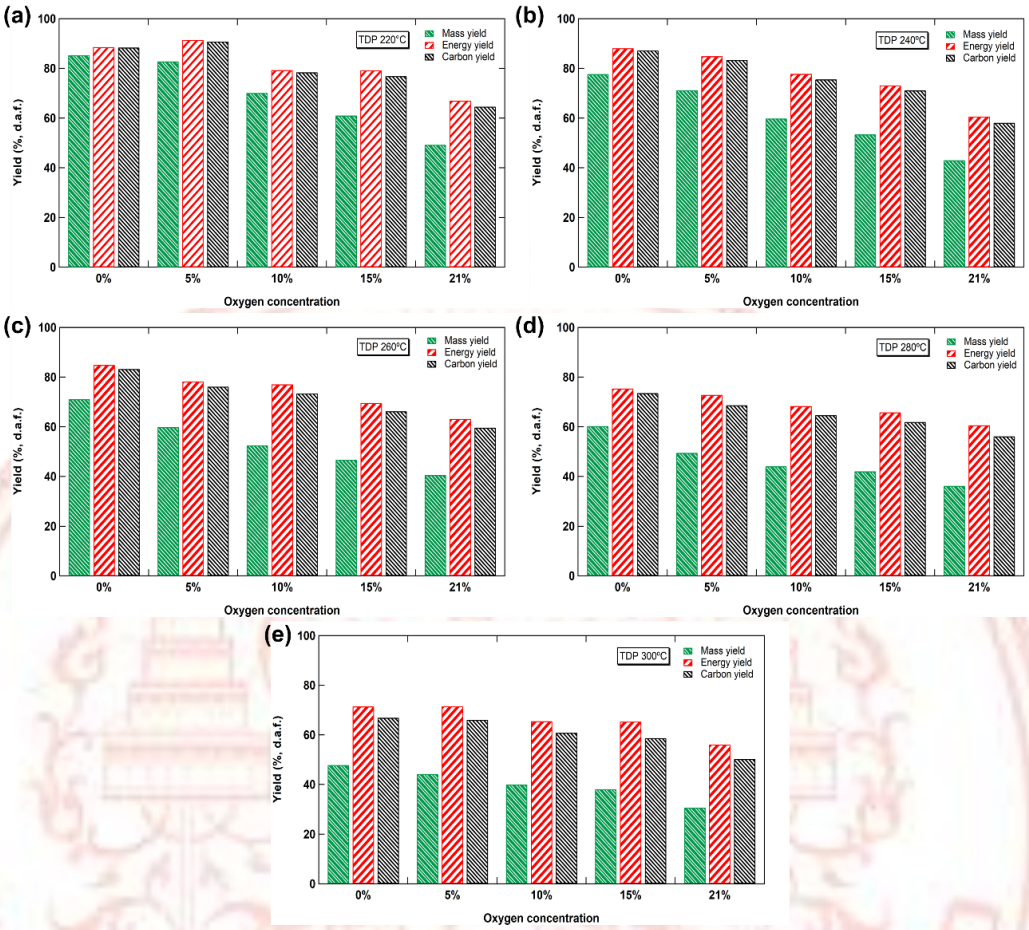
อุณหภูมิ	ปริมาณออกซิเจน (%)	VM	FC	Ash
		(%dry basis)		
เปลือกทุเรียน		72.12	21.11	6.78
220	0	68.60	23.62	7.78
	5	67.42	24.38	8.20
	10	64.99	26.41	8.60
	15	51.59	36.81	11.60
	21	47.34	39.46	13.20
240	0	66.06	25.65	8.28
	5	60.90	29.40	9.70
	10	51.48	37.64	10.88
	15	44.59	40.81	14.60
	21	43.65	41.47	14.89
260	0	63.49	27.91	8.60
	5	52.65	36.55	10.80
	10	46.09	40.62	13.29
	15	40.62	45.71	13.67
	21	41.31	43.21	15.48
280	0	59.45	32.46	8.09
	5	45.20	41.27	13.53
	10	42.73	42.80	14.47
	15	36.40	48.54	15.05
	21	39.97	42.73	17.30
300	0	47.81	40.90	11.29
	5	37.01	48.41	14.57
	10	36.97	47.03	16.00
	15	36.26	47.25	16.48
	21	34.20	46.90	18.90

4.9 ผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้เชิงมวล Energy yield และ Carbon yield

ผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้เชิงมวล Energy yield และ Carbon yield ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 แสดงดัง**ภาพที่ 4.9** พบว่า เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันและปริมาณออกซิเจนในแก๊สตัวกลางเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่า Energy Yield ลดลง คือ ความเข้มข้นของปริมาณออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ที่อุณหภูมิ 220 °C มีค่า Energy yield ร้อยละ 88.26, 91.49, 79.35, 79.22, และ 67.01 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิเป็น 240 °C จะมีค่า Energy yield ร้อยละ 88.12, 84.90, 77.80, 73.13, และ 60.55 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิเป็น 260 °C มีค่า Energy yield ร้อยละ 84.90, 78.27, 77.09, 69.61, และ 63.15 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิเป็น 280 °C จะมีค่า Energy yield ร้อยละ 75.41, 72.87, 68.36, 65.81, และ 60.62 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิเป็น 300 °C จะมีค่า Energy yield ร้อยละ 71.44, 71.47, 65.52, 65.36, และ 56.11 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่ Carbon yield จะแสดงถึง ร้อยละของปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในเปลือกทุเรียนเริ่มต้นที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของแข็งหลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันแล้ว พบว่าความเข้มข้นของปริมาณออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ที่อุณหภูมิ 220 °C มีค่า Carbon yield ร้อยละ 88.40, 90.83, 78.43, 76.87, และ 64.58 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิเป็น 240 °C จะมีค่า Carbon yield ร้อยละ 87.17, 83.35, 75.58, 71.11, และ 58.16 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิเป็น 260 °C จะมีค่า Carbon yield ร้อยละ 83.26, 76.16, 73.40, 66.24, และ 59.69 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิเป็น 280 °C จะมีค่า Carbon yield ร้อยละ 73.53, 68.68, 64.64, 61.97, และ 56.15 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิเป็น 300 °C จะมีค่า Carbon yield ร้อยละ 66.90, 66.04, 60.82, 58.71, และ 50.24 ตามลำดับ

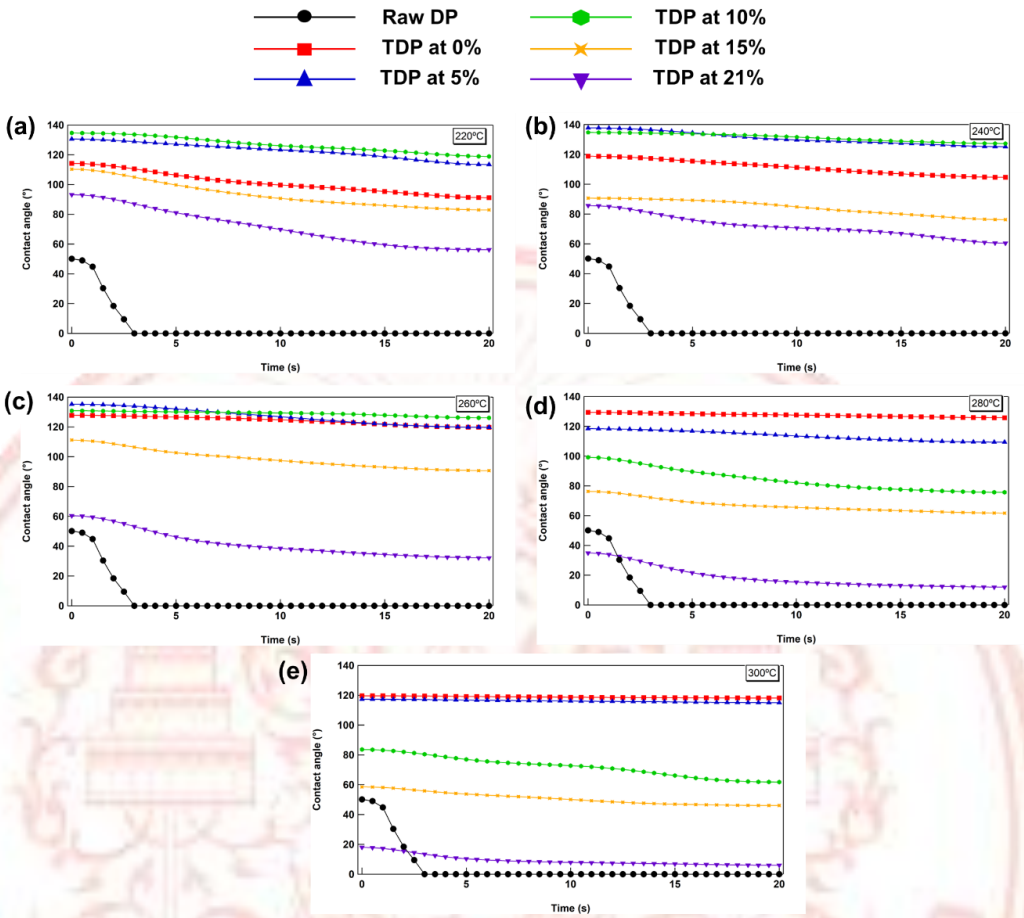
เมื่อเปรียบเทียบค่า Energy Yield กับร้อยละผลได้เชิงมวล แม้ว่าค่าร้อยละผลได้เชิงมวลจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่การปรับสภาวะให้มีออกซิเจนในระบบสามารถส่งผลให้ค่า Energy Yield เพิ่มสูงขึ้นได้ เช่น ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 280 °C ภายใต้สภาวะออกซิเจนในแก๊สตัวกลางในระบบร้อยละ 0 ให้ค่าร้อยละผลได้เชิงมวลที่ร้อยละ 60.32 และค่า Energy Yield เท่ากับร้อยละ 75.41 ในขณะที่ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 260 °C ให้ค่าร้อยละผลได้เชิงมวลร้อยละ 59.86 และค่า Energy Yield สูงถึงร้อยละ 78.27 และถึงแม้ว่าผลได้เชิงมวลจะลดลงเล็กน้อย แต่ค่า Carbon Yield ที่ได้จากกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันยังคงสูงกว่าแสดงให้เห็นถึงความสามารถของกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน นอกจากจะทำให้คุณภาพเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ยังมีประสิทธิภาพในเพิ่มพลังงานและคาร์บอนคงเหลือ (Energy and Carbon recovery) ไว้ในผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อการลดต้นทุนในกระบวนการผลิต รวมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากพลังงานที่สะสมต่อหน่วยมวลมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอย่างยั่งยืน



ภาพที่ 4-9 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้เชิงมวล Energy yield และ Carbon yield ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (a) 220 °C (b) 240 °C (c) 260 °C (d) 280 °C และ (e) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

4.11 ผลการวิเคราะห์มุมสัมผัส (Contact angle)

การวิเคราะห์ความไม่ชอบน้ำ จะใช้ผลการวิเคราะห์หามุมสัมผัส หรือ การวิเคราะห์ contact angle ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความชอบน้ำของของแข็ง โดยวัสดุจะถือว่าชอบน้ำหากมุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา และจะถือว่าไม่ชอบน้ำหากมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา ซึ่งชีวมวลมีลักษณะเป็นวัสดุที่ชอบน้ำเมื่อมีมุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา (C. Zhang, Wang, et al., 2019) การวิเคราะห์มุมสัมผัสของเปลือกทุเรียนและผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 และทำการทดสอบมุมสัมผัสเป็นระยะเวลา 20 วินาที แสดงดัง**ภาพที่ 4.10**



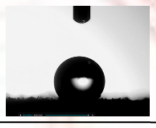
ภาพที่ 4-10 การวิเคราะห์มุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (a) 220 °C (b) 240 °C (c) 260 °C (d) 280 °C และ (e) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง

การวิเคราะห์มุมสัมผัสของเปลือกทุเรียนไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน แสดงดัง **ภาพที่ 4.11** พบว่า มีค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นอยู่ที่ 55.18° ที่ 0 วินาที เมื่อเวลาผ่านไป 5 วินาทีจะมีค่ามุมสัมผัสเป็น 0° แสดงถึงความชอบน้ำอย่างมาก

	Time of contact angle (s)				
	0 s	5 s	10 s	15 s	20 s
Raw-DP					
Angle	55.18°	0°	0°	0°	0°

ภาพที่ 4-11 การวิเคราะห์มุมสัมผัสของเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน

เมื่อทำการทดสอบมุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่สภาวะไนโตรเจน แสดงดัง**ภาพที่4.12** โดยเปรียบเทียบมุมสัมผัสที่เวลา 20 วินาที พบว่า ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 °C มีค่ามุมสัมผัสเป็น 88.54° และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำทอร์รีไฟด์เป็น 240, 260 และ 280 มีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 102.48°, 119.18° และ 124.82° แสดงให้เห็นว่ามีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 300 °C ค่ามุมสัมผัสลดลงเป็น 118.03°

Torrefied samples	Contact angle of torrefied DP at various temperatures (°C)				
	220	240	260	280	300
N_2					
Angle	88.54° (20 s)	102.48° (20 s)	119.18° (20 s)	124.82° (20 s)	118.03° (20 s)

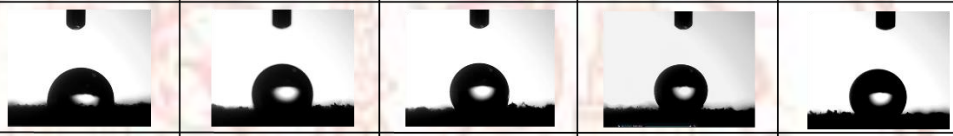
ภาพที่ 4-12 การวิเคราะห์มุมสัมผัสที่เวลา 20 วินาทีของของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่สภาวะไนโตรเจน

ทำการทดสอบมุมสัมผัสผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันของ 220 °C แสดงดัง**ภาพที่ 4.13** พบว่า ในสภาวะของกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันส่งผลอย่างมากต่อสมบัติความชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน คือ เมื่อทำการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 220 °C พบว่ามีมุมสัมผัสเป็น 88.54° 111.16° 115.35° 81.10° และ 55.44° ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 240 °C พบว่า มีมุมสัมผัสเป็น 102.48° 122.63° 125.10° 73.56° และ 53.70° ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 240 °C พบว่า จะมีมุมสัมผัสเป็น 119.18° 119.38° 125.06° 89.62° และ 29.12° ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ตามลำดับ จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 240 – 260 °C จะแสดงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันในทุกความเข้มข้นของออกซิเจน คือ ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ร้อยละ 0 5 และ 10 จะมีมุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้น และจะเริ่มลดลงที่ปริมาณความเข้นข้นที่ร้อยละ 15 และ 21

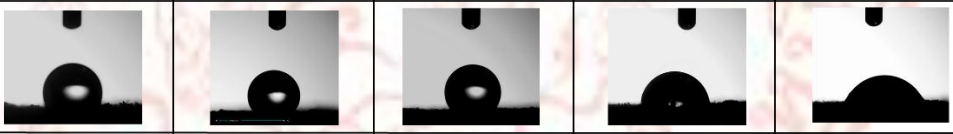
แต่เมื่อทำออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นคือที่อุณหภูมิ 280 °C มีค่ามุมสัมผัสจะเริ่มลดลงทันทีเมื่อใช้สภาวะออกซิเจนเข้ามาในกระบวนการ โดยเพิ่มจากค่ามุมสัมผัสที่ 124.82° 108.91° 72.82° 58.90° และ 10.95° ที่สภาวะออกซิเจนที่ร้อยละ0 เป็น 5 10 15 21 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิสูงที่สุดคือ 300 °C จะมีค่ามุมสัมผัสที่ 118.03° 114.46° 69.91° 45.38° และ 5.08° ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ตามลำดับ

การวิเคราะห์มุมสัมผัสในตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันภายใต้สภาวะต่างๆ จะทำให้เห็นถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำของตัวอย่างที่ปรับปรุงแล้วของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน จากการวิเคราะห์พบว่าเปลือกทุเรียนมีความชอบน้ำหรือความเป็น hydrophilic อย่างมาก โดยค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นประมาณ 55.18° และลดลงจนเป็นศูนย์ภายใน 5 วินาที หลังจากผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันในสภาวะไนโตรเจน ค่ามุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยสูงสุดที่ 260 °C ที่สภาวะออกซิเจนร้อยละ 10 ซึ่งแสดงถึงความไม่ชอบน้ำที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเติม

ออกซิเจนเข้าสู่ระบบในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน พบว่า ค่ามุมสัมผัสของทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนเริ่มลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง คือ 280 และ 300 °C และความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 15 และ 21 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความชอบน้ำมากขึ้นอย่างชัดเจน โดยความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุนี้อาจเกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันของพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ส่งผลให้สัดส่วนของสารอนินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น รวมถึงอาจเป็นผลมาจากการออกซิเดชันของทาร์บนพื้นผิวผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ [63] [64][12] ดังนั้นตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันจึงแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิและปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนที่สูงกลับแสดงคุณสมบัติชอบน้ำ และค่าของมุมสัมผัสจะน้อยกว่า 90

Torrefied samples	Contact angle of torrefied DP at various oxygen concentrations (%)				
	0	5	10	15	21
220°C					
Angle	88.54° (20 s)	111.16° (20 s)	115.35° (20 s)	81.10° (20 s)	55.44° (20 s)

(a)

Torrefied samples	Contact angle of torrefied DP at various oxygen concentrations (%)				
	0	5	10	15	21
240°C					
Angle	102.48° (20 s)	122.63° (20 s)	125.10° (20 s)	73.56° (20 s)	53.70° (20 s)

(b)

Torrefied samples	Contact angle of torrefied DP at various oxygen concentrations (%)				
	0	5	10	15	21
260°C					
Angle	119.18° (20 s)	119.38° (20 s)	125.06° (20 s)	89.62° (20 s)	29.12° (20 s)

(c)

Torrefied samples	Contact angle of torrefied DP at various oxygen concentrations (%)				
	0	5	10	15	21
280°C					
Angle	124.82° (20 s)	108.91° (20 s)	72.82° (20 s)	58.90° (20 s)	10.95° (20 s)

(d)

Torrefied samples	Contact angle of torrefied DP at various oxygen concentrations (%)				
	0	5	10	15	21
300°C					
Angle	118.03° (20 s)	114.46° (20 s)	69.91° (20 s)	45.38° (20 s)	5.08° (20 s)

(e)

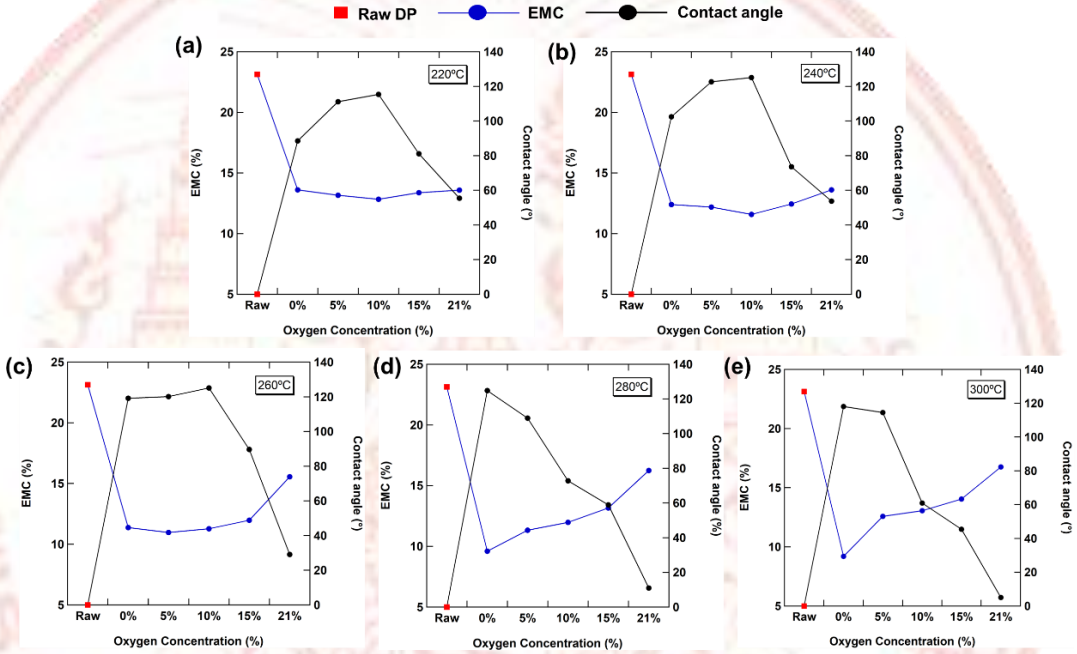
ภาพที่ 4-13 การวิเคราะห์มุมสัมผัสที่เวลา 20 วินาทีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (a) 220 °C (b) 240 °C (c) 260 °C (d) 280 °C และ (e) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

4.12 ผลการวิเคราะห์หาความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC)

การวิเคราะห์ความชื้นสมดุลและมุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 เพื่อประเมินคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ใน**ภาพที่ 4.14** แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง EMC กับค่ามุมสัมผัสต่อปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน โดยเป็นการพล็อตระหว่าง EMC กับ ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และค่ามุมสัมผัสกับปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน ซึ่งค่า EMC แต่ละตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 พบว่า เปลือกทุเรียนจะมีค่า EMC มากที่สุด ส่วนผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนค่าความชื้นสมดุลมีผลต่อคุณสมบัติชอบน้ำของเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน จะเห็นว่ารูปที่ a และ b จะแสดงเส้นโค้งการดูดซับความชื้นที่มีแนวโน้มเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนจนถึงร้อยละ 10 ค่า EMC จะมีค่าที่ลดลง แสดงถึงความไม่ชอบน้ำมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนเป็นร้อยละ 15 และ 21 ค่า EMC จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงความชอบน้ำมากขึ้น รูปที่ c d และ e จะแสดงเส้นโค้งการดูดซับความชื้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทันทีเมื่อให้ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนเข้าไปในระบบ ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ค่า EMC ยิ่งเพิ่มมากขึ้น

จากผลการทดลอง รูพรุนที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันมีผลต่อความชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ทอรีรีไฟด์เปลือกทุเรียน ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณความเข้มข้น

ออกซิเจนจะสามารถเกิดรูพรุน จะทำให้เกิดการดูดซึมโมเลกุลของน้ำอย่างรวดเร็ว [61] และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ามุมสัมผัส จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกัน คือ เมื่อค่า EMC เพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสจะมีค่าลดลง ซึ่งแสดงถึงความชอบน้ำที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม นอกจากรูพรุนแล้ว การเพิ่มขึ้นของปริมาณขี้เถ้าในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน พบว่า ค่า EMC เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มความชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากองค์ประกอบของขี้เถ้าของชีวมวลที่มีธาตุอนินทรีย์หลายชนิด เช่น โพแทสเซียม (K), แคลเซียม (Ca), แมกนีเซียม (Mg), โซเดียม (Na) เป็นต้น ซึ่งธาตุเหล่านี้สามารถดูดซับน้ำและมีคุณสมบัติเป็นสารดูดความชื้น (Hygroscopic) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติชอบน้ำมากขึ้น ตามที่สังเกตจากค่ามุมสัมผัสที่ลดลงเมื่อค่า EMC เพิ่มขึ้น [65]

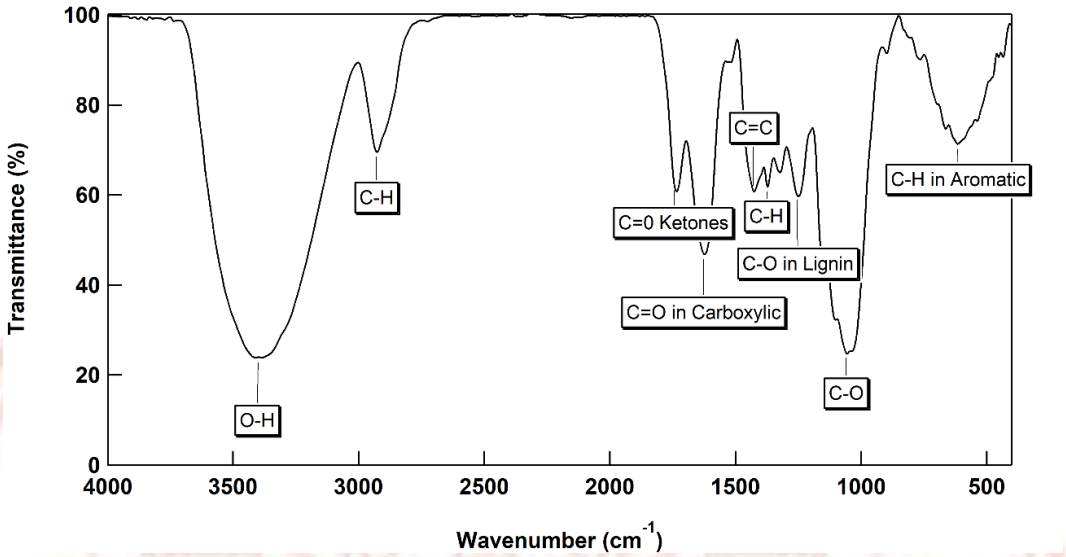


ภาพที่ 4-14 ความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ความชื้นสมดุลและมุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (a) 220 °C (b) 240 °C (c) 260 °C (d) 280 °C และ (e) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

4.13 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดย FTIR

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันสามารถบ่งบอกถึงปฏิกริยาและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในกระบวนการทอร์รีแฟกชัน รวมถึงความไม่ชอบน้ำได้ โดยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันจะทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 4,000–400 ซม.$^{-1}$ ของเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน แสดงดัง **ภาพที่4.15** พบว่า มีแถบการดูดกลืนที่ 3,400 ซม.$^{-1}$ ซึ่งเป็นแถบการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (–OH) ที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่พบได้ทั่วไปในองค์ประกอบหลักของพืช เช่น เซลลูโลส (Cellulose), เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และ ลิกนิน (Lignin) [66] แถบการดูดกลืนที่ 2,926 ซม.$^{-1}$ เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ C–H ในหมู่เมทิล (–CH_3) แถบการดูดกลืนที่ 1,726 ซม.$^{-1}$ การดูดกลืนในช่วงนี้บ่งชี้ถึงการมีอยู่ของกลุ่มคาร์บอนิล (C=O) ในคีโตน แถบการดูดกลืนที่ 1,622 ซม.$^{-1}$ การดูดกลืนในช่วงนี้บ่งชี้ถึงการมีอยู่ของกลุ่มคาร์บอนิล (C=O) ในคาร์บอกซิลิก แถบการดูดกลืนที่ 1,430 ซม.$^{-1}$ เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ C=C แถบการดูดกลืนที่ 1,370 ซม.$^{-1}$ เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ C-

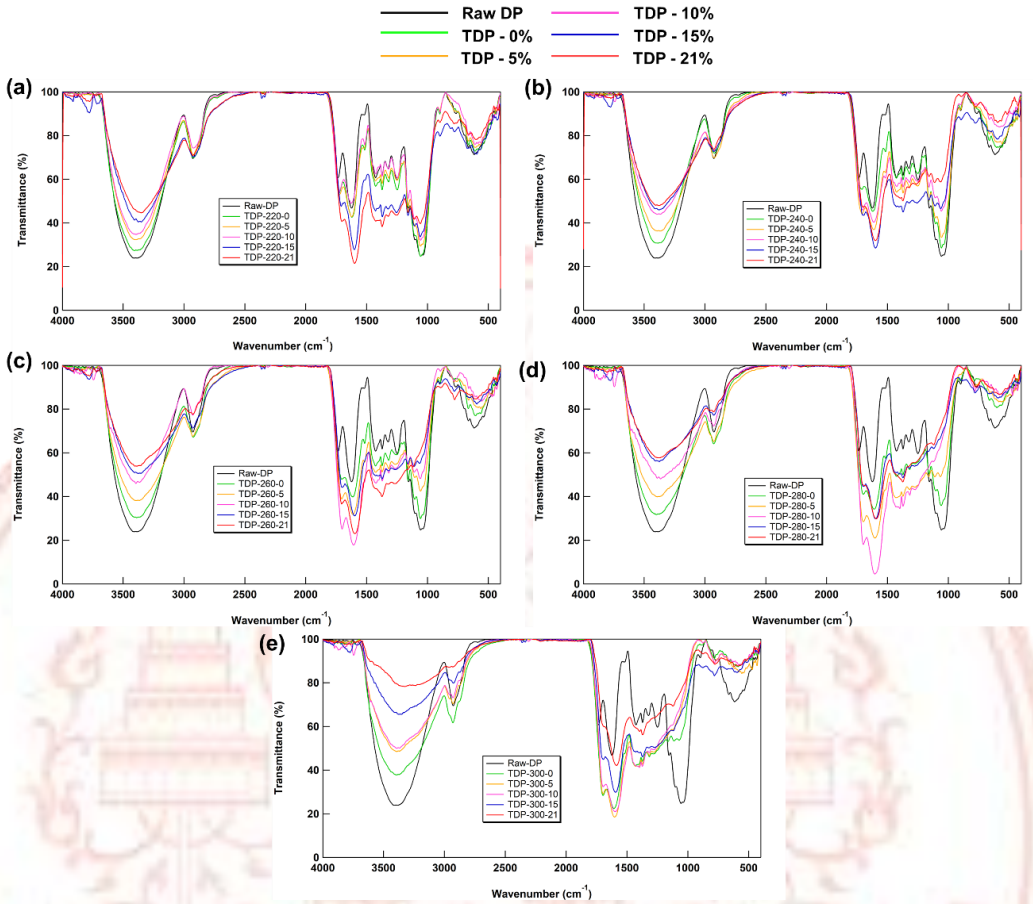
H แถบการดูดกลืนที่ 1,257 ซม.$^{-1}$ เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ C-O ในลิกนิน แถบการดูดกลืนที่ 1,056 ซม.$^{-1}$ เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ C-O และแถบการดูดกลืนที่ 619 ซม.$^{-1}$ เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ C-H ในอะโรมาติกซึ่งอยู่ในลิกนิน



ภาพที่ 4-15 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน

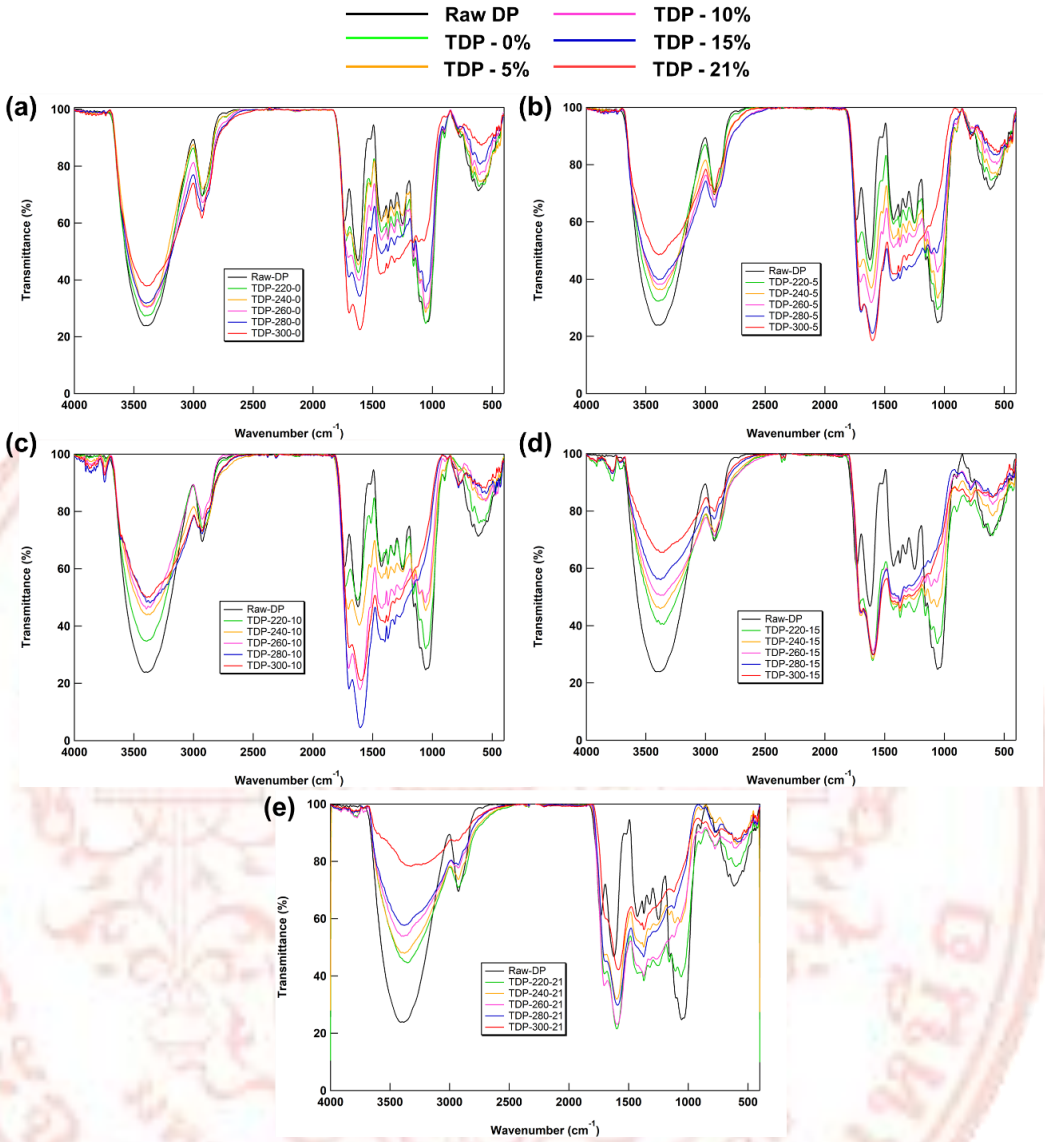
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 - 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 แสดงดัง**ภาพที่ 4.16** พบว่าผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 และ 240 °C **(ภาพที่ 4.16a,4.16b)** เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนจาก 0% ไปเป็น 21% ทำให้หมู่ไฮดรอกซิล พันธะ C-O และพันธะ C-H ในอะโรมาติกลดลง ทำให้เห็นกลุ่มคาร์บอนิลในคีโตนและคาร์บอกซิลิก พันธะ C=O และพันธะ C=C เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยที่อุณหภูมิ 240 °C ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน **(ภาพที่ 4.16b)** คือ หมู่ไฮดรอกซิลและ C–O ลดลงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่กลุ่ม C=O และ C=C เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของออกซิเจน แต่กลับลดลงเมื่อปริมาณออกซิเจนสูงขึ้นที่ร้อยละ 15 และ 21 ทำให้กลุ่มคาร์บอนิลลดลง ซึ่งที่อุณหภูมิ 260 °C **(ภาพที่ 4.16c)** มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 280 °C **(ภาพที่ 4.16d)** จะเห็นว่ากลุ่มคาร์บอกซิลิคจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 10 ซึ่งการเพิ่มการเพิ่มขึ้นของกลุ่มคาร์บอกซิลิคอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความไม่ชอบน้ำลดลง เนื่องจากการมีฟังชันนี้บนผิวที่มีความชอบน้ำ

อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 300 °C **(ภาพที่ 4.16e)** ค่าการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันหลักทุกกลุ่มลดลงอย่างชัดเจน ไม่ว่าจะเป็น O–H, C–H, C–O, C=O หรือแม้แต่ C=C ในทุกสภาวะความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สตัวกลาง แต่พบว่าที่สภาะวะดังกล่าว พบว่าผลิตภัณฑ์ก็มีความไม่ชอบน้ำลดลง



ภาพที่ 4-16 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ (a) 220 °C (b) 240 °C (c) 260 °C (d) 280 °C และ (e) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาการทำออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่ความเข้มข้นของออกซิเจนคงที่ แสดงดัง**ภาพที่ 4.17** พบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (บรรยากาศไนโตรเจน 0%) พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 220 - 300 °C หมู่ไฮดรอกซิล, พันธะ C–O ในลิกนิน และพันธะ C–H ของวงแหวนอะโรมาติกลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะเดียวกัน พบว่าการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิลในคาร์บอกซิลิกพันธะ C=O และพันธะคู่ C=C เพิ่มขึ้นชัดเจน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 300 °C เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนเป็น 5% แนวโน้มยังคงเป็นเช่นเดียวกัน โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นกระตุ้นการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิลและ C–O มากยิ่งขึ้น และส่งผลให้การเกิดหมู่คาร์บอนิลและ C=C ชัดเจนขึ้นเช่นกัน ที่ความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 10 พบว่าอุณหภูมิ 280 °C มีการเพิ่มขึ้นของกลุ่มคาร์บอกซิลิกสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สตัวกลางเป็นร้อยละ 15 และ 21 ที่อุณหภูมิ 220 °C และ 240 °C กลุ่มคาร์บอนิล (C=O) และ C–O กลับลดลง



ภาพที่ 4-17 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน (a) ร้อยละ 0 (b) ร้อยละ 5 (c) ร้อยละ 10 (d) ร้อยละ 15 และ (e) ร้อยละ 21 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ

จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน พบว่าทั้งสองปัจจัยมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับความไม่ชอบน้ำของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่สภาวะการใช้อุณหภูมิที่สูงหรือปริมาณออกซิเจนมากกลับส่งผลให้ความไม่ชอบน้ำลดลงเนื่องจากหมู่ คาร์บอกซิลที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การใช้อุณหภูมิและปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในกระบวนการทอร์รีแฟกชันที่มากขึ้น อาจเร่งการเกิดทาร์ที่เป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic tar) ซึ่งเคยเคลือบผิวของอนุภาคเอาไว้และทำให้เกิดการสลายตัวของสารทาร์ในกระบวนการ ดังนั้น ผลิตภัณฑ์เปลือกทุเรียนทอร์รีไฟด์เมื่อใช้อุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนที่มากขึ้น จะทำให้เกิดการผลิตกลุ่มที่มีความชอบน้ำบนผิวของอนุภาคเปลือกทุเรียน

ซึ่งทำให้ความชอบน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ลดลง [17] พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับที่พบในไบโอชาร์ ซึ่งแม้จะผ่านกระบวนการที่มีอุณหภูมิสูง แต่ยังคงแสดงสมบัติความชอบน้ำอยู่ เนื่องจากยังหลงเหลือหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น คาร์บอกซิลิก และหมู่ C–O บางส่วน ส่งผลให้ไบโอชาร์สามารถดูดซับน้ำได้ดี

นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์พบว่า ความไม่ชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์มีความสัมพันธ์กับปริมาณขี้เถ้าที่เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน โดยอาจมีความเป็นไปได้ว่า ปริมาณของสารอนินทรีย์ในขี้เถ้าที่มีค่าสูง คือ โลหะแอลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซีย ที่สะสมอยู่บนพื้นผิวของวัสดุ จะก่อให้เกิดลักษณะพื้นผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น จะส่งผลให้พื้นผิวมีลักษณะไม่ชอบน้ำมากขึ้น สารอนินทรีย์บางชนิดอาจมีลักษณะไม่ชอบน้ำตามธรรมชาติอยู่แล้ว เมื่อมีปริมาณมากในขี้เถ้า จึงอาจมีผลรวมในการลดความสามารถของวัสดุในการดูดซับน้ำได้

4.14 การศึกษาการกำจัดปริมาณขี้เถ้าด้วยการล้างน้ำ (Water washing of durian peel)

จากผลการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า สมบัติความชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศเพิ่มขึ้นของกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติที่พึงประสงค์ในการจัดเก็บและใช้งานในระยะยาว เนื่องจากช่วยลดการดูดซึมน้ำ อย่างไรก็ตาม สมบัติความชอบน้ำจะลดลงเมื่อปริมาณขี้เถ้าที่ลดลง ดังนั้น ในหัวข้อจึงทำการศึกษาการลดลงของปริมาณขี้เถ้าต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่สภาวะเดียวกัน

4.14.1 ปริมาณขี้เถ้าในทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้าง

ผลการศึกษาปริมาณขี้เถ้าด้วยการล้างด้วยน้ำแสดงดัง**ตารางที่ 4.5** พบว่า ปริมาณขี้เถ้าของเปลือกทุเรียนลดลงจากร้อยละ 6.78 เป็น 1.43 มีปริมาณขี้เถ้าลดลง 4.7 เท่า เมื่อนำเปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างไปเข้ากระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน จะเห็นได้ว่า ปริมาณขี้เถ้าลดลงไปอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างลดลงเป็นร้อยละ 2.40 2.78 3.13 3.56 และ 4.25 จาก 11.29 14.59 16.00 16.48 และ 18.90 ที่ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สตัวกลางร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า การล้างเปลือกทุเรียนก่อนทำทอร์รีแฟกชันเป็นอีกวิธีการนึงที่จะสามารถลดปริมาณของขี้เถ้าได้ โดยผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ร้อยละ0 5 10 15 21 สามารถลดปริมาณขี้เถ้าได้ถึง 4.7 5.2 5.1 4.6 และ 4.4 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการกำจัดขี้เถ้าด้วยการล้างก่อนทำทอร์รีไฟด์ส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน

ตารางที่ 4-5 ปริมาณขี้เถ้าผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้าง ที่อุณหภูมิ 300 °C ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ

ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน (%)	ปริมาณขี้เถ้า (%)	
	ก่อนล้างด้วยน้ำ	หลังล้างด้วยน้ำ
Raw	6.78	1.43
0	11.29	2.40
5	14.57	2.78
10	16.00	3.13
15	16.48	3.56
21	18.90	4.25

4.14.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบขี้เถ้าในเปลือกทุเรียน

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุภายในขี้เถ้าด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF) ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ แสดงดัง**ตารางที่ 4.6** พบว่า การล้างเปลือกทุเรียนด้วยน้ำมีผลอย่างมากต่อการลดปริมาณของขี้เถ้า โดยตัวอย่างเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างน้ำ มีปริมาณโพแทสเซียม สูงถึงร้อยละ 4.10 และแคลเซียม ที่ร้อยละ 0.78 ขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการล้างน้ำ พบว่าโพแทสเซียม ลดลงอย่างชัดเจนเหลือเพียงร้อยละ 0.58 และแคลเซียมลดลงเล็กน้อยเหลือร้อยละ 0.55 ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี สอดคล้องกับค่าของธาตุอื่น ๆ เช่น โซเดียม, แมกนีเซียม, ฟอสฟอรัส และซิลิกอน [52] [67]

สำหรับผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ไม่ผ่านการล้างน้ำโพแทสเซียมเพิ่มจากร้อยละ 6.67 ที่สภาวะออกซิเจนร้อยละ 0 เป็น ร้อยละ 11.06 ที่สภาวะออกซิเจน 21 แคลเซียสเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.17 เป็นร้อยละ 2.03 และธาตุอื่นๆ เช่น ซิลิกอนและฟอสฟอรัสก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับออกซิเจน เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ผ่านการล้างน้ำ ถึงแม้จะผ่านกระบวนออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันเหมือนกันแต่ตัวอย่างที่ผ่านการล้างน้ำมีค่าร้อยละของแต่ละธาตุต่ำกว่าอย่างชัดเจนในทุกๆสภาวะออกซิเจน เช่น โพแทสเซียมเหลือเพียงร้อยละ 1.80 เมื่อเทียบกับที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำที่มีอยู่ร้อยละ 11.06

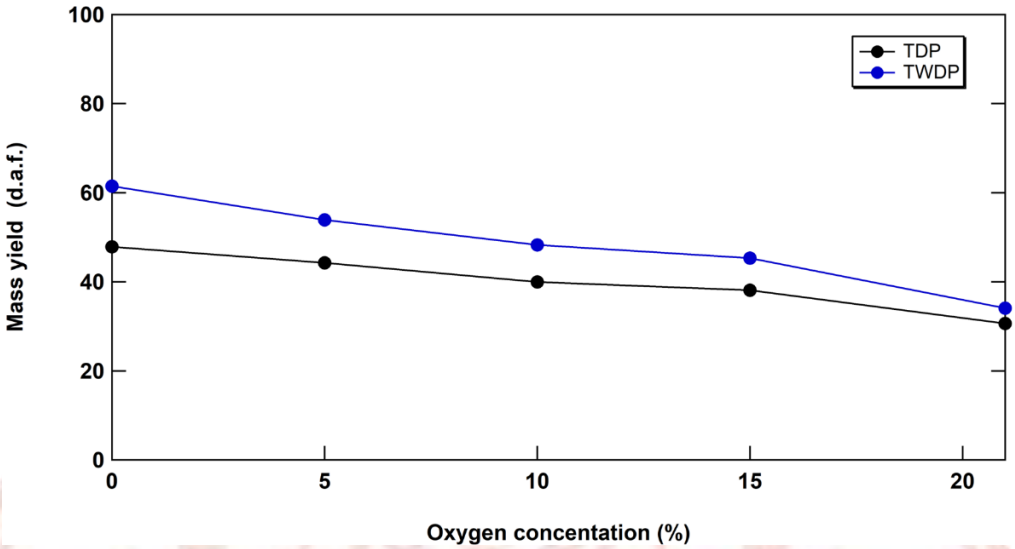
ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ไม่ผ่านการล้างน้ำมีธาตุที่สูงขึ้นเมื่อให้สภาวะออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อเชื้อเพลิง เช่น การกัดกร่อน การล้างน้ำก่อนการทอร์รีแฟกชันช่วยลดการสะสมของธาตุในขี้เถ้าโดยเฉพาะโพแทสเซียม แคลเซียม และซิลิกอน ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดตะกรัน แสดงให้เห็นว่าการล้างด้วยน้ำสามารถชะล้างแร่ธาตุละลายน้ำบางชนิดออกจากเปลือกทุเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4-6 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุภายในขี้เถ้าของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

Sample	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca
	(%wt.)							
Raw-DP	0.02	0.44	0.14	0.24	0.17	0.20	4.10	0.78
Raw-WDP	0.04	0.01	0.20	0.02	0.03	0.58	0.58	0.55
TDP-0	0.01	0.59	0.24	0.30	0.19	0.23	6.67	1.17
TDP-5	0.01	0.52	0.22	0.41	0.23	0.21	9.09	1.55
TDP-10	0.01	0.46	0.18	0.49	0.24	0.21	10.04	1.68
TDP-15	0.01	0.44	0.16	0.52	0.28	0.19	10.23	1.79
TDP-21	0.01	0.44	0.13	0.63	0.32	0.20	11.06	2.03
TWDP-0	0.01	0.01	0.01	0.20	0.06	0.06	0.81	1.20
TWDP-5	0.00	0.01	0.01	0.27	0.03	0.06	0.87	1.51
TWDP-10	0.00	0.02	0.02	0.28	0.03	0.05	1.08	1.64
TWDP-15	0.00	0.02	0.02	0.30	0.03	0.05	1.37	1.76
TWDP-21	0.00	0.04	0.04	0.31	0.03	0.05	1.80	2.02

4.14.3 ผลการศึกษาร้อยละผลได้เชิงมวล

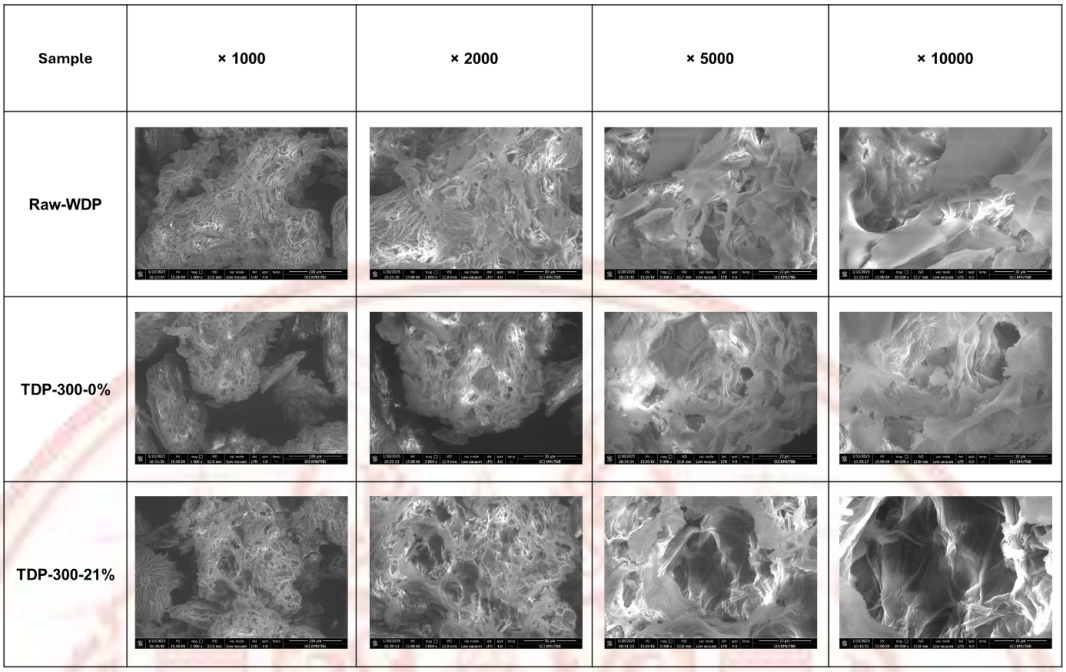
การศึกษาร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนการกำจัดปริมาณขี้เถ้าภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 21 ที่อุณหภูมิ 300 °C และระยะเวลาการทดลอง 30 นาที แสดงดัง**ภาพที่ 4.18** จากผลการทดลองพบว่า ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำมีค่าร้อยละ 61.45, 53.87, 48.26, 45.30 และ 34.07 ตามลำดับ ในขณะที่ ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำมีค่าร้อยละ 47.87, 44.27, 39.97, 38.11 และ 30.63 ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้น ผลของร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ล้าง มีแนวโน้มเดียวกับที่ไม่ล้าง อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างและไม่ล้าง พบว่าทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ล้างมีร้อยละผลได้เชิงมวลสูงกว่าทุก ๆ ความเข้มข้นของออกซิเจน แสดงให้เห็นว่า การสลายตัวเปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำจะเกิดได้ยากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเปลือกทุเรียนมีปริมาณเถ้าสูง ซึ่งประกอบไปด้วยสารอนินทรีย์หลัก ได้แก่ โพแทสเซียมและฟอสฟอรัส เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสลายตัวที่อุณหภูมิ 300 °C ดังนั้น การล้างเปลือกทุเรียนด้วยน้ำก่อนกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันจึงช่วยลดปริมาณเถ้าส่งผลให้ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น สามารถสรุปได้ว่าเมื่อกำจัดโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสที่มีอยู่มากในเปลือกทุเรียนออก จึงทำให้การสลายตัวช้าลงส่งให้ร้อยละผลได้เชิงมวลมากขึ้น



ภาพที่ 4-18 ความสัมพันธ์ของร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

4.14.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเปลือกทุเรียนและผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนร้อยละ 0 และ 21 ซึ่งลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดัง**ภาพที่ 4.19** จากผลการวิเคราะห์พบว่า เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำก่อนการทอร์รีแฟกชันยังคงมีโครงสร้างเส้นใยที่หนาแน่น เมื่อเข้าสู่กระบวนการทอร์รีแฟกชันภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน พบว่า เริ่มเกิดการแยกตัวของเส้นใย ส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวบางส่วนบนพื้นผิว ในขณะที่เปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชันภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนร้อยละ 21 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมากขึ้น โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกทุเรียนที่ไม่ได้ผ่านการล้างด้วยน้ำ จะพบว่าพื้นผิวมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน และผลิตภัณฑ์ทอร์รีแฟกชันที่ไม่ได้ผ่านการล้างด้วยน้ำรูพรุนที่ปรากฏคล้ายกัน

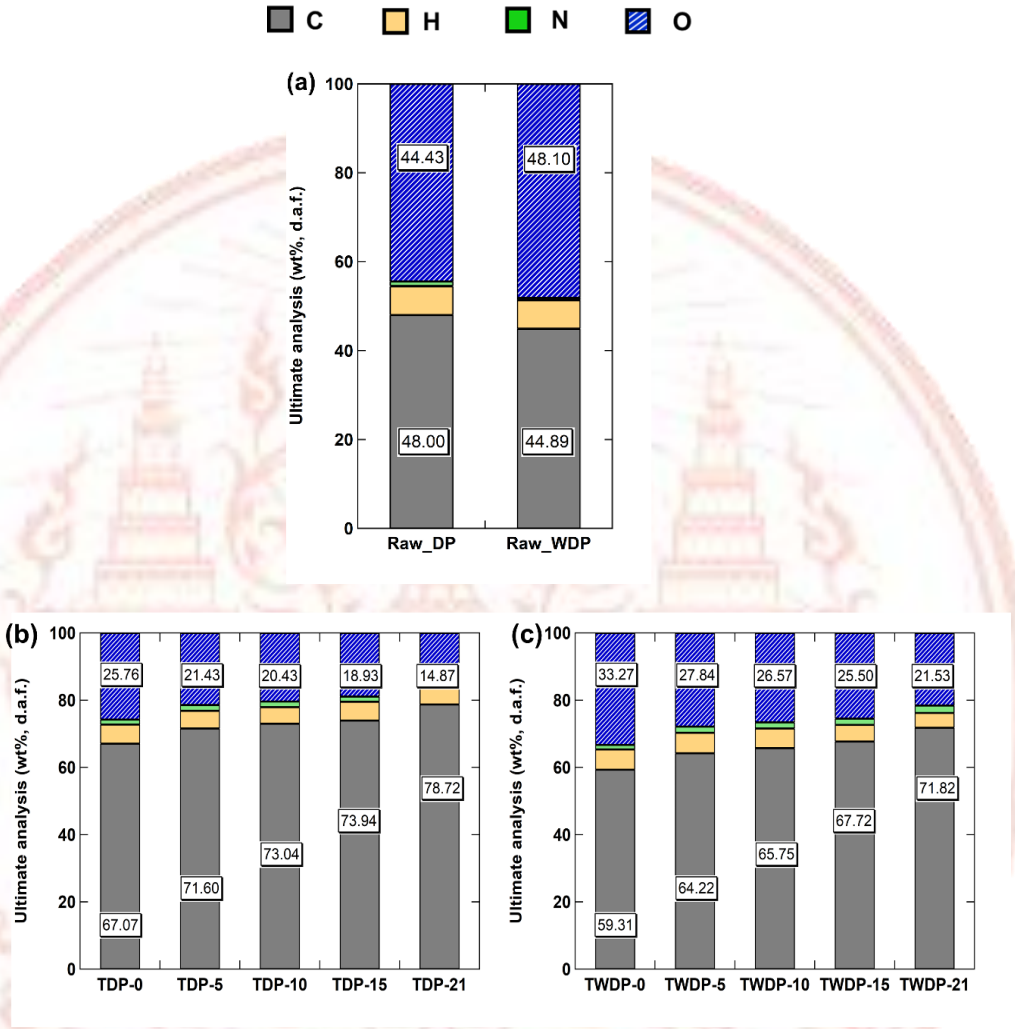


ภาพที่ 4-19 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเปลือกทุเรียนและผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนร้อยละ 0 และ 21

4.14.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของธาตุ

ผลการศึกษาการวิเคราะห์ของเปลือกทุเรียนก่อนล้างด้วยน้ำแสดงดัง**ภาพที่ 4.20 (a)** ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 48.00 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.50 ไนโตรเจนร้อยละ 1.06 และออกซิเจนร้อยละ 44.43 และเปลือกทุเรียนหลังผ่านการล้างด้วยน้ำประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 44.89 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.50 ไนโตรเจนร้อยละ 0.49 และออกซิเจนร้อยละ 48.10 จะเห็นได้ว่าปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที **ภาพที่ 4.20 (b-c)** พบว่า ที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางที่เพิ่มขึ้น 0, 5, 10, 15 และ 21 ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์หลังจากล้างด้วยน้ำที่ได้มีปริมาณคาร์บอนลดลงจากร้อยละ 59.31, 64.22, 65.75, 67.72 และ 71.87 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับก่อนล้างด้วยน้ำที่มีปริมาณคาร์บอนเป็น 67.07, 71.60, 73.04, 73.94 และ 78.72 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณคาร์บอนที่ได้มีปริมาณที่ลดลง เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของออกซิเจนหลังจากล้างด้วยน้ำที่ได้มีปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 33.27, 27.84, 26.57, 25.50 และ 21.53 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับก่อนล้างด้วยน้ำที่มีปริมาณคาร์บอนเป็น 25.76, 21.43, 20.43, 18.93 และ 14.87 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ได้มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนในแก๊สตัวกลางเท่ากัน เนื่องจากการสูญเสียองค์ประกอบที่เกิดจากการล้างด้วยน้ำ ซึ่งบ่งชี้ว่าสารอินทรีย์จะถูกกำจัดออกไปมากขึ้นระหว่างการล้างเปลือกทุเรียนด้วยน้ำ [68] และยังเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบในลิกโนเซลลูโลสของชีวมวล เนื่องมาจากการกำจัด

ไอออนเกลืออนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ในปริมาณสูง [69] เนื่องจากสารอินทรีย์บางชนิดสูญเสียไป จึงเห็นการลดลงของปริมาณคาร์บอนด้วยเช่นกัน [70]

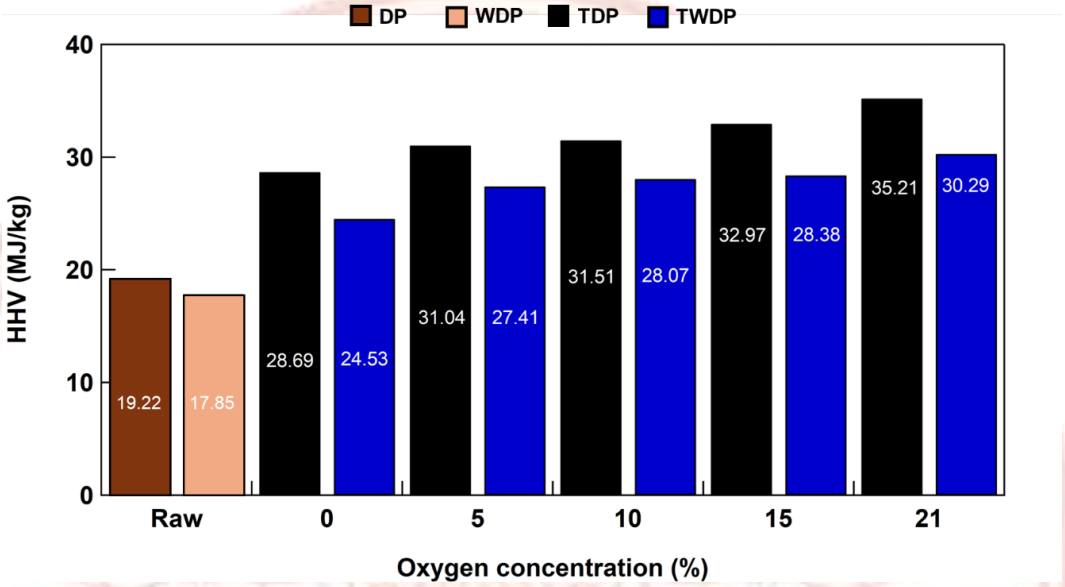


ภาพที่ 4-20 ปริมาณองค์ประกอบของ (a) เปลือกทุเรียน (b) ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำ (c) ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

4.14.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงสุด

ค่าความร้อนสูงสุดของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการจำกัดขี้เถ้าลดลงจาก 19.22 เป็น 17.85 เมกกะจูล/กิโลกรัม และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและล้างด้วยน้ำ ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 21 ที่อุณหภูมิ 300 °C และระยะเวลาการทดลอง 30 นาที แสดงดัง**ภาพที่ 4.21** จากผลการทดลองพบว่ากระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 21 มีค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำมีค่าร้อยละ 28.96, 34.04, 31.51, 32.97 และ 35.21 ตามลำดับ ซึ่งค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รี

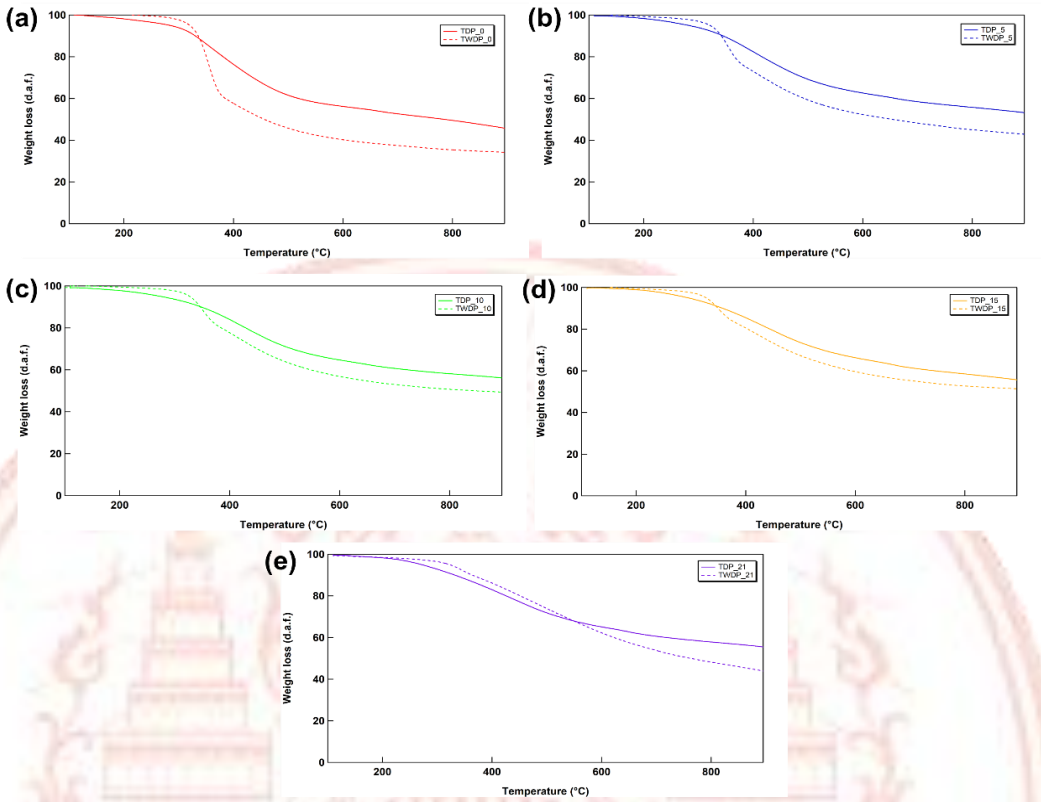
ไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำมีค่าร้อยละ 24.53, 27.41, 28.07, 28.38 และ 30.29 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงสุดหลังจากล้างด้วยน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากค่าความร้อนสูงสุดถูกคำนวณมาจากปริมาณองค์ประกอบของธาตุ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนทำให้ค่าความร้อนลดลง และการจำกัดปริมาณเถ้าและการเจือจางสารอินทรีย์เป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงในค่าความร้อนสูงสุด [71]



ภาพที่ 4-21 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

4.14.7 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน

การสลายตัวทางความร้อนของของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของ TDP (ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำ) และ TWDP (ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำ) แสดงดัง**ภาพที่ 4.22** ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะเลื่อนไปทางขวามากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน ซึ่ง TWDP (เส้นประ) มีแนวโน้มการสูญเสียมวล สูงกว่า TDP (เส้นทึบ) ในทุกระดับความเข้มข้นของออกซิเจน ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ TGA ชี้ให้เห็นว่าการล้างน้ำก่อนกระบวนการทอร์รีแฟกชันส่งผลต่อพฤติกรรมการสลายตัวของวัสดุชีวมวล เนื่องจากการกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการ เช่น เถ้า ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งการสลายตัวเชิงความร้อน [72] กระบวนการสลายตัวจึงเกิดได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสารอนินทรีย์ในเปลือกทุเรียน เช่น โพแทสเซียมและฟอสฟอรัส สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนไพโรไลซิสในการฟอร์มตัวเป็นไบโอชาร์ที่อุณหภูมิสูงได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่า Char yield จะน้อย แต่ยังสามารถนำไปผลิตเป็นไบโอออยแทนได้

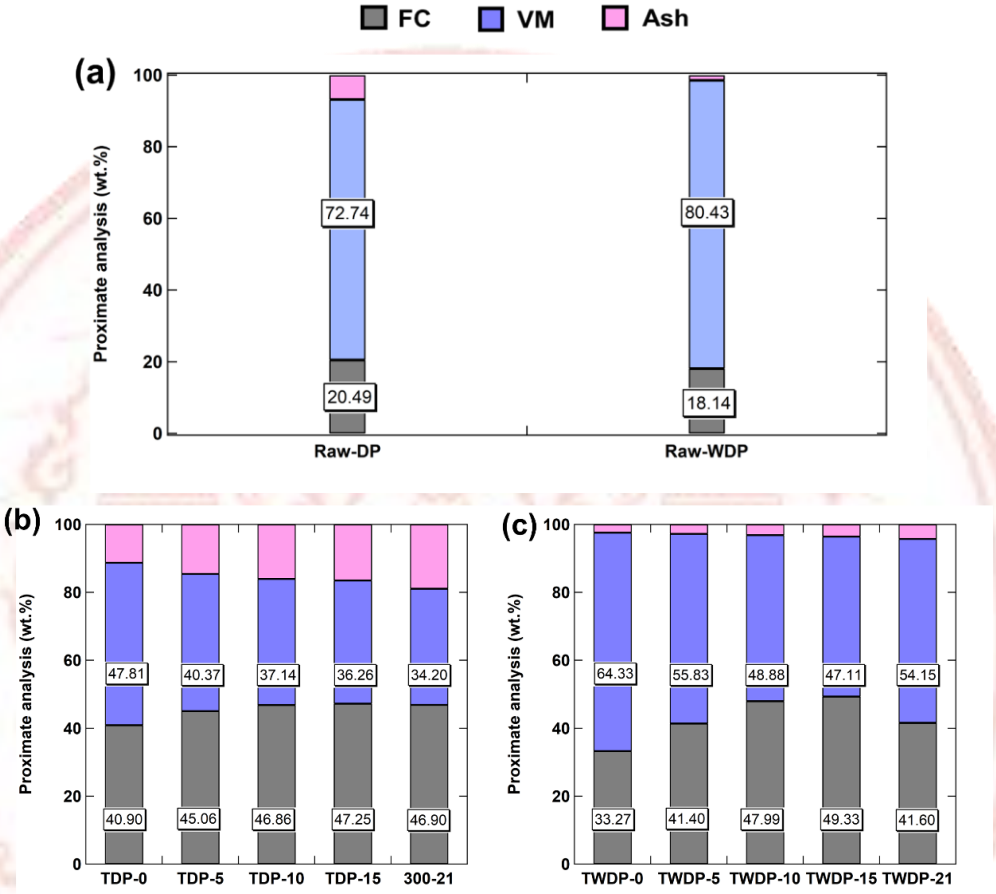


ภาพที่ 4-22 การสลายตัวทางความร้อนของของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและล้างด้วยน้ำ (a) 220 °C (b) 240 °C (c) 260 °C (d) 280 °C และ (e) 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ

4.14.8 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ

ผลการศึกษาการวิเคราะห์ของเปลือกทุเรียนก่อนล้างด้วยน้ำแสดงดัง**ภาพที่ 4.23** ผลการวิเคราะห์แบบประมาณพบว่า เปลือกทุเรียนที่ล้างด้วยน้ำปริมาณเถ้าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับเปลือกทุเรียนที่ไม่ได้ผ่านการล้างน้ำ โดยปริมาณเถ้าในเปลือกทุเรียนที่ล้างด้วยน้ำลดลงเหลือเพียงร้อยละ 1.43 จากร้อยละ 6.78 แสดงให้เห็นว่า การล้างน้ำสามารถช่วยกำจัดสิ่งเจือปนจำพวกแร่ธาตุที่ไม่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำและผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่า TDP มีปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของออกซิเจน คือ 11.29, 14.57, 16.00, 16.49 และ 18.90 ที่สภาวะออกซิเจนที่ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 21 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นนี้สอดคล้องกับการสูญเสียขององค์ประกอบที่ระเหยได้ ส่งผลให้สัดส่วนของเถ้าเพิ่มขึ้น ซึ่ง TWDP แม้จะผ่านกระบวนการในสภาวะเดียวกัน แต่มีปริมาณเถ้าต่ำกว่า TDP อย่างชัดเจน ได้แก่ 2.40, 2.78, 3.13, 3.56 และ 4.25 สภาวะออกซิเจนที่ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 21 ตามลำดับ ซึ่งยืนยันว่า การล้างน้ำก่อนกระบวนการช่วยลดการสะสมของแร่ธาตุอนินทรีย์และลดปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นหลังการแปรรูป นอกจากนี้ ยังพบว่า ปริมาณคาร์บอนคงตัว ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของสมบัติด้านเชื้อเพลิง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้กระบวนออกซิเดทีฟทอร์รี

แฟกชัน โดยเฉพาะในกลุ่ม TWDP ที่ความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 10 และ 15 พบว่า TWDP มีค่าคาร์บอนคงตัวสูงถึงร้อยละ 47.99 และ 49.33 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัวร่วมกับการลดลงของเถ้าในกลุ่ม TWDP บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของกระบวนการล้างน้ำก่อนเข้ากระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน

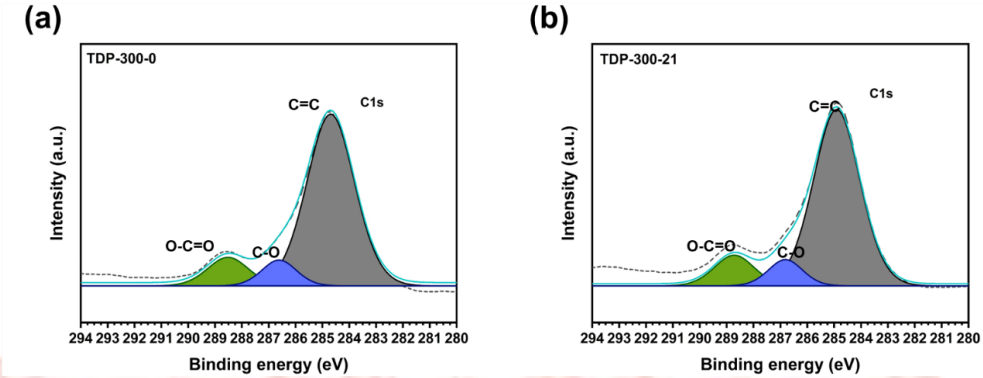


ภาพที่ 4-23 การวิเคราะห์แบบประมาณ (a) เปลือกทุเรียน (b) ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำ (c) ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ล้างด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

4.14.9 ผลวิเคราะห์เอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (XPS)

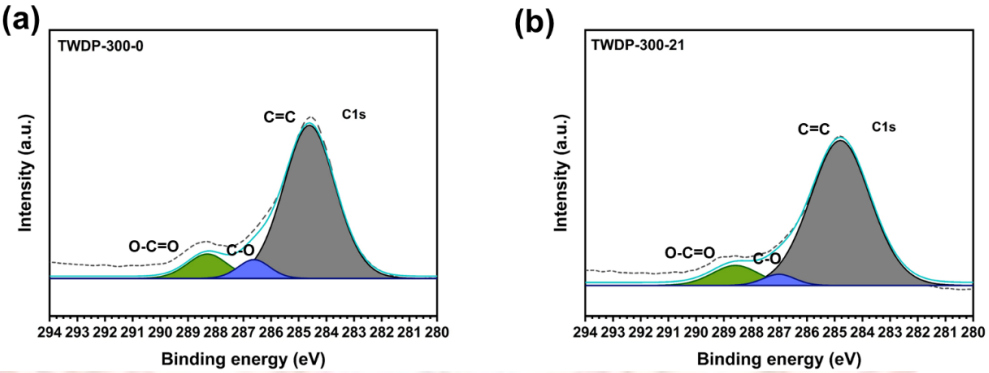
จากการวิเคราะห์เปลือกทุเรียนด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) โดยพิจารณาที่บริเวณพีคของคาร์บอน (C1s) ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนก่อนและหลังการล้างด้วยน้ำที่ 300 °C ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 21 แสดงดัง**ภาพที่ 4.24** เมื่อพิจารณาที่ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ความเข้มข้นของออกซิเจนจากร้อยละ 0 พบว่า มีการปรากฏของพีคหลัก 3 ตำแหน่ง ได้แก่ C=C ที่ระดับพลังงานประมาณประมาณ 284.6 eV เป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือ C-O ที่ระดับพลังงานประมาณประมาณ 286.0 eV และ O-C=O ระดับพลังงานประมาณประมาณ 288.5 eV ซึ่งเมื่อทำออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่ความ

เข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 21 จะเห็นว่า ตำแหน่งระดับพลังงานที่มีออกซิเจน คือ C-O และ O-C=O เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันอีเทอร์และคาร์บอนิล



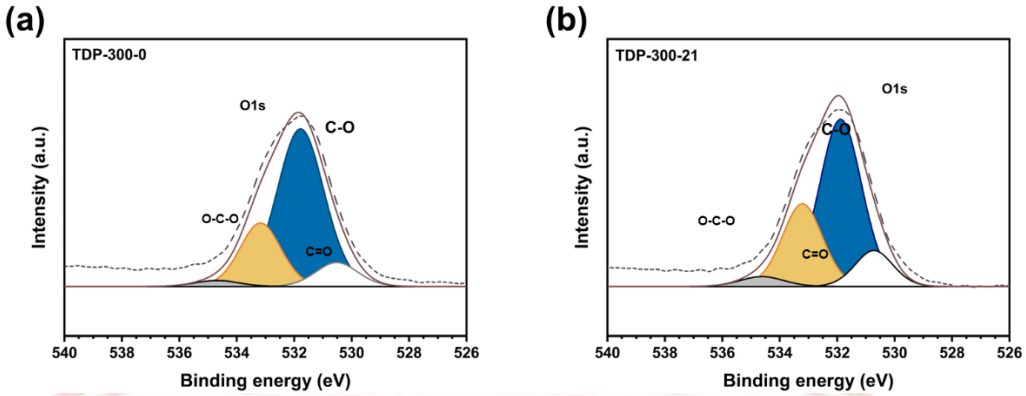
ภาพที่ 4-24 สเปกตรัม XPS ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนในย่านพลังงานของ C1s

ผลการวิเคราะห์บริเวณพีคของคาร์บอน (C1s) ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนหลังการล้างด้วยน้ำที่ 300 °C ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 21 แสดงดัง**ภาพที่ 4.25** พบว่า เมื่อล้างด้วยน้ำก่อนนำไปเข้ากระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่ความเข้มข้นของออกซิเจนจากร้อยละ 0 จะเห็นว่ามีแนวโน้มเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ไม่ผ่านการล้าง แต่ระดับพลังงาน C-O และ O-C=O ลดลงอย่างเห็นได้ชัด



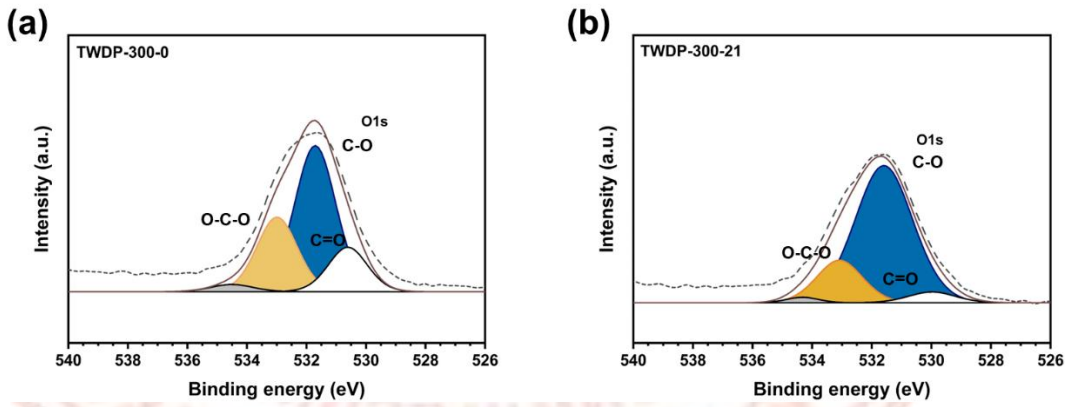
ภาพที่ 4-25 สเปกตรัม XPS ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนในย่านพลังงานของ C1s

ผลการวิเคราะห์ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ 300 °C ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 21 บริเวณพีคของออกซิเจน (O1s) แสดงดัง**ภาพที่ 4.26** พบว่า ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 0 แสดงองค์ประกอบหลักของออกซิเจน ได้แก่ C-O ที่ระดับพลังงานประมาณประมาณ 533.5 eV เป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือ C=O ที่ระดับพลังงานประมาณประมาณ 531.8 eV และ O-C-O ระดับพลังงานประมาณประมาณ 534.5 eV เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเป็นร้อยละ 21 ในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน จะเห็นว่าที่ระดับพลังงานของพีค O-C-O และ C=O เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-26 สเปกตรัม XPS ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนในย่านพลังงานของ O1s

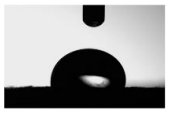
ผลการวิเคราะห์ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนหลังการล้างด้วยน้ำที่ 300 °C ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 21 บริเวณพีคของออกซิเจน (O1s) แสดงดัง**ภาพที่ 4.27** พบว่า การปรากฏของพีคหลัก 3 ตำแหน่งเดียวกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 21 ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนหลังการล้างด้วยน้ำมีตำแหน่งระดับพลังงานของ C=O และ O-C-O ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ C-O เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าออกซิเจนมีส่วนสำคัญในการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนมากขึ้นบนพื้นผิว



ภาพที่ 4-27 สเปกตรัม XPS ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนในย่านพลังงานของ O1s

4.14.10 ผลการวิเคราะห์ของมุมสัมผัส (Contact angle)

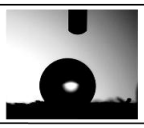
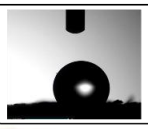
การวิเคราะห์มุมสัมผัสของเปลือกทุเรียนที่ล้างน้ำแล้วเมื่อระยะเวลาผ่านไป 20 วินาที แสดงดัง**ภาพที่ 4.28** พบว่า เปลือกทุเรียนก่อนทผ่านกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันมีค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นอยู่ที่ 93.13° ที่ 0 วินาที เมื่อเวลาผ่านไป 5 10 15 และ 20 วินาทีจะมีค่ามุมสัมผัสเป็น 55.34°, 39.85°, 33.47° และ 30.93° จะเห็นได้ว่าเมื่อนำเปลือกทุเรียนไปผ่านการล้างด้วยน้ำทำให้มีค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้น

	Time of contact angle (s)				
	0 s	5 s	10 s	15 s	20 s
Raw-WDP					
Angle	93.13°	55.34°	39.85°	33.47°	30.93°

ภาพที่ 4-28 การวิเคราะห์มุมสัมผัสที่เวลา 20 วินาทีของเปลือกทุเรียนเมื่อระยะเวลาผ่านไป 20 วินาที

การวิเคราะห์มุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนผ่านการล้างด้วยน้ำที่ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 เมื่อผ่านระยะเวลา 20 วินาที แสดงดัง**ภาพที่ 4.29** พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการล้างด้วยน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่ามุมสัมผัสมีค่ามุมสัมผัส 123.00° 124.19° 116.26° 94.22° 56.64° ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีมุมสัมผัสสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการล้างในทุกระดับความเข้มข้นของออกซิเจน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมบัติการไม่ชอบน้ำที่ดีขึ้นของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน

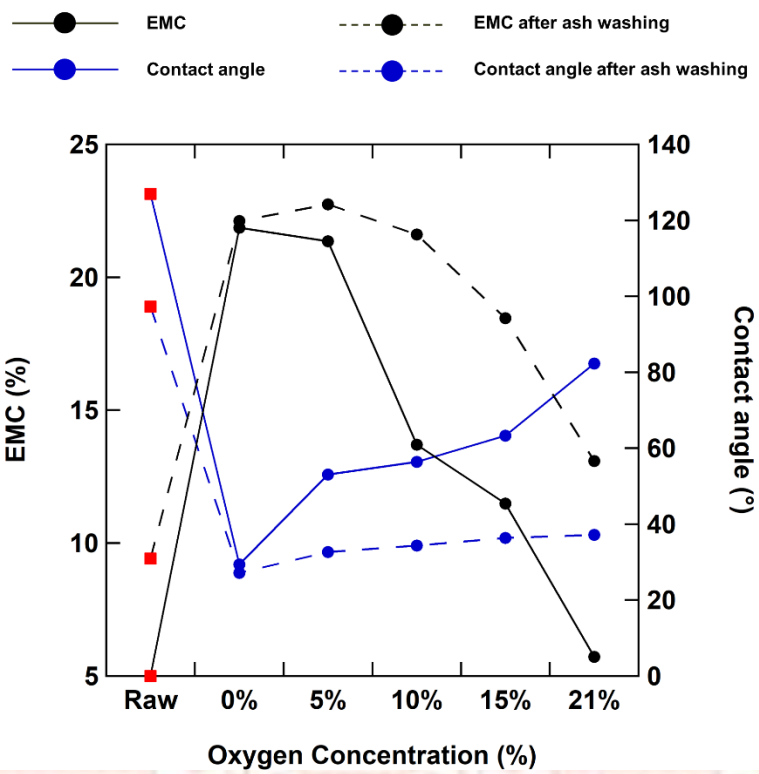
การเพิ่มขึ้นของค่ามุมสัมผัสหลังการล้างน้ำสามารถอธิบายได้ว่า ขี้เถ้าในเปลือกทุเรียนประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ เช่น โพแทสเซียม, แคลเซียม, โซเดียม และแมกนีเซียม ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ [73] ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสลดลง เมื่อมีการล้างเปลือกทุเรียนด้วยน้ำก่อนกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ธาตุที่ละลายน้ำได้จะถูกชะล้างออกไป ทำให้ปริมาณขี้เถ้าลดลง ซึ่งช่วยลดการดูดซับน้ำได้ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้น และแสดงออกมาในรูปของค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น การล้างน้ำจึงสามารถเพิ่มสมบัติการไม่ชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการปรับปรุงความเสถียรและศักยภาพในการจัดเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น

Torrefied samples	Contact angle of torrefied DP at various oxygen concentrations (%)				
	0	5	10	15	21
300°C					
Angle	123.00° (20 s)	124.19° (20 s)	116.26° (20 s)	94.22° (20 s)	56.64° (20 s)

ภาพที่ 4-29 การวิเคราะห์มุมสัมผัสที่เวลา 20 วินาทีของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนผ่านการล้างด้วยน้ำที่ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่างๆ เมื่อผ่านระยะเวลา 20 วินาที

4.14.11 ผลการวิเคราะห์หาความชื้นสมดุลกับค่ามุมสัมผัส

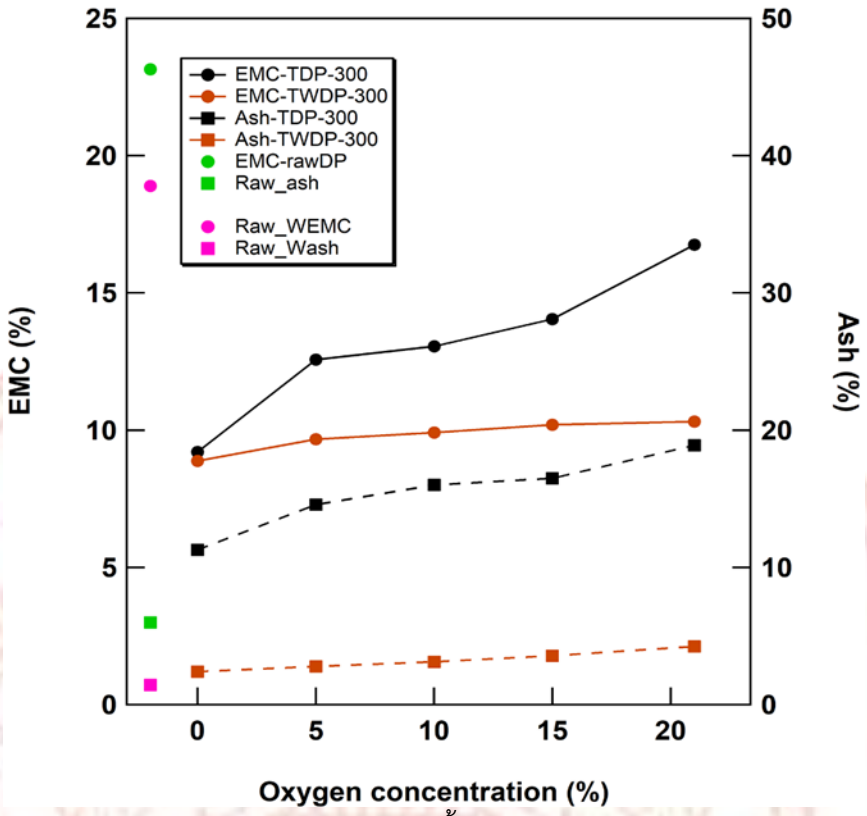
การวิเคราะห์ความชื้นสมดุลและมุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ก่อนและหลังล้างน้ำที่ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลกับค่ามุมสัมผัสต่อปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน โดยเป็นการพล็อตระหว่างค่าความชื้นสมดุลกับปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน และค่ามุมสัมผัสกับปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน แสดงดัง **ภาพที่ 4.30** จากผลการทดลองสมดุลความชื้นและมุมสัมผัสที่อุณหภูมิ 300 °C พบว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจนระหว่างค่าความชื้นและความไม่ชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ผ่านการล้างขี้เถ้าด้วยน้ำกับตัวอย่างที่ไม่ได้ล้างก่อนกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน เปลือกทุเรียนซึ่งมีปริมาณขี้เถ้าสูง แสดงค่าความชื้นสมดุลสูงสุดที่ร้อยละ 23.14 และมีค่ามุมสัมผัสต่ำที่สุดที่ 0° แสดงถึงสมบัติที่ชอบน้ำอย่างมาก อย่างไรก็ตาม เมื่อล้างเปลือกทุเรียนค่าความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 18.89 และค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นเป็น 30.93° บ่งชี้ว่าการล้างขี้เถ้าช่วยลดองค์ประกอบที่มีลักษณะชอบน้ำออกไปได้ ภายหลังจากกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในกระบวนการจากร้อยละ 0 ถึง 21 ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์แทบไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ค่ามุมสัมผัสกลับลดลงอย่างชัดเจนจาก 118.03° เหลือเพียง 5.09° ที่สภาวะออกซิเจนร้อยละ 21 แสดงถึงความชอบน้ำที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างที่ผ่านการล้างก่อนทอร์รีแฟกชันแสดงค่าความชื้นและค่ามุมสัมผัสที่ดีกว่าทุกกรณี โดยมีค่าความชื้นลดลงอย่างชัดเจน ดังนั้น การล้างเปลือกทุเรียนก่อนทอร์รีแฟกชันมีส่วนช่วยลดธาตุที่ชอบน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เปลือกทุเรียนมีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถต้านทานความชื้นได้ดีขึ้น สรุปได้ว่าค่าความชื้นสมดุล และ ค่ามุมสัมผัสมีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน โดยค่าความชื้นที่ต่ำลงจะส่งผลให้มุมสัมผัสสูงขึ้น แสดงถึงความไม่ชอบน้ำที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ ซึ่งเป็นผลมาจากการลดปริมาณแร่ธาตุที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำผ่านกระบวนการล้างน้ำก่อนออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน



ภาพที่ 4-30 ความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ความชื้นสมดุลและมุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนก่อนและหลังล้างน้ำที่ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

4.14.12 ผลการวิเคราะห์หาความชื้นสมดุลกับปริมาณขี้เถ้า

การวิเคราะห์ความชื้นสมดุลและปริมาณเถ้าของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ก่อนและหลังล้างน้ำที่ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 ใน**ภาพที่ 4.31** พบว่า ผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ไม่ผ่านการล้างน้ำ มีแนวโน้มที่ค่า ความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความชื้นสมดุลที่ร้อยละ 9.20 ที่ความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 0 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 16.75 ที่ความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 21 สำหรับผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ผ่านการล้างน้ำ มีค่าความชื้นสมดุลที่ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการล้างน้ำอย่างเห็นได้ชัด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเข้มข้นของออกซิเจน โดยมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 8.88 ที่ความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 0 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10.31 ที่ความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 21 นอกจากนี้ พบว่าผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ที่ไม่ผ่านการล้างน้ำมีปริมาณเถ้าค่อนข้างสูง การล้างน้ำเปลือกทุเรียนก่อนกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันส่งผลให้ปริมาณเถ้าในผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมาก และสอดคล้องกับการลดลงของค่าความชื้นสมดุล ซึ่งบ่งชี้ว่าการกำจัดเถ้าช่วยลดการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ได้



ภาพที่ 4-31 ความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ความชื้นสมดุลและปริมาณเถ้าของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่ก่อนและหลังล้างน้ำที่ 300 °C ระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 30 นาที ภายใต้สภาวะออกซิเจนต่าง ๆ

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษากระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันของเปลือกทุเรียนโดยใช้อุณหภูมิในช่วง 220–300 °C ระยะเวลาในการดำเนินการ 30 นาที ภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนตั้งแต่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 21 (โดยใช้แก๊สตัวกลางผสมระหว่างไนโตรเจนและออกซิเจน) รวมถึงศึกษาผลของการล้างน้ำที่มีต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ โดยเน้นการวิเคราะห์ทั้งด้านความเป็นเชื้อเพลิง พบว่า เวลาที่ใช้ในการทำกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกระบวนการสลายตัวของชีวมวล จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ถึง 30 นาที ร้อยละผลได้เชิงมวลมีแนวโน้มคงที่ แสดงว่าปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกทุเรียนเข้าสู่ภาวะสมดุลในช่วงเวลาดังกล่าว การเลือกใช้เวลา 30 นาทีจึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงอุณหภูมิสำหรับการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนในแก๊สตัวกลาง พบว่าทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อกระบวนการสลายตัวของเปลือกทุเรียน โดยเฉพาะเมื่อใช้ออกซิเจนเป็นแก๊สตัวกลาง ส่งผลให้ร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใช้ ลักษณะทางกายภาพก็ยังมีลักษณะเป็นรูพรุนมากขึ้น บ่งบอกได้ถึงการสลายตัวที่มากขึ้น จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางธาตุของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนในระบบ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 300 °C ภายใต้ความเข้มข้นของออกซิเจนร้อยละ 21 ปริมาณคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 78.82 ซึ่งมีผลต่อค่าความร้อนสูงสุดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงสุด เพิ่มขึ้นสูงถึง 35.21 เมกกะจูล/กิโลกรัม การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของธาตุนี้ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันทำให้เกิดปฏิกิริยา dehydration และ decarboxylation ซึ่งส่งผลให้สัดส่วนของธาตุไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ลดลง แต่จากการเปรียบเทียบค่า Energy Yield และ Carbon Yield พบว่าการเพิ่มออกซิเจนในระบบสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากจะทำให้คุณภาพเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ยังมีประสิทธิภาพในเพิ่มพลังงานและคาร์บอนคงเหลือไว้ในผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อการลดต้นทุนในกระบวนการผลิต รวมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากพลังงานที่สะสมต่อหน่วยมวลมีค่าสูงขึ้น การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน พบว่า ปริมาณคาร์บอนคงตัวในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นต่อเนื่องตามอุณหภูมิและออกซิเจนที่ใช้ในการทอร์รีแฟกชัน ขณะที่สารระเหยมีแนวโน้มลดลง และสำหรับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำ พบว่ามีปริมาณขี้เถ้าค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นแหล่งของธาตุที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ เช่น โพแทสเซียม (K), แคลเซียม (Ca), แมกนีเซียม (Mg) และโซเดียม (Na) การมีอยู่ของธาตุเหล่านี้ส่งผลให้เปลือกทุเรียนส่งผลต่อค่าความชื้นสมดุล (EMC) ที่สูง ยิ่งไปกว่านั้นเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนสูงทำให้ค่า EMC สูงขึ้น

ด้วย ขณะที่ค่ามุมสัมผัส ของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการล้างมีค่าต่ำกว่า 90° ซึ่งแสดงถึงสมบัติความชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ ผลการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 300 °C และปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 21 พบการเกิดของแถบดูดกลืนบริเวณประมาณ 1,640–1,610 ซม.$^{-1}$ ซึ่งสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชัน C=O ซึ่งอาจเกิดจากการสลายของทาร์ที่เคลือบพื้นผิวอนุภาคเดิม แล้วถูกออกซิไดซ์จนเกิดเป็นกลุ่มที่มีความชอบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติไม่ชอบน้ำลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสที่ลดลง และค่าความชื้นสมดุลที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนในกระบวนการเพิ่มขึ้น

การล้างเปลือกทุเรียนด้วยน้ำก่อนการออฟซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของเปลือกทุเรียน โดยพบว่าการล้างน้ำช่วยลดปริมาณเถ้าในเปลือกทุเรียนได้มากถึง 4–5 เท่า ซึ่งลดปริมาณธาตุที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการสลายตัวและยังช่วยลดปริมาณธาตุที่มีความชอบน้ำ เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม และซิลิกอน ซึ่งส่งผลต่อค่าความชื้นสมดุลและสมบัติความไม่ชอบน้ำของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์โดยตรง จากผลการวิเคราะห์มุมสัมผัส และค่าความชื้นสมดุล พบว่า การล้างน้ำก่อนกระบวนการทอร์รีแฟกชันทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในสภาวะที่อุณหภูมิสูง เช่น ที่อุณหภูมิ 280 °C และปริมาณออกซิเจนร้อยละ 10 มุมสัมผัสสูงถึง 124.2° ขณะที่ค่าความชื้นสมดุลลดลงอย่างชัดเจน ทำให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณออกซิเจนในกระบวนการทอร์รีแฟกชันมีผลเพิ่มปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน เช่น C-O และ O-C=O ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความชอบน้ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อล้างน้ำก่อนการทอร์รีแฟกชัน ปริมาณหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ลดลง ทำให้พื้นผิวของผลิตภัณฑ์มีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของ EMC และการเพิ่มขึ้นของค่ามุมสัมผัส นอกจากนี้ การล้างน้ำเปลือกทุเรียนก่อนกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันส่งผลให้ปริมาณเถ้าในผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมาก และยังสอดคล้องกับการลดลงของค่าความชื้นสมดุลด้วย ซึ่งบ่งชี้ว่าขี้เถ้าเป็นปัจจัยสำคัญช่วยลดการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์ได้

โดยสรุป กระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชันที่ควบคุมทั้งอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนอย่างเหมาะสม รวมถึงการเตรียมเปลือกทุเรียนด้วยการล้างน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลคุณภาพดีจากเปลือกทุเรียน สามารถลดปริมาณเถ้า ลดความชอบน้ำ และช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาชีวมวลประเภทอื่นๆ ที่มีองค์ประกอบธาตุในชีวมวลที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาวิเคราะห์ความเป็นเชื้อเพลิง
2. ศึกษาปฏิกิริยาทางความร้อนเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

บรรณานุกรม

[1] U. Jaroenkietkajorn *et al.*, “Challenges and Opportunities of Bio-Circular-Green Economy for Agriculture,” *Circular Economy and Sustainability*, vol. 4, no. 3, pp. 1729–1750, Sep. 2024, doi: 10.1007/s43615-024-00355-9.

[2] A. Rani, S. Negi, C. Fan, S. S. Lam, H. Kim, and S.-Y. Pan, “Revitalizing plastic wastes employing bio-circular-green economy principles for carbon neutrality,” *J Hazard Mater*, vol. 472, p. 134394, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.134394.

[3] B. Cheirsilp, W. Maneechote, S. Srinuanpan, and I. Angelidaki, “Microalgae as tools for bio-circular-green economy: Zero-waste approaches for sustainable production and biorefineries of microalgal biomass,” *Bioresour Technol*, vol. 387, p. 129620, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.biortech.2023.129620.

[4] K. Jha *et al.*, “Eco-friendly approach for carboxymethyl cellulose isolation from durian peel waste and aerogel scaffold preparation,” *Nano-Structures & Nano-Objects*, vol. 40, p. 101345, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.nanoso.2024.101345.

[5] Y. W. Tiana, “Pengolahan Limbah Kulit Durian Menjadi Lembaran Serat yang Bernilai Ekonomis dengan Metode Green Manufacturing,” 2019.

[6] M. Faisal, A. R.YelviaSunarti, and H. Desvita, “CHARACTERISTICS OF LIQUID SMOKE FROM THE PYROLYSIS OF DURIAN PEEL WASTE AT MODERATE TEMPERATURES,” *Rasayan Journal of Chemistry*, vol. 11, no. 2, pp. 871–876, 2018, doi: 10.31788/RJC.2018.1123035.

[7] N. Herlina, S. A. Rahayu, Y. A. Sari, and H. Monica, “Utilization of durian peel waste and young coconut waste into biobriquettes as a renewable energy source,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1352, no. 1, p. 012014, May 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1352/1/012014.

[8] M. J. Prins, K. J. Ptasinski, and F. J. J. G. Janssen, “Torrefaction of wood,” *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 77, no. 1, pp. 35–40, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.jaap.2006.01.001.

[9] D. Chen, J. Zhou, Q. Zhang, X. Zhu, and Q. Lu, “Upgrading of Rice Husk by Torrefaction and its Influence on the Fuel Properties.”

[10] M. J. Wang, Y. F. Huang, P. T. Chiueh, W. H. Kuan, and S. L. Lo, “Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues,” *Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 177–184, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.energy.2011.11.053.

[11] Q. Wang, S. Sun, X. Zhang, H. Liu, B. Sun, and S. Guo, “Influence of air oxidative and non-oxidative torrefaction on the chemical properties of corn stalk,” *Bioresour Technol*, vol. 332, p. 125120, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125120.

[12] C.-Y. Zhang, C. Wang, G. Cao, W.-H. Chen, and S.-H. Ho, “Comparison and characterization of property variation of microalgal biomass with non-oxidative and oxidative torrefaction,” *Fuel*, vol. 246, pp. 375–385, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.02.139.

[13] W.-H. Chen, K.-M. Lu, W.-J. Lee, S.-H. Liu, and T.-C. Lin, “Non-oxidative and oxidative torrefaction characterization and SEM observations of fibrous and ligneous biomass,” *Appl Energy*, vol. 114, pp. 104–113, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.09.045.

[14] C. Zhang, S.-H. Ho, W.-H. Chen, Y. Fu, J.-S. Chang, and X. Bi, “Oxidative torrefaction of biomass nutshells: Evaluations of energy efficiency as well as biochar transportation and storage,” *Appl Energy*, vol. 235, pp. 428–441, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.090.

[15] X. Cao *et al.*, “Effects of oxidative torrefaction on the physicochemical properties and pyrolysis products of hemicellulose in bamboo processing residues,” *Ind Crops Prod*, vol. 191, p. 115986, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115986.

[16] D. Chen, F. Chen, K. Cen, X. Cao, J. Zhang, and J. Zhou, "Upgrading rice husk via oxidative torrefaction: Characterization of solid, liquid, gaseous products and a comparison with non-oxidative torrefaction," *Fuel*, vol. 275, p. 117936, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117936.

[17] Z. Zhao *et al.*, "Investigation on the fuel quality and hydrophobicity of upgraded rice husk derived from various inert and oxidative torrefaction conditions," *Renew Energy*, vol. 189, pp. 1234–1248, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.03.087.

[18] S. V. Vassilev, C. G. Vassileva, Y.-C. Song, W.-Y. Li, and J. Feng, "Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion," *Fuel*, vol. 208, pp. 377–409, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.07.036.

[19] C. U. Jensen, J. K. Rodriguez Guerrero, S. Karatzos, G. Olofsson, and S. B. Iversen, "Fundamentals of Hydrofaction™: Renewable crude oil from woody biomass," *Biomass Convers Biorefin*, vol. 7, no. 4, pp. 495–509, Dec. 2017, doi: 10.1007/s13399-017-0248-8.

[20] R. Tambun, B. Haryanto, V. Alexander, D. R. Manurung, and A. P. Ritonga, "Durian peel (Durio zibethinus) utilization as an adsorbent in the purification of acidified crude glycerol," *S Afr J Chem Eng*, vol. 49, pp. 162–169, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.sajce.2024.05.002.

[21] N. S. Ha, G. Lu, D. Shu, and T. X. Yu, "Mechanical properties and energy absorption characteristics of tropical fruit durian (Durio zibethinus)," *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 104, p. 103603, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jmbbm.2019.103603.

[22] A. Manmeen, P. Kongjan, A. Palamanit, and R. Jariyaboon, "Biochar and pyrolysis liquid production from durian peel by using slow pyrolysis process: Regression analysis, characterization, and economic assessment," *Ind Crops Prod*, vol. 203, p. 117162, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.indcrop.2023.117162.

[23] S. Haryati, Rahmatullah, and R. W. Putri, "Torrefaction of Durian peel and bagasse for bio-briquette as an alternative solid fuel," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 334, p. 012008, Mar. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/334/1/012008.

[24] J. Pimsamarn *et al.*, "Torrefaction of durian peel in air and N2 atmospheres: Impact on chemical properties and optimization of energy yield using multilevel factorial design," *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102767, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102767.

[25] A. Herlambang, I. L. Boangmanalu, F. Tursida, A. Budiman, H. D. K. Kusuma, and A. Saputra, "Production and Characterization of Bio-Briquettes Derived from Torrefied Cocoa Pod Husk and Durian Peel," *Natural and Life Sciences Communications*, vol. 24, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.12982/NLSC.2025.032.

[26] W.-H. Chen, J. Peng, and X. T. Bi, "A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 847–866, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.039.

[27] B. Arias, C. Pevida, J. Fermoso, M. G. Plaza, F. Rubiera, and J. J. Pis, "Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass," *Fuel Processing Technology*, vol. 89, no. 2, pp. 169–175, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.fuproc.2007.09.002.

[28] P. Rousset, C. Aguiar, N. Labbé, and J.-M. Commandré, "Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction," *Bioresour Technol*, vol. 102, no. 17, pp. 8225–8231, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.05.093.

[29] Y. Chen, H. Yang, Q. Yang, H. Hao, B. Zhu, and H. Chen, "Torrefaction of agriculture straws and its application on biomass pyrolysis poly-generation," *Bioresour Technol*, vol. 156, pp. 70–77, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.088.

[30] M. Wilk, A. Magdziarz, and I. Kalemba, "Characterisation of renewable fuels' torrefaction process with different instrumental techniques," *Energy*, vol. 87, pp. 259–269, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.04.073.

[31] W.-H. Chen *et al.*, "Hygroscopic transformation of woody biomass torrefaction for carbon storage," *Appl Energy*, vol. 231, pp. 768–776, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.09.135.

[32] M. Khairy, M. Amer, M. Ibrahim, S. Ookawara, H. Sekiguchi, and A. Elwardany, "The influence of torrefaction on the biochar characteristics produced from sesame stalks and bean husk," *Biomass Convers Biorefin*, vol. 14, no. 15, pp. 17127–17148, Aug. 2024, doi: 10.1007/s13399-023-03822-9.

[33] Y. Uemura, W. Omar, N. A. Othman, S. Yusup, and T. Tsutsui, "Torrefaction of oil palm EFB in the presence of oxygen," *Fuel*, vol. 103, pp. 156–160, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2011.11.018.

[34] W.-H. Chen, K.-M. Lu, W.-J. Lee, S.-H. Liu, and T.-C. Lin, "Non-oxidative and oxidative torrefaction characterization and SEM observations of fibrous and ligneous biomass," *Appl Energy*, vol. 114, pp. 104–113, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.09.045.

[35] Y. Uemura, S. Saadon, N. Osman, N. Mansor, and K. Tanoue, "Torrefaction of oil palm kernel shell in the presence of oxygen and carbon dioxide," *Fuel*, vol. 144, pp. 171–179, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2014.12.050.

[36] L. Zhang *et al.*, "Analysis of functionality distribution and microstructural characteristics of upgraded rice husk after undergoing non-oxidative and oxidative torrefaction," *Fuel*, vol. 310, p. 122477, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122477.

[37] X. Cao *et al.*, "Pyrolysis characteristics of torrefied kraft lignin prepared under oxidative and non-oxidative atmospheres," *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 167, p. 105657, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jaap.2022.105657.

[38] S. Jadsadajerm, J. Wannapeera, A. Phopiyanukror, and N. Worasuwannarak, "Influence of oxygen concentration on torrefaction of Leucaena: gas formation rates

and chemical properties analysis," *Biomass Convers Biorefin*, vol. 15, no. 5, pp. 7989–7999, Mar. 2025, doi: 10.1007/s13399-024-05589-z.

[39] S. Y. Park, S. J. Kim, K. C. Oh, L. H. Cho, Y. K. Jeon, and D. H. Kim, "Evaluation of the Optimal Conditions for Oxygen-Rich and Oxygen-Lean Torrefaction of Forestry Byproduct as a Fuel," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 12, p. 4763, Jun. 2023, doi: 10.3390/en16124763.

[40] H. Sui *et al.*, "Effect of oxidative torrefaction on fuel and pelletizing properties of agricultural biomass in comparison with non-oxidative torrefaction," *Renew Energy*, vol. 226, p. 120423, May 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120423.

[41] Y. Jiang, K.-H. Park, and C.-H. Jeon, "Feasibility Study of Co-Firing of Torrefied Empty Fruit Bunch and Coal through Boiler Simulation," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 12, p. 3051, Jun. 2020, doi: 10.3390/en13123051.

[42] Z. Dong and Y. Song, "Transformations of Cold-Compressed Multiwalled Boron Nitride Nanotubes Probed by Infrared Spectroscopy," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 114, no. 4, pp. 1782–1788, Feb. 2010, doi: 10.1021/jp908165r.

[43] A. Baral *et al.*, "Characterisation of iron-rich cementitious materials," *Cem Concr Res*, vol. 177, p. 107419, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2023.107419.

[44] L. A. Giannuzzi, "Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis 4th Edition, Joseph I. Goldstein, Dale E. Newbury, Joseph R. Michael, Nicholas W.M. Ritchie, John Henry J. Scott, David C. Joy, Springer, 2018, 550 pp. ISBN:978-1-4939-6674-5.," *Microscopy and Microanalysis*, vol. 24, no. 6, pp. 768–768, Dec. 2018, doi: 10.1017/S1431927618015271.

[45] Y. Yuan and T. R. Lee, "Contact Angle and Wetting Properties," 2013, pp. 3–34. doi: 10.1007/978-3-642-34243-1_1.

[46] R. J. A. Felisardo, G. M. Silva, E. dos S. Lourenço, C. S. A. Miranda, J. C. de Figueredo Filho, and F. S. Serpa, "AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADITIVOS EM FLUIDO

DE PERFURAÇÃO A BASE DE ÁGUA COM APLICABILIDADE EM FOLHELHOS DA FORMAÇÃO CALUMBI," *Brazilian Journal of Production Engineering*, pp. 91–108, May 2022, doi: 10.47456/bjpe.v8i3.37896.

[47] S. Park *et al.*, "Thermogravimetric analysis-based proximate analysis of agro-byproducts and prediction of calorific value," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 12038–12044, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.09.040.

[48] E. Müsellim, M. H. Tahir, M. S. Ahmad, and S. Ceylan, "Thermokinetic and TG/DSC-FTIR study of pea waste biomass pyrolysis," *Appl Therm Eng*, vol. 137, pp. 54–61, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.050.

[49] W. H. Orem and R. B. Finkelman, "Coal Formation and Geochemistry," in *Treatise on Geochemistry*, Elsevier, 2003, pp. 191–222. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/07097-3.

[50] M.-F. Li, X. Li, J. Bian, C.-Z. Chen, Y.-T. Yu, and R.-C. Sun, "Effect of temperature and holding time on bamboo torrefaction," *Biomass Bioenergy*, vol. 83, pp. 366–372, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.10.016.

[51] Z. Huang *et al.*, "Oxidative Torrefaction of Phragmites australis: Gas-Pressurized Effects and Correlation Analysis Based on Color Value," *Energy & Fuels*, vol. 34, no. 9, pp. 11073–11082, Sep. 2020, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c01974.

[52] H. Liu, J. Liu, H. Huang, F. Evrendilek, Y. He, and M. Buyukada, "Combustion parameters, evolved gases, reaction mechanisms, and ash mineral behaviors of durian shells: A comprehensive characterization and joint-optimization," *Bioresour Technol*, vol. 314, p. 123689, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123689.

[53] J. Pimsamarn *et al.*, "Torrefaction of durian peel in air and N2 atmospheres: Impact on chemical properties and optimization of energy yield using multilevel factorial design," *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102767, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102767.

[54] J. Xu *et al.*, "Upgrading the quality of biomass by advanced oxidative torrefaction pretreatment: Rebuilding the oxidative torrefaction mechanism based on hemicellulose, cellulose, and lignin," *Chemical Engineering Journal*, vol. 494, p. 153044, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.153044.

[55] S. Ramos-Carmona, J. D. Martínez, and J. F. Pérez, "Torrefaction of patula pine under air conditions: A chemical and structural characterization," *Ind Crops Prod*, vol. 118, pp. 302–310, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.03.062.

[56] N. Setkit, X. Li, H. Yao, and N. Worasuwannarak, "Torrefaction behavior of hot-pressed pellets prepared from leucaena wood," *Bioresour Technol*, vol. 321, p. 124502, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124502.

[57] C. Wang *et al.*, "Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets," *Bioresour Technol*, vol. 127, pp. 318–325, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2012.09.092.

[58] P. Rousset, L. Macedo, J.-M. Commandré, and A. Moreira, "Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product," *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 96, pp. 86–91, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.jaap.2012.03.009.

[59] M. A. Kalifa, N. G. Habtu, A. L. Jembere, and M. B. Genet, "Characterization and evaluation of torrefied sugarcane bagasse to improve the fuel properties," *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 8, p. 100395, 2024, doi: 10.1016/j.crgsc.2023.100395.

[60] X. Cao *et al.*, "Effects of oxidative torrefaction on the physicochemical properties and pyrolysis products of hemicellulose in bamboo processing residues," *Ind Crops Prod*, vol. 191, p. 115986, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115986.

[61] Z. Zhao *et al.*, "Investigation on the fuel quality and hydrophobicity of upgraded rice husk derived from various inert and oxidative torrefaction conditions," *Renew Energy*, vol. 189, pp. 1234–1248, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.03.087.

[62] W.-H. Chen, B.-J. Lin, B. Colin, A. Pétrissans, and M. Pétrissans, "A study of hygroscopic property of biomass pretreated by torrefaction," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 32–36, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.030.

[63] D. Ciolkosz and R. Wallace, "A review of torrefaction for bioenergy feedstock production," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 5, no. 3, pp. 317–329, May 2011, doi: 10.1002/bbb.275.

[64] Z. Zhao *et al.*, "Investigation on the fuel quality and hydrophobicity of upgraded rice husk derived from various inert and oxidative torrefaction conditions," *Renew Energy*, vol. 189, pp. 1234–1248, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.03.087.

[65] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, "An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification," *Fuel*, vol. 105, pp. 40–76, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.09.041.

[66] H. Lin, S. Wang, L. Zhang, B. Ru, J. Zhou, and Z. Luo, "Structural evolution of chars from biomass components pyrolysis in a xenon lamp radiation reactor," *Chin J Chem Eng*, vol. 25, no. 2, pp. 232–237, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.cjche.2016.08.002.

[67] Y. W. Bandara, P. Gamage, and D. S. Gunarathne, "Hot water washing of rice husk for ash removal: The effect of washing temperature, washing time and particle size," *Renew Energy*, vol. 153, pp. 646–652, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.02.038.

[68] L. Deng, T. Zhang, and D. Che, "Effect of water washing on fuel properties, pyrolysis and combustion characteristics, and ash fusibility of biomass," *Fuel*

Processing Technology, vol. 106, pp. 712–720, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.fuproc.2012.10.006.

[69] Q. Ma, L. Han, and G. Huang, "Evaluation of different water-washing treatments effects on wheat straw combustion properties," *Bioresour Technol*, vol. 245, pp. 1075–1083, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.052.

[70] A. Singhal, J. Konttinen, and T. Joronen, "Effect of different washing parameters on the fuel properties and elemental composition of wheat straw in water-washing pre-treatment. Part 1: Effect of washing duration and biomass size," *Fuel*, vol. 292, p. 120206, May 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120206.

[71] C. Yu *et al.*, "Influence of leaching pretreatment on fuel properties of biomass," *Fuel Processing Technology*, vol. 128, pp. 43–53, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.fuproc.2014.06.030.

[72] L. Deng, T. Zhang, and D. Che, "Effect of water washing on fuel properties, pyrolysis and combustion characteristics, and ash fusibility of biomass," *Fuel Processing Technology*, vol. 106, pp. 712–720, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.fuproc.2012.10.006.

[73] M. D. Nurhafizah, O. O. Akinnawo, N. Abdullah, and A. B. Suriani, "Influence of washing parameters on biomass and biochar properties of empty fruit bunches from oil palm plantation," *Biomass Convers Biorefin*, vol. 15, no. 4, pp. 6511–6524, Feb. 2025, doi: 10.1007/s13399-024-05830-9.

ภาคผนวก ก

อิทธิพลของระยะเวลาที่คงอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน

ตารางที่ ก-1 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่เวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา	ครั้งที่	น้ำหนักเปลือกทุเรียน		ร้อยละผลได้เชิงมวล (%)	ร้อยละผลได้เชิงมวลเฉลี่ย (%)
			ก่อนทอร์รีแฟกชัน (g)	หลังทอร์รีแฟกชัน (g)		
220	0	1	3.006	2.858	95.077	94.696
		2	3.002	2.839	94.570	
		3	3.004	2.837	94.441	
	15	1	3.004	2.655	88.382	86.574
		2	3.005	2.492	82.928	
		3	3.003	2.655	88.412	
	30	1	3.005	2.579	85.824	86.187
		2	3.000	2.599	86.633	
		3	3.001	2.584	86.105	
240	0	1	3.005	2.691	89.551	89.080
		2	3.002	2.685	89.440	
		3	3.004	2.651	88.249	
	15	1	3.004	2.479	82.523	82.632
		2	3.000	2.498	83.267	
		3	3.001	2.464	82.106	
	30	1	3.002	2.396	79.813	79.131
		2	3.002	2.36	78.614	
		3	3.000	2.369	78.967	
260	0	1	3.004	2.573	85.652	86.872
		2	3.002	2.658	88.541	
		3	3.005	2.597	86.423	
	15	1	3.005	2.268	75.474	85.811
		2	3.002	2.319	77.249	
		3	3.005	2.245	74.709	
	30	1	3.003	2.142	71.329	72.521
		2	3.003	2.204	73.393	
		3	3.001	2.186	72.842	

ตารางที่ ก-1 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 oC ที่เวลาต่างๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	เวลา	ครั้งที่	น้ำหนักเปลือกทุเรียน		ร้อยละผลได้เชิงมวล (%)	ร้อยละผลได้เชิงมวลเฉลี่ย (%)
			ก่อนทอร์รีแฟกชัน (g)	หลังทอร์รีแฟกชัน (g)		
280	0	1	3.006	2.394	79.641	79.083
		2	3.003	2.360	78.588	
		3	3.003	2.373	79.021	
	15	1	3.003	2.055	68.432	68.283
		2	3.004	2.096	69.774	
		3	3.004	2.002	76.644	
	30	1	3.005	1.836	61.098	61.179
		2	3.004	1.842	61.318	
		3	2.999	1.833	61.120	
300	0	1	3.005	2.227	74.110	75.361
		2	3.002	2.306	76.815	
		3	3.003	2.257	75.158	
	15	1	3.000	1.798	59.933	56.084
		2	3.005	1.643	54.676	
		3	3.005	1.612	53.644	
	30	1	3.018	1.518	50.298	50.310
		2	3.007	1.532	50.948	
		3	3.005	1.493	49.684	

ภาคผนวก ข

อิทธิพลของอุณหภูมิและร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนในกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟกชัน

ตารางที่ ข-1 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณออกซิเจน (%)	ครั้งที่	น้ำหนักเปลือกทุเรียน		ร้อยละผลได้เชิงมวล (%)	ร้อยละผลได้เชิงมวลเฉลี่ย (%)
			ก่อนทอร์รีแฟกชัน (g)	หลังทอร์รีแฟกชัน (g)		
220	0	1	3.005	2.579	85.824	50.310
		2	3.000	2.599	86.633	
		3	3.001	2.584	86.105	
	5	1	3.006	2.564	85.296	84.126
		2	3.002	2.501	83.311	
		3	3.001	2.514	83.772	
	10	1	3.004	2.117	70.473	71.522
		2	3.001	2.166	72.176	
		3	3.002	2.159	71.919	
	15	1	3.007	1.943	64.616	64.362
		2	3.003	1.892	63.004	
		3	3.000	1.964	65.467	
	21	1	3.007	1.943	64.616	52.421
		2	3.003	1.892	63.004	
		3	3.000	1.964	65.467	
240	0	1	3.002	2.396	79.813	79.131
		2	3.002	2.36	78.614	
		3	3.000	2.369	78.967	
	5	1	3.003	2.182	72.661	73.474
		2	3.004	2.202	73.302	
		3	3.003	2.236	74.459	
	10	1	3.001	1.818	60.580	62.583
		2	3.002	1.915	63.791	
		3	3.001	1.902	63.379	
	15	1	3.004	1.72	57.257	58.297
		2	3.002	1.734	57.761	
		3	3.003	1.798	59.873	
	21	1	3.001	1.403	46.751	47.109
		2	3.005	1.390	49.256	
		3	3.003	1.451	48.318	

ตารางที่ ข-1 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่างๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณออกซิเจน (%)	ครั้งที่	น้ำหนักเปลือกทุเรียน		ร้อยละผลได้เชิงมวล (%)	ร้อยละผลได้เชิงมวลเฉลี่ย (%)
			ก่อนทอร์รีแฟกชัน (g)	หลังทอร์รีแฟกชัน (g)		
260	0	1	3.003	2.142	71.329	72.521
		2	3.003	2.204	73.393	
		3	3.001	2.186	72.842	
	5	1	3.004	1.910	63.582	62.564
		2	3.004	1.852	61.651	
		3	3.002	1.875	62.458	
	10	1	3.005	1.718	57.171	56.499
		2	3.002	1.682	56.029	
		3	3.002	1.690	56.296	
	15	1	3.005	1.493	49.684	50.428
		2	4.003	2.034	50.812	
		3	4.003	2.033	50.787	
	21	1	3.000	1.366	45.533	44.786
		2	3.004	1.372	45.672	
		3	3.001	1.295	43.152	
280	0	1	3.005	1.836	61.098	61.179
		2	3.004	1.842	61.318	
		3	2.999	1.833	61.120	
	5	1	3.004	1.910	63.582	62.564
		2	3.004	1.852	61.651	
		3	3.002	1.875	62.458	
	10	1	3.005	1.718	57.171	59.499
		2	3.002	1.682	56.029	
		3	3.002	1.690	56.296	
	15	1	3.006	1.394	46.374	46.189
		2	3.004	1.432	47.670	
		3	3.003	1.337	44.522	
	21	1	3.000	1.189	39.633	40.435
		2	3.001	1.223	40.753	
		3	3.001	1.228	40.920	

ตารางที่ ข-1 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่างๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณออกซิเจน (%)	ครั้งที่	น้ำหนักเปลือกทุเรียน		ร้อยละผลได้เชิงมวล (%)	ร้อยละผลได้เชิงมวลเฉลี่ย (%)
			ก่อนทอร์รีแฟกชัน (g)	หลังทอร์รีแฟกชัน (g)		
300	0	1	3.018	1.518	50.298	50.310
		2	3.007	1.532	50.948	
		3	3.005	1.493	49.684	
	5	1	3.005	1.456	48.453	48.307
		2	3.004	1.452	48.336	
		3	3.000	1.444	48.133	
	10	1	3.003	1.343	44.722	44.362
		2	3.003	1.296	43.157	
		3	3.004	1.358	45.206	
	15	1	3.004	1.251	41.644	42.171
		2	3.004	1.303	43.375	
		3	3.003	1.246	41.492	
	21	1	3.002	1.094	36.442	35.210
		2	3.000	1.068	35.600	
		3	3.001	1.008	33.589	

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน

ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณออกซิเจน (%)	C	H	N	O	H/C	O/C	HHV (MJ/kg)
		(%d.a.f)						
เปลือกทุเรียน		48.00	6.50	1.06	44.43	1.61	0.79	19.22
220	0	49.77	6.39	1.11	42.73	1.53	0.74	19.98
	5	52.63	6.20	1.09	40.07	1.40	0.65	21.23
	10	53.68	6.24	1.14	38.94	1.38	0.62	21.75
	15	60.46	5.74	1.43	32.37	1.13	0.46	24.95
	21	62.96	5.54	1.43	30.07	1.05	0.41	26.16
240	0	53.81	6.14	1.25	38.79	1.36	0.62	21.79
	5	56.21	6.10	1.15	36.54	1.29	0.56	22.93
	10	60.64	5.64	1.55	32.17	1.11	0.45	25.00
	15	63.92	5.07	1.53	29.49	0.94	0.40	26.32
	21	64.91	5.30	1.54	28.26	0.97	0.37	27.07
260	0	56.21	6.13	1.19	36.47	1.30	0.56	22.95
	5	61.07	5.57	1.19	32.16	1.09	0.45	25.13
	10	67.04	5.19	1.55	26.21	0.92	0.34	28.20
	15	68.09	5.03	1.55	25.30	0.88	0.32	28.66
	21	70.55	4.81	1.60	23.04	0.81	0.28	29.90
280	0	58.52	5.93	1.28	34.27	1.20	0.50	24.03
	5	66.60	5.59	1.52	26.30	1.00	0.34	28.30
	10	70.37	4.82	1.64	23.17	0.81	0.28	29.80
	15	70.68	4.89	1.58	22.85	0.82	0.28	30.06
	21	74.33	4.72	1.62	19.34	0.75	0.22	32.13
300	0	67.07	5.71	1.46	25.76	1.01	0.33	28.69
	5	71.60	5.24	1.72	21.43	0.87	0.26	31.04
	10	73.04	4.88	1.66	20.43	0.79	0.24	31.51
	15	73.94	5.62	1.51	18.93	0.90	0.22	32.97
	21	78.72	4.84	1.56	14.87	0.73	0.16	35.21

ตารางที่ ค-2 ค่า Energy yield และ Carbon yield ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณออกซิเจน (%)	Energy yield (%)	Carbon yield (%)
220	0	88.62	88.40
	5	91.49	90.83
	10	79.35	78.43
	15	79.22	76.87
	21	66.43	64.02
240	0	88.24	87.28
	5	84.90	83.35
	10	77.80	75.58
	15	73.13	71.11
	21	60.56	58.16
260	0	84.90	83.26
	5	78.27	76.16
	10	77.09	73.40
	15	69.61	66.24
	21	63.14	59.68
280	0	75.41	73.53
	5	72.87	68.68
	10	68.36	64.64
	15	65.81	61.97
	21	59.97	55.54
300	0	71.44	66.90
	5	71.47	66.04
	10	65.52	60.82
	15	64.79	58.20
	21	56.11	50.24

ตารางที่ ค-3 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิ 220 – 300 °C ที่ร้อยละความเข้มข้นออกซิเจนต่าง ๆ

อุณหภูมิ	ปริมาณออกซิเจน (%)	VM	FC	Ash
		(%dry basis)		
เปลือกทุเรียน		72.12	21.11	6.78
220	0	68.60	23.62	7.78
	5	67.42	24.38	8.20
	10	64.99	26.41	8.60
	15	51.59	36.81	11.60
	21	47.34	39.46	13.20
240	0	66.06	25.65	8.28
	5	60.90	29.40	9.70
	10	51.48	37.64	10.88
	15	44.59	40.81	14.60
	21	43.65	41.47	14.89
260	0	63.49	27.91	8.60
	5	52.65	36.55	10.80
	10	46.09	40.62	13.29
	15	40.62	45.71	13.67
	21	41.31	43.21	15.48
280	0	59.45	32.46	8.09
	5	45.20	41.27	13.53
	10	42.73	42.80	14.47
	15	36.40	48.54	15.05
	21	39.97	42.73	17.30
300	0	47.81	40.90	11.29
	5	37.01	48.41	14.57
	10	36.97	47.03	16.00
	15	36.26	47.25	16.48
	21	34.20	46.90	18.90

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวณัฐวรรณ เสาแก้ว
ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติของเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการออกซิเดทีฟทอร์รีแฟคชันเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ประวัติ	มัธยมศึกษาตอนต้น-ปลาย โรงเรียนสงวนหญิง สุพรรณบุรี
	ปริญญาตรี ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี