FRONTIERS IN ENGINEERING INNOVATION RESEARCH

Front. Eng. Innov. Res.
ISSN: 3056-9273 (Online)

การปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงแข็งของเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกล

วริษรา จ่ายอั้น[1] พลอยไพลิน ชุมเมฆ[1] กิติภา หนูเลี่ยง[1] และ สุพาชัย เจษฎาเจิม[1*]

[1] ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[*] ผู้ประพันธ์บรรณกิจ.
ที่อยู่อีเมล: supachai.j@sci.kmutnb.ac.th

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

บทคัดย่อ

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

คำสำคัญ: เปลือกทุเรียน กระบวนการทอร์รีแฟกชัน ความดันเชิงกล ทอร์รีไฟด์ คาร์บอนคงตัว

FRONTIERS IN ENGINEERING INNOVATION RESEARCH

Front. Eng. Innov. Res.
ISSN: 3056-9273 (Online)

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

Waritsara Chaioan[1], Phoipailin Chummek[1], Kitipa Nuliang[1] and Supachai Jadsadajerm[1*]

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

[*] Corresponding author.
Email address: supachai.j@sci.kmutnb.ac.th

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

Abstract

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

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

1. บทนำ

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

เปลือกทุเรียนเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศไทย เนื่องจากการบริโภคและการแปรรูปทุเรียนก่อให้เกิดของเสียในรูปเปลือกจำนวนมาก โดยรายงานก่อนหน้าระบุว่าเปลือกทุเรียนมีสัดส่วนมากกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำหนักผลทั้งหมด หรือประมาณร้อยละ 60–70 ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาด้านการจัดการของเสียและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม [7] นอกจากนี้ เปลือกทุเรียนยังเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยมีรายงานว่ามีเซลลูโลสประมาณร้อยละ 31–35 หรืออาจสูงถึงราวร้อยละ 50–60 ขึ้นอยู่กับพันธุ์ วิธีการเตรียมตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์ ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม [8–10] มีการนำเปลือกทุเรียนไปใช้ประโยชน์หลายรูปแบบ เช่น การผลิตน้ำตาลหมักได้ การเตรียมวัสดุคาร์บอน และการผลิตถ่านชีวภาพหรือผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสเพื่อเพิ่มมูลค่าและลดปริมาณของเสีย [9,11,12] อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ชีวมวลหรือถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเพียงอย่างเดียวยังอาจมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ผลได้เชิงมวลไม่สูงนัก ความหนาแน่นต่ำ และความจำเป็นในการปรับปรุงสมบัติด้านการขึ้นรูปและการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้เหมาะสมยิ่งขึ้น [11,13,14]

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงเสนอการปรับปรุงคุณสมบัติของเปลือกทุเรียนก่อนนำไปผลิตเป็นถ่านชีวภาพ ด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกล กระบวนการทอร์รีแฟกชันเป็นกระบวนการสลายตัวทางเคมีความร้อนที่ช่วยลดความชื้นและสารระเหยของชีวมวล โดยทั่วไปดำเนินการที่อุณหภูมิ 200–350 °C ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิส และมักดำเนินการที่ความดันบรรยากาศ ผลิตภัณฑ์หลักคือชีวมวลทอร์รีไฟด์ซึ่งเป็นของแข็งสีดำที่มีคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงดีขึ้น ขณะที่ผลิตภัณฑ์รองอยู่ในรูปก๊าซและของเหลว เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน น้ำ และไบโอออยล์ แม้ว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวลได้ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังอาจมีข้อจำกัดด้านความหนาแน่นและความเปราะ ซึ่งส่งผลต่อการใช้งานและการขึ้นรูป ดังนั้น การประยุกต์ใช้ความดันเชิงกลร่วมกับทอร์รีแฟกชันจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการยกระดับสมบัติทางเคมีและกายภาพของเปลือกทุเรียน งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันเชิงกลต่อคุณสมบัติของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ เพื่อประเมินศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งและวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

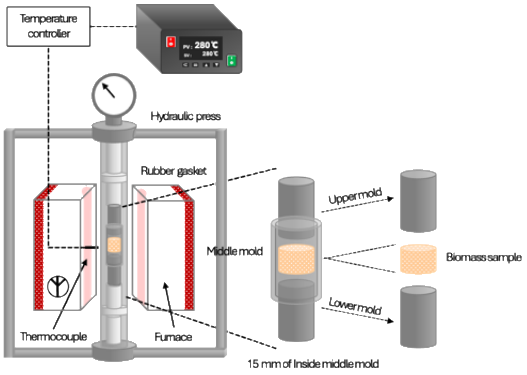
เปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทองจากจังหวัดระยองถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในงานวิจัยนี้ โดยนำเปลือกทุเรียนมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นสับเป็นชิ้นขนาดประมาณ 4 เซนติเมตร และบดด้วยเครื่อง universal cutting mill ให้มีขนาดประมาณ 4 มิลลิเมตร ก่อนบดต่อจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 250 ไมโครเมตร ตัวอย่างที่บดแล้วถูกอบซ้ำที่อุณหภูมิ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

2.2 การทอร์รีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกล

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

DOI: 10.60101/feir.2026.267070

การทดลองดำเนินการที่อุณหภูมิ 280, 300, 320 และ 340 °C โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 °C/นาที และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 30 นาที ระหว่างกระบวนการ ความดันเชิงกลถูกใช้เพื่อกดอัดตัวอย่างในแม่พิมพ์ร่วมกับการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนและการคงรูปของผลิตภัณฑ์หลังการทอร์รีแฟกชัน หลังสิ้นสุดการทดลอง ปล่อยให้ระบบเย็นตัวลงจนถึงประมาณ 50 °C ก่อนนำตัวอย่างออกจากรีแอคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก และเก็บไว้สำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกเรียกว่าทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน (MDP) การทดลองในแต่ละสภาวะดำเนินการซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยของร้อยละผลได้เชิงมวล



รูปที่ 1 การทดลองทอร์รีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกล

2.3 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง

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

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

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

โดยที่ C, H และ N แทนร้อยละโดยมวลของคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ตามลำดับ

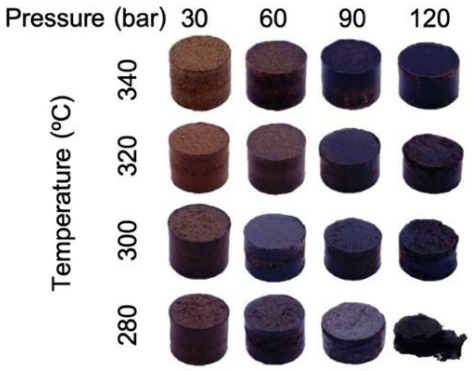
3. ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะผลิตภัณฑ์เปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอร์รีแฟกชัน

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

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

DOI: 10.60101/feir.2026.267070



รูปที่ 2 ลักษณะที่ปรากฏของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน

3.2 ร้อยละผลได้เชิงมวล

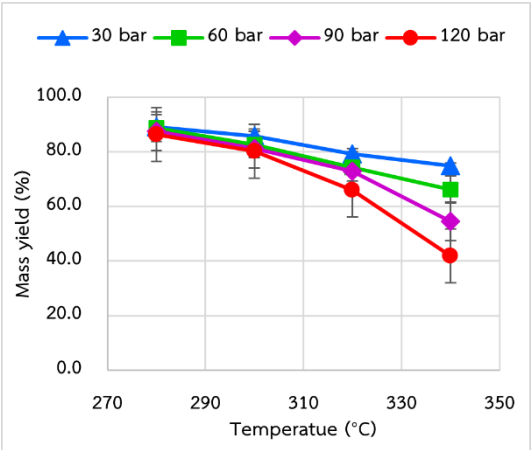
ร้อยละผลได้เชิงมวลของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอร์รีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกลคำนวณจากสมการที่ (2)

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

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

การลดลงของร้อยละผลได้เชิงมวลเป็นแนวโน้มที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการทอร์รีแฟกชัน เนื่องจากความชื้นและสารระเหยถูกกำจัดออกจากชีวมวล รวมทั้งเกิดการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบชีวมวล โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สลายตัวได้ง่ายในช่วงอุณหภูมิของการทอร์รีแฟกชัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การสลายตัวของโครงสร้างชีวมวลและการปลดปล่อยสารระเหยจึงเกิดมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้เชิงมวลลดลงอย่างต่อเนื่อง

นอกจากนี้ การลดลงของร้อยละผลได้เชิงมวลมีความชัดเจนมากขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับระดับแรงกดเชิงกลที่สูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 320 และ 340 °C ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการที่แรงกดเชิงกลทำให้อนุภาคชีวมวลสัมผัสกันแน่นขึ้นและเกิดการอัดแน่นภายในแม่พิมพ์ ระหว่างการให้ความร้อน จึงอาจส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชีวมวลภายในผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงร่วมกับระดับแรงกดเชิงกลสูง การปลดปล่อยสารระเหยและการหดตัวของโครงสร้างอาจเกิดมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียมวลมากขึ้น ดังนั้น ผลการทดลองจึงแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและระดับแรงกดเชิงกลมีผลร่วมกันต่อร้อยละผลได้เชิงมวลของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอร์รีแฟกชัน



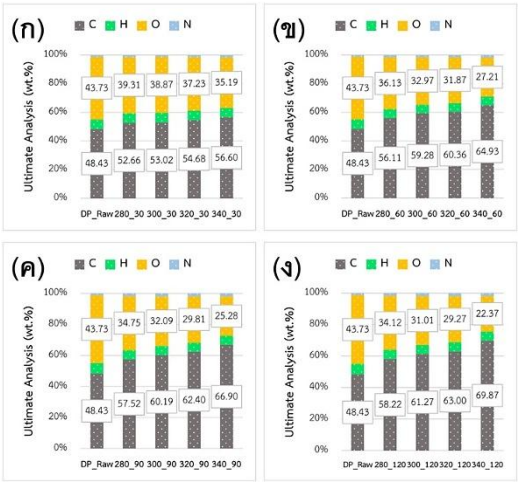
รูปที่ 3 ร้อยละผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน

3.3 องค์ประกอบธาตุ

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

DOI: 10.60101/feir.2026.267070

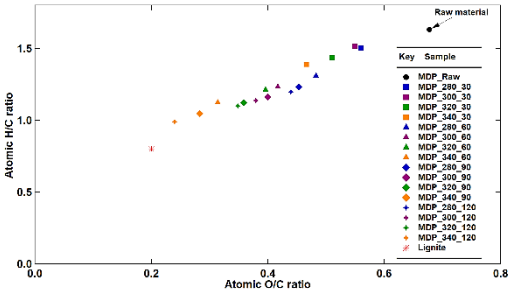
การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอน พร้อมกับการลดลงของปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน อาจเกิดจากการกำจัดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนและการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันและดีคาร์บอกซิเลชันระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ส่งผลให้โครงสร้างของชีวมวลมีความเข้มข้นของคาร์บอนสูงขึ้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและความดันเชิงกลมีผลร่วมกันต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบธาตุของเปลือกทุเรียนและช่วยยกระดับคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่ได้



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

นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบธาตุยังสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากแผนภาพ Van Krevelen ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยเปลือกทุเรียนดิบมีค่าอัตราส่วน H/C และ O/C สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอร์รีแฟกชัน ซึ่งสะท้อนถึงองค์ประกอบที่มีไฮโดรเจนและออกซิเจนสูงในโครงสร้างชีวมวลดิบ หลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟกชัน อัตราส่วน H/C และ O/C มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิและระดับแรงกดเชิงกลเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะตัวอย่างที่เตรียมภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงและระดับแรงกดเชิงกลสูง จุดข้อมูลของผลิตภัณฑ์จึงเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายล่างของแผนภาพและมีแนวโน้มเข้าใกล้บริเวณของลิกไนต์มากขึ้น

แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกลส่งเสริมการลดลงของธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนในผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ดีคาร์บอกซิเลชัน และดีคาร์บอนิลเลชันระหว่างกระบวนการ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสัดส่วนคาร์บอนเพิ่มขึ้นและมีลักษณะเข้าใกล้เชื้อเพลิงแข็งคุณภาพสูงมากขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวโน้มของค่าความร้อนสูงและปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและระดับแรงกดเชิงกลสูงขึ้น



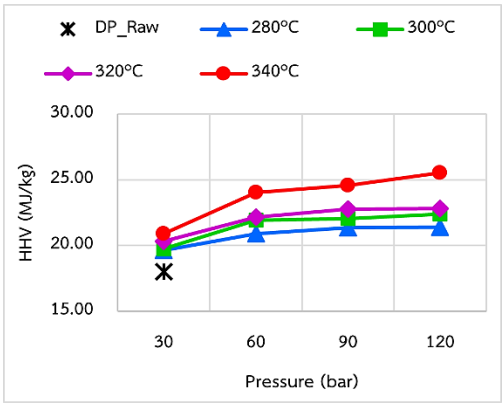
รูปที่ 5 แผนภาพ Van Krevelen ของเปลือกทุเรียนดิบผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนภายใต้สภาวะต่าง ๆ

3.4 ค่าความร้อนสูง

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

แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า HHV สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนและการลดลงของออกซิเจนและไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์หลังการทอร์รีแฟกชัน ซึ่งเกิดจากการกำจัดความชื้นและการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวลระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงดีขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิและความดันเชิงกลจึงมีผลร่วมกันต่อการเพิ่มค่าความร้อนสูงของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอร์รีไฟด์

DOI: 10.60101/feir.2026.267070



รูปที่ 6 ค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียน

3.5 ร้อยละผลได้เชิงพลังงาน (Energy yield)

ร้อยละผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนคำนวณจากร้อยละผลได้เชิงมวลและค่าความร้อนสูง ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$Energy\ yield\ (\%) = Mass\ yield\ (\%) \times (HHV\ \text{ของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์} / HHV\ \text{ของเปลือกทุเรียนดิบ}) \quad (3)$$

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

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

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

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

ตารางที่ 1 ร้อยละผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์ทอร์รีไฟด์เปลือกทุเรียนภายใต้สภาวะต่าง ๆ

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

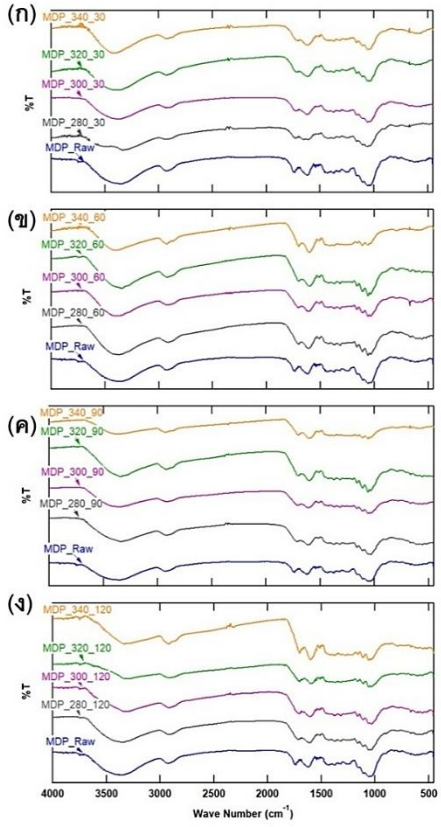
3.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเปลือกทุเรียนก่อนและหลังการทอร์รีแฟกชันด้วยเทคนิค FT-IR แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า เมื่ออุณหภูมิและความดันเชิงกลเพิ่มขึ้น ความเข้มของพีคหลายตำแหน่งมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะพีคที่เกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เปลือกทุเรียนดิบแสดงพีคการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (O–H) บริเวณประมาณ 3400 cm^{-1} อย่างเด่นชัด แต่หลังการทอร์รีแฟกชัน ความเข้มของพีคดังกล่าวลดลงต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในทุกระดับ

DOI: 10.60101/feir.2026.267070

ความดันสะท้อนถึงการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิลและการกำจัดความชื้นหรือองค์ประกอบที่มีออกซิเจนออกจากโครงสร้างชีวมวล อันเป็นผลจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน

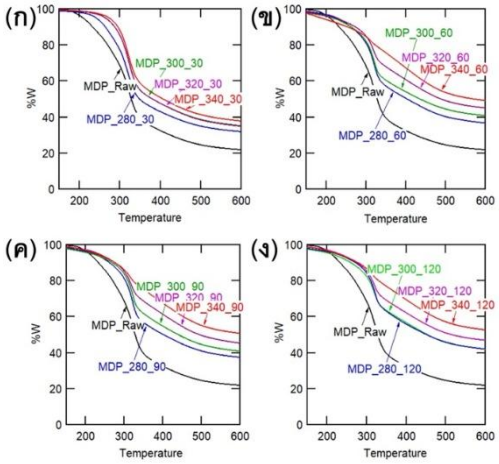
นอกจากนี้ ยังพบว่าพีคบริเวณประมาณ 1700 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับหมู่คาร์บอนิล (C=O) พีคบริเวณประมาณ 1600 cm^{-1} ซึ่งเกี่ยวข้องกับพันธะ C=C และพีคบริเวณประมาณ 1050 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับหมู่ C–O มีความเข้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทอร์รีแฟกชันเพิ่มขึ้น โดยแนวโน้มดังกล่าวเด่นชัดมากขึ้นภายใต้ความดันเชิงกลที่สูงขึ้น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



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

3.7 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกทุเรียนดิบและเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอร์รีแฟกชันภายใต้ความดันเชิงกลแสดงดังรูปที่ 8 พบว่าเปลือกทุเรียนดิบมีการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วที่สุดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สะท้อนถึงความไวต่อการสลายตัวทางความร้อนมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทอร์รีแฟกชัน สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทอร์รีไฟด์พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทอร์รีแฟกชันเพิ่มขึ้น แนวโน้มการสลายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ลดลงและมีมวลคงเหลือที่อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นในทุกระดับความดัน โดยตัวอย่างที่ผ่านการทอร์รีแฟกชันที่ 340 ℃ แสดงความเสถียรทางความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เตรียมที่อุณหภูมิต่ำกว่า ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันช่วยกำจัดองค์ประกอบที่สลายตัวได้ง่ายออกจากชีวมวล ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้างคาร์บอนเข้มข้นขึ้นและทนต่อการสลายตัวทางความร้อนได้มากขึ้น



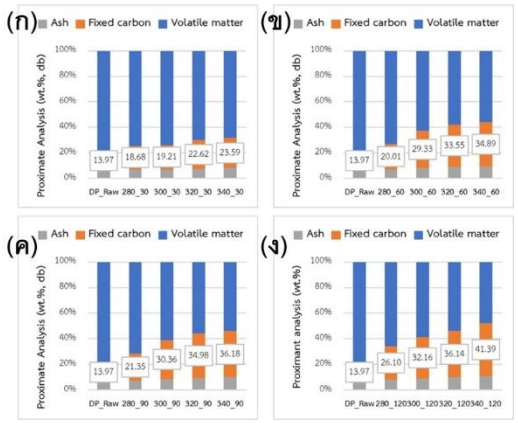
รูปที่ 8 การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้ความดัน (ก) 30 บาร์ (ข) 60 บาร์ (ค) 90 บาร์ (ง) 120 บาร์

3.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis)

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

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

แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและความดันเชิงกลมีผลร่วมกันต่อการเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกระบวนการทอร์รีแฟกชันทำให้เกิดการกำจัดความชื้นและสารระเหย รวมทั้งส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาชาร์ริงและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชีวมวลไปสู่โครงสร้างที่มีความเสถียรมากขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณสารระเหยลดลง ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและค่าความร้อนสูงที่แสดงให้เห็นถึงการยกระดับคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกทุเรียนหลังการทอร์รีแฟกชัน



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

4. สรุปผลการวิจัย

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

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

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

DOI: 10.60101/feir.2026.267070

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Ibitoye SE, Mahamood RM, Jen T-C, Loha C, Akinlabi ET. An overview of biomass solid fuels: Biomass sources, processing methods, and morphological and microstructural properties. Journal of Bioresources and Bioproducts. 2023;8(4):333-60.

[2] Saleem M. Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source. Heliyon. 2022;8 (2):e08905.

[3] Chen W-H, Lin B-J, Lin Y-Y, Chu Y-S, Ubando AT, Show PL, Ong HC, Chang J-S, Ho S-H, Culaba AB, Pétrissans A, Pétrissans M. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. Prog Energy Combust Sci. 2021;82:100887.

[4] Sharma P, Ho PH, Shao J, Creaser D, Olsson L. Role of ZrO_2 and CeO_2 support on the In_2O_3 catalyst activity for CO_2 hydrogenation. Fuel. 2023;331:125878.

[5] Van der Stelt M, Gerhauser H, Kiel JH, Ptasinski KJ. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. Biomass and bioenergy. 2011;35(9):3748-62.

[6] Abdulyekeen KA, Umar AA, Patah MFA, Daud WMAW. Torrefaction of biomass: Production of enhanced solid biofuel from municipal solid waste and other types of biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021;150:111436.

[7] Kheowmung W. Pectin from durian (Durio zibethinus Murray) peel: microwave-assisted extraction followed by solvent extraction. Trends in Sciences. 2024;21(7):7627.

[8] Zhao G, Lyu X, Lee J, Cui X, Chen W-N. Biodegradable and transparent cellulose film prepared eco-friendly from durian rind for packaging application. Food Packaging and Shelf Life. 2019;21:100345.

[9] Fiala K, Thongjarad A, Leesing R. Valorization of durian peel as a carbon feedstock for a sustainable production of heterogeneous base catalyst, single cell oil and yeast-based biodiesel. Carbon Resources Conversion. 2024;7(3):100224.

[10] Sim XY, He N, Abdul PM, Yeap SK, Hui YW, Tiang MF, Luthfi AAI, Manaf SFA, Bukhari NA, Silvamany H, Tan JP. Fermentable sugar recovery from durian peel by using ultrasound-assisted chemical pretreatment. Ultrasonics Sonochemistry. 2024;104: 106811.

[11] Manmeen A, Kongjan P, Palamanit A, Jariyaboon R. The biochar, and pyrolysis liquid characteristics, of three indigenous durian peel; Monthong, Puangmanee, and Bacho. Biomass and Bioenergy. 2023;174: 106816.

[12] Obeng AK, Premjet D, Premjet S. Improved glucose recovery from durian peel by alkaline-catalyzed steam pretreatment. PeerJ. 2021;9:e12026.

[13] Eling J, Okot DK, Menya E, Atim MR. Densification of raw and torrefied biomass: A review. Biomass and Bioenergy. 2024;184:107210.

[14] Obi OF, Pecenka R, Clifford MJ. A review of biomass briquette binders and quality parameters. Energies. 2022;15(7):2426.