



การทอรรีแฟกชันเหง้ามันสำปะหลังเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพแข็งคุณภาพสูง

Torrefaction of Cassava Rhizome to Produce High-Grade Solid Biofuels

จารุณี เข้มพิลลา^{1*} และ ปุมินทร์ คงโต²

Jarunee Khempila^{1*} and Pumin Kongto²

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000

²สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

¹Physics Program, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Mahasarakham University, Mueang District, Mahasarakham 44000, THAILAND

²Energy Technology Program, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai District, Songkhla 90110, THAILAND

*Corresponding author e-mail: jarunee.kh@rmu.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: March 17, 2022

Revised: May 17, 2022

Accepted: May 31, 2022

Available online: June 14, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.9

Keywords: cassava rhizome, biomass fuel, torrefaction, mass yield

This research studied solid fuel production from cassava rhizome by torrefaction technology to enable its use in the energy sector. Cassava rhizomes (CR) were treated at a temperature range of 250–300 °C under a nitrogen atmosphere. The residence time was 30 minutes. The solid products were characterized in terms of their fuel properties and functional groups, including mass and energy yield, energy densification, ash content, ultimate analysis, and calorific value. In addition, the functional groups of organic compounds were identified by the Fourier transform infrared spectroscopy technique, and the Van Krevelen diagram was used for comparisons of the fuel properties with coal. The results indicated that pretreatment using torrefaction had a significant impact on the quantity and physicochemical properties of the solid product. The torrefied-CR at 300 °C had the lowest mass yield (47.6%), energy yield (66.4%), and content of oxygen (22.0%), however, resulting in the highest calorific value (24.81 MJ/kg), energy densification (1.4), and content of carbon (62.51%). The calorific value of solid

products ranged from 18 to 24 MJ/kg, showing an increase of 6% to 39% compared to the raw biomass. The peak of C–O and C=O stretching in hemicellulose began to disappear at temperatures above 275 °C. When the torrefaction temperature was increased to 300 °C, the ash content slightly increased from 6.18% to 8.76%. Moreover, the oxygen-to-carbon and hydrogen-to-carbon ratios of solid products decreased to become close to lignite coal. The results indicated torrefaction is a pretreatment method for converting cassava rhizome into high-grade biofuel.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยเทคโนโลยีทอร์รีแฟกชันเพื่อนำมาใช้งานในภาคพลังงาน โดยปรับสภาพเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิในช่วง 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์สมบัติด้านเชื้อเพลิงและหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์แข็ง ได้แก่ ผลได้เชิงมวล ผลได้พลังงาน ความหนาแน่นพลังงาน ปริมาณเถ้า องค์ประกอบแบบละเอียด และค่าความร้อน นอกจากนี้ยังระบุหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และใช้แผนภาพ Van Krevelen เปรียบเทียบสมบัติด้านเชื้อเพลิงกับถ่านหิน ผลวิจัยพบว่าการปรับสภาพด้วยทอร์รีแฟกชันส่งผลต่อปริมาณและสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์แข็งอย่างมีนัยสำคัญ เหง้ามันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละผลได้เชิงมวล (47.6) ผลได้พลังงาน (66.4) และปริมาณออกซิเจน (22.0) ต่ำที่สุด แต่มีค่าความร้อน (24.81 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) ความหนาแน่นพลังงาน (1.4) และร้อยละปริมาณคาร์บอน (62.51) สูงที่สุด ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แข็งมีค่าในช่วง 18 ถึง 24 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เพิ่มขึ้นร้อยละ 6 ถึง 39 เมื่อเทียบกับชีวมวลดิบที่อุณหภูมิสูงกว่า 275 องศาเซลเซียส เริ่มไม่ปรากฏพบการสั่นแบบบิดของพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ของคาร์บอน-ออกซิเจน ในเอมิเซลลูโลส ปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย

จากร้อยละ 6.18 เป็น 8.76 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ยิ่งกว่านั้นสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน และไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ของผลิตภัณฑ์แข็งมีค่าลดลงใกล้เคียงถ่านหินลิกไนต์ ผลวิจัยบ่งชี้ว่าทอร์รีแฟกชันเป็นวิธีปรับสภาพเหง้ามันสำปะหลังให้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพคุณภาพสูงได้

คำสำคัญ: เหง้ามันสำปะหลัง เชื้อเพลิงชีวมวล ทอร์รีแฟกชัน ผลได้เชิงมวล

บทนำ

ประเทศไทยมีแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลหลากหลายประเภทสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยชีวมวลที่มีศักยภาพได้แก่ แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย ซึ่งข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ไม้ยางพารา เป็นต้น โดยเฉพาะพืชเศรษฐกิจประเภทมันสำปะหลัง ภายหลังกระบวนการเพาะปลูก เก็บเกี่ยวและแปรรูปก่อให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ทั้งในส่วนที่เกิดจากกระบวนการปอกหัวมันนั่นคือ เปลือก (Peels) และส่วนที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งในพื้นที่ปลูก เช่น ลำต้น (Stalk) และเหง้า (Rhizome) โดยเหง้าเป็นส่วนของลำต้นแข็งที่ติดกับหัวมันสด ซึ่งทั้งสามส่วนนี้ไม่สามารถใช้ประโยชน์หรือแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ได้ เกษตรกรจึงมักทิ้งลำต้นและเหง้าไว้ในพื้นที่ปลูกและเผาทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ เมื่อพิจารณาผลผลิตมันสำปะหลังในปีเพาะปลูก พ.ศ. 2559-2562 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณรวมทั้งประเทศประมาณ 30.89 ล้านตัน สัดส่วนชีวมวลต่อผลผลิต

(Residue to Product Ratio, RPR) ของเปลือก ลำต้น และเหง้ามันสำปะหลัง มีค่าเป็น 0.25 0.062 และ 0.112 ตามลำดับ [1] ถึงแม้ค่า RPR ของเปลือกจะสูงกว่าเหง้าแต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนต่ำ (Low heating value: LHV) พบว่าเปลือกมีค่าความร้อน 1.49 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (ที่ความชื้นร้อยละ 67 โดยน้ำหนัก) ขณะที่เหง้ามันมีค่าความร้อน 5.49 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (ที่ความชื้นร้อยละ 59.4 โดยน้ำหนัก) ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่า สัดส่วนชีวมวลต่อผลผลิตรวมกับค่าความร้อนและปริมาณผลผลิตเฉลี่ย พบว่าเหง้ามันสำปะหลังมีศักยภาพด้านพลังงานมากกว่าเปลือก 14.83 กิกะจูล หรือคิดเป็นร้อยละ 72.87 ซึ่งการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปของแข็งเพื่อเผาไหม้โดยตรงนั้นมีข้อดีหลายประการ อาทิ ความชื้นในชีวมวล ซึ่งหากชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูงจะส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของค่าความร้อนเนื่องจากต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งที่ได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลไปเพื่อระเหยความชื้น อีกทั้งความชื้นในชีวมวลก่อให้เกิดเขม่าควันในขณะเผาไหม้ นอกจากนี้ยังเกิดปัญหาขณะกักเก็บเหง้ามันสำปะหลังไว้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ ดังนั้นในการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจึงนิยมปรับปรุงคุณภาพหรือเปลี่ยนรูป เช่นการนำมาผลิตถ่านอัดแท่งใช้แทนฟืนในระดับครัวเรือน ซึ่งเหง้ามันสำปะหลังแห้งมีค่าความร้อนระหว่าง 18.5-23.7 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม [1, 2] เมื่อผลิตเป็นถ่านอัดแท่งส่งผลให้มีค่าความร้อนสูงขึ้นเป็น 20.15 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม [3] เทียบได้กับค่าความร้อนของไม้ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 17.9-20.5 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม [4]

ส่วนการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานระดับอุตสาหกรรมนั้น จำเป็นที่จะต้องปรับปรุงสมบัติด้านเชื้อเพลิงให้ใกล้เคียงถ่านหินเพื่อที่จะสามารถเผาไหม้ร่วมหรือทดแทนการใช้ถ่านหินได้โดยพึ่งพากระบวนการทางเคมีความร้อน ดังการศึกษาของ Shariff และคณะ [5] ซึ่งปรับปรุงคุณภาพเหง้ามัน

สำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow-Pyrolysis) โดยดำเนินการในช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ส่งผลให้คาร์บอนคงตัวมีค่าสูงขึ้นร้อยละ 26.35 แต่ผลได้เชิงมวล (ผลิตภัณฑ์ของแข็ง) มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 30-37 ส่วน Rueangsarn และคณะ [6] ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast-Pyrolysis) ของเหง้ามันสำปะหลังเช่นกันพบว่าได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิดคือ ไบโอออยล์ (Bio-oil) ไบโอแก๊ส (Biogas) ไบโอชาร์ (Biochar) ร้อยละ 57-59 14-20 และ 23-28 ตามลำดับ ถึงแม้การปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งมีสมบัติด้านเชื้อเพลิงสูงขึ้นแต่ต้องดำเนินการที่อุณหภูมิสูง และได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งน้อยกว่าร้อยละ 50 ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพเพื่อคงเหลือผลได้เชิงมวลให้ได้มากที่สุดควรดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำกว่ากระบวนการไพโรไลซิส จึงนำมาซึ่งเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงคือ กระบวนการทอรรีแฟกชัน (Torrefaction) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่ชีวมวลในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 10-120 นาที ในสภาวะปราศจากออกซิเจน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แข็งที่ได้มีปริมาณคาร์บอนค่าความร้อนสูง และความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้น อีกทั้งสัดส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอน และไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ [7] ส่วนการปรับปรุงสมบัติของเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันได้มีการศึกษาโดย Nakason และคณะ [8] ซึ่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส คงที่เป็นเวลา 30 นาที ได้ผลได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งร้อยละ 50.21-91.39 ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติด้านเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับเหง้ามันสำปะหลังก่อนปรับปรุง บ่งชี้ได้ว่าการให้ความร้อนที่เหมาะสมควรมีอุณหภูมิตั้งแต่ 250 องศาเซลเซียส [9] แต่ผลได้เชิงมวลจะมีค่าลดลงน้อยกว่าร้อยละ 50 เมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิสูงขึ้น [10]

ที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าเหง้ามันสำปะหลังเป็นเศษวัสดุทางการเกษตรที่เหลือทิ้งภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต ได้มีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งในรูปของฟืนและถ่านอัดแท่งใช้ในครัวเรือน ส่วนการปรับปรุงสมบัติด้านเชื้อเพลิงในระดับอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งในการนำไปใช้งานร่วมกับถ่านหิน พบว่าการปรับปรุงด้วยกระบวนการไพโรไลซิสส่งผลให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมาก จึงนำมาซึ่งการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันดังกล่าวข้างต้น ซึ่งพบข้อสรุปบางประการคือ การให้ความร้อนควรดำเนินการที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250 องศาเซลเซียส และไม่ควรสูงเกินกว่า 300 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วงอุณหภูมิมีค่าต่างกันมากถึง 50 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อปริมาณผลได้เชิงมวลและสมบัติของชีวมวลทอรรีไฟด์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการปรับปรุงคุณภาพการเป็นเชื้อเพลิงแข็งของเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันในระดับห้องปฏิบัติการในช่วงอุณหภูมิที่แคบลงโดยแต่ละเงื่อนไขมีความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นละ 25 องศาเซลเซียส นั่นคือ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที เพื่อให้ทราบถึงสมบัติทางกายภาพ เคมี และพลังงานของชีวมวลเหง้ามันสำปะหลังทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วิธีดำเนินงานวิจัย

การเตรียมชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในการวิจัยคือ เหง้ามันสำปะหลังพันธุ์ระยอง 5 จากบ้านสวนมอน ตำบลหนองโน อำเภอเมืองจังหวัดมหาสารคาม ซึ่งเป็นเหง้าที่เหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยว ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเริ่มจากนำเหง้ามันสำปะหลังสดมาลดขนาดด้วยเครื่องสับหยาบแล้วนำไปลดความชื้นด้วยแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติ จากนั้นลดขนาดด้วยเครื่องสับหยาบอีกครั้ง ก่อนจะบดละเอียดและร่อน

แยกด้วยตะแกรงขนาด 18 เมช (Mesh) เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีขนาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 จากนั้นบดตัวอย่างชีวมวลเพื่อลดความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบรรจุใส่ถุงกันความชื้นสำหรับการทดลองและวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งเมื่อนำชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังมาวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังดิบมีความชื้นและเถ้า ประมาณร้อยละ 9.63 และ 9.18 โดยน้ำหนัก ขณะที่มีความร้อนสูงประมาณ 17.79 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และมีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ประมาณร้อยละ 44.56 6.10 1.26 และ 41.90 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



รูปที่ 1 ชีวมวลเหง้ามันสำปะหลังดิบ

ตารางที่ 1 สมบัติของเหง้ามันสำปะหลังดิบ

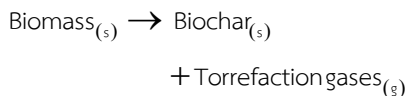
สมบัติ	เหง้ามันสำปะหลังดิบ
ความชื้น (wt.%, as received)	9.63±0.26
ปริมาณเถ้า (wt.%, dry basis)	6.18±0.15
ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)	17.79±0.04
องค์ประกอบแบบละเอียด (wt.%, dry basis)	
C	44.56±0.09
H	6.10±0.10
N	1.26±0.01
O*	41.90±0.34

* คำนวณจากผลต่าง (C + H + N + O + Ash = 100%)

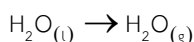
การปรับปรุงชีวมวลด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน

งานวิจัยนี้ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลด้วยกระบวนการเคมีความร้อนที่อุณหภูมิ 250-275 และ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการทอรรีแฟกชัน [12] ดังสมการที่ (1) ถึง (6) เนื่องจากชีวมวลมีปริมาณความชื้น ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส ความชื้นที่เกาะเกี่ยวที่ผิวของชีวมวลจะเกิดการระเหย เมื่อให้ความร้อนแก่ชีวมวลถึงช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของเอมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบอินทรีย์ในชีวมวล พบว่าได้ผลิตภัณฑ์หลัก 2 ประเภท คือ ถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar) และแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H_2)

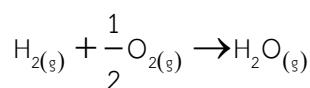
$$\text{Torrefaction : } 200\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1)$$



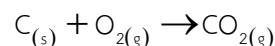
$$\text{Unbound moisture : } 100\text{-}105\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2)$$



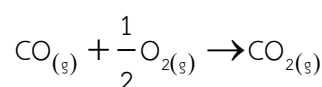
$$\text{H}_2\text{O : } 160\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3)$$



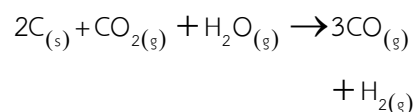
$$\text{CO}_2 : 160\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4)$$



$$\text{CO}_2 : 160\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5)$$



$$\text{CO : } 200\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (6)$$



กระบวนการทอรรีแฟกชันในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยให้ความร้อนแก่ชีวมวลในสภาวะอับอากาศ มีขั้นตอนเริ่มจากการชั่งชีวมวลตัวอย่าง 20 กรัม ด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม นำตัวอย่างใส่ในปฏิกรณ์ทรงกระบอก แล้วนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ควบคุมอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนดังรูปที่ 2 โดยต่อท่อไนโตรเจนเข้ากับปฏิกรณ์เพื่อแทนที่อากาศที่อยู่ภายในผ่านตัวกระจายแก๊สไนโตรเจนเพื่อให้สัมผัสชีวมวลได้ทั่วถึง ซึ่งควบคุมอัตราการไหล 1 ลิตรต่ออนาที ด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลยี่ห้อ Dwyer ประเทศสหรัฐอเมริกา และต่อท่อทางออกของก๊าซและสารระเหยที่เกิดจากกระบวนการทอรรีแฟกชันที่ด้านบนของเตาเผา ดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงแผนภาพการทำงานของกระบวนการทอรรีแฟกชัน เตาเผาอุณหภูมิสูงให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อยู่ในปฏิกรณ์ด้วยอัตราการให้ความร้อนคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที [13] ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจนอย่างต่อเนื่อง เมื่ออุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษาคือ 250 องศาเซลเซียส เตาเผาจะให้ความร้อนด้วยฮีทเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติเพื่อกองอุณหภูมิให้คงที่จนกระทั่งครบ 30 นาที [14] ปิดเตาเผาแล้วปล่อยให้ปฏิกรณ์เย็นตัวลงภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจนจนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างบรรจุลงในถุงกันความชื้นและชั่งมวลผลิตภัณฑ์แข็งที่ได้ทันที บันทึกค่าเป็นมวลของชีวมวลแห้งน้ำหนักสำหรับหลังจากการปรับสภาพด้วยทอรรีแฟกชันหรือเรียกว่า เหน้แห้งน้ำหนักหลังทอรรีไฟด์เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติด้านเชื้อเพลิงต่อไป แต่ละเงื่อนไขการทดลองทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งหรือมากกว่าเพื่อให้ได้ตัวอย่างที่เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ผลแล้วจึงทำซ้ำตามกระบวนการเดิมที่อุณหภูมิ 275 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

การวิเคราะห์สมบัติด้านเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์

1. ผลได้เชิงมวล ผลได้พลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน

ผลได้เชิงมวล (Mass yield, MY) คือผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแฟกชัน คำนวณได้จากสมการที่ (7) [15] เมื่อ MY คือ ผลได้เชิงมวล (เปอร์เซ็นต์) m คือ มวลของชีวมวล (กรัม) และ ตัวย่อ ‘raw’ และ ‘tor’ แทน เหน้้ำมันสำปะหลังดิบและ เหน้้ำมันสำปะหลังทอรีไฟด์ ตามลำดับ ส่วนผลได้พลังงาน (Energy yield, EY) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ได้เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพเหน้้ำมัน สำปะหลังซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลได้เชิงมวลและค่า ความร้อน คำนวณได้จากสมการที่ (8) [15] เมื่อ CV คือ ค่าความร้อนของเหน้้ำมันสำปะหลัง (เมกกะจูล ต่อ กิโลกรัม) ค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy densification, ED) บ่งบอกถึงความหนาแน่นของ พลังงานเมื่อเทียบกับชีวมวลก่อนปรับปรุงคุณภาพ คำนวณได้จากสมการที่ (9) [15]

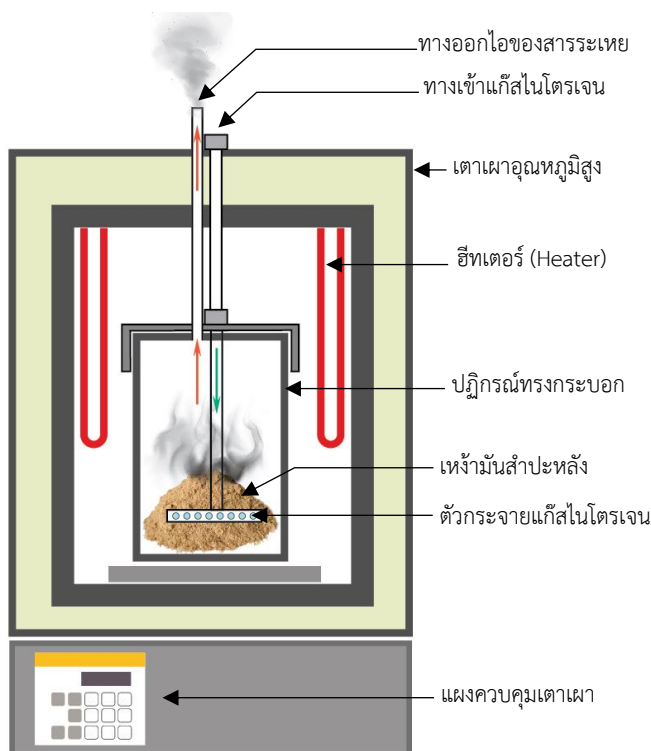
$$MY(\%) = \frac{m_{tor}}{m_{raw}} \times 100 \quad (7)$$

$$EY(\%) = MY \times \frac{CV_{tor}}{CV_{raw}} \quad (8)$$

$$ED = \frac{EY(\%)}{MY(\%)} \quad (9)$$



รูปที่ 2 เตาเผาและชุดปฏิกรณ์ในกระบวนการทอรีแฟกชัน



รูปที่ 3 แผนภาพการทำงานของกระบวนการทอรีแฟกชัน

2. องค์ประกอบแบบละเอียด

เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer ยี่ห้อ ThermoScientific รุ่น FLASH 2000 ประเทศอิตาลี ตามมาตรฐาน ASTM D5373-16 ส่วนออกซิเจนเป็นผลต่างระหว่าง 100 กับผลรวมของธาตุต่าง ๆ ความชื้นและเถ้า ผลการทดสอบที่ได้แสดงค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

3. เถ้า

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash) โดยวิธีมาตรฐาน ASTM D 3174-12 ทำได้โดยเผาถ้วยกระเบื้องในเตาเผาอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง ซึ่งเถ้ามันสำปะหลังที่บดละเอียด 1 กรัม (± 0.5 มิลลิกรัม) ใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง จากนั้นนำถ้วยกระเบื้องพร้อมตัวอย่างมาเผาในเตาอุณหภูมิสูง โดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จากอุณหภูมิห้องถึง 500 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 1 ชั่วโมง และเพิ่มอุณหภูมิถึง 750 องศาเซลเซียส ภายในชั่วโมงที่ 2 จากนั้นเผาชีวมวลตัวอย่างที่มีอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ต่อไปอีก 2 ชั่วโมง นำถ้วยกระเบื้องออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักและคำนวณหาปริมาณเถ้าได้จากสมการที่ (10)

$$\text{Ash}(\%) = \frac{m_{\text{ash}}}{m_{\text{raw}}} \times 100 \quad (10)$$

4. ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (calorific value, CV) ของชีวมวลคำนวณได้จากสมการเอนโทรปีของ Friedl และคณะ [16] ดังสมการที่ (11) ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณคือ ร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบธาตุ คาร์บอน (Carbon: C) ไฮโดรเจน (Hydrogen: H) ออกซิเจน (Oxygen: O) และไนโตรเจน (Nitrogen: N) ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุแบบละเอียด เมื่อ C , H , และ N คือ ร้อยละโดยน้ำหนักมาตรฐานแห้งของ

คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ในเห้ง้ามันสำปะหลังและเห้ง้ามันสำปะหลังทอรัไฟต์

$$CV = 3.55C^2 - 232C - 2230H + 51.2C * H + 131N + 20600 \quad (11)$$

สมการของ Friedl สร้างจากข้อมูลชีวมวลจำนวน 122 ตัวอย่าง ซึ่งมีค่าปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 42.6-50.5 ไฮโดรเจนเฉลี่ยในช่วงร้อยละ 5.3-6.3 [16] และมีไนโตรเจน คลอรีน กำมะถัน ในปริมาณ น้อยกว่าร้อยละ 3 เมื่อพิจารณาตารางที่ 1 พบว่าเห้ง้ามันสำปะหลังดิบมีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนร้อยละ 44.56 และ 6.10 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าเฉลี่ยดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นการเลือกใช้สมการของ Friedl ในการทำนายค่าความร้อนของเห้ง้ามันสำปะหลังจึงมีความถูกต้องมากขึ้นเนื่องจากมีค่าปริมาณองค์ประกอบอยู่ในขอบเขตของตัวอย่างที่ Friedl และคณะนำมาศึกษา

5. หมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงพันธะของโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ในเห้ง้ามันสำปะหลังและเห้ง้ามันสำปะหลังทอรัไฟต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum One ที่ ช่วงเลขคลื่น 4000-400 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงแสงอินฟราเรดกลาง (Middle Infrared) แสงในช่วงนี้จะมีผลโดยตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ของหมู่ฟังก์ชันในชีวมวลทำให้เกิดเป็นแถบสัญญาณแสดงความสัมพันธ์ของช่วงความถี่กับการส่งผ่านของแสงอินฟราเรดเข้าสู่เครื่องวัดในรูปของสเปกตรัม เนื่องจากตัวอย่างในการวิจัยคือ ชีวมวลบดละเอียดในรูปของผง ดังนั้นจึงเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีจานโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr disc) โดยบดชีวมวล

ตัวอย่างร่วมกับผง KBr [17] เพื่อช่วยให้มีการกระจายตัวที่ดีและขนาดเล็กมากพอที่จะไม่เกิดการกระเจิงแสง

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

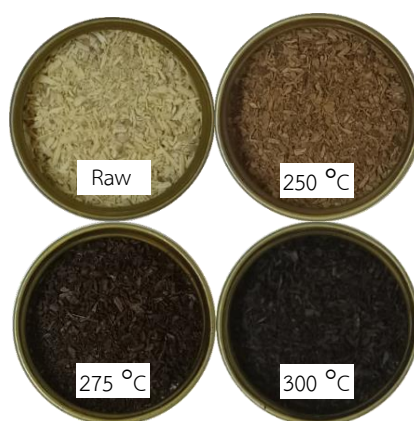
กลุ่มตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 4 กลุ่ม คือ เหน้้ำมันสำปะหลังดิบ และเหน้้ำมันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ ที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส โดยมีตัวแปรต้น คือ อุณหภูมิ และมีตัวแปรอิสระ ได้แก่ ร้อยละองค์ประกอบทางเคมี ค่าความร้อน และปริมาณเถ้า ดังนั้นจึงสามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way analysis of variance, One-way ANOVA) ซึ่งเป็นสถิติอนุมานที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป อีกทั้งสถิติดังกล่าวนี้มีความแกร่ง (Robust) ต่อการแจกแจงที่ไม่เป็นโค้งปกติของตัวแปรอิสระอันเนื่องมาจากกลุ่มตัวอย่างมีขนาดเล็ก [18-19] ภายหลังวิเคราะห์ความแปรปรวนและเมื่อพบว่ามีความแตกต่างของค่าตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 คู่ จึงเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระนั้น ๆ โดยใช้สถิติการเปรียบเทียบรายคู่ด้วยวิธีของ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการทดสอบที่มีจำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่มเท่ากันและจำนวนกลุ่มที่นำมาเปรียบเทียบมีไม่มากนัก โดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics ช่วยในการคำนวณวิเคราะห์

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

สมบัติทางกายภาพ

สีของชีวมวลเหน้้ำมันสำปะหลังและเหน้้ำมันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ภายหลังได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า สีของชีวมวลเหน้้ำมันสำปะหลังมีแนวโน้มเข้มขึ้นตามอุณหภูมิทอร์รีไฟด์จากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีน้ำตาลเข้ม และดำ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์แข็งที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักทางเคมี

ของชีวมวล นั่นคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน [20] โดยความร้อนส่งผลให้เกิดการสลายพันธะไฮโดรเจนและคาร์บอน การทำลาย (Disruption) พันธะไฮโดรเจน พันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) พันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C-O) ทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุล ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีคือการแตกออกของพอลิเมอร์ (Depolymerization) และการเกิดคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ของเฮมิเซลลูโลสอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้มีปริมาณคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) สูงขึ้นสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Mamvura และคณะ [21] ที่ศึกษากระบวนการทอร์รีแฟกชันของ marula seeds และ blue gum wood ในช่วงอุณหภูมิ 275-300 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ชีวมวลมีสีเข้มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส ชีวมวลเปลี่ยนสีจากน้ำตาลเป็นน้ำตาลเข้มตามลำดับ นอกจากสีของชีวมวลทอร์รีไฟด์ที่เปลี่ยนไปแล้วยังส่งผลให้เกิดการสลายความชื้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และกรดอะซิติกในปริมาณมาก [21]



รูปที่ 4 เหน้้ำมันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

องค์ประกอบแบบละเอียด

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดของเหน้้ำมันสำปะหลังและเหน้้ำมันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ปรากฏดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าเหน้้ำมันสำปะหลังดิบและ

เหง้ามันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส มีปริมาณคาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจนและไฮโดรเจน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แข็งที่ได้มีปริมาณออกซิเจนลดลง ในขณะที่คาร์บอนมีปริมาณสูงขึ้น การทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีองค์ประกอบออกซิเจนต่ำที่สุด (ร้อยละ 21.85) และมีคาร์บอนสูงที่สุด (ร้อยละ 62.51) โดยน้ำหนัก การลดลงของปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในชีวมวลมากที่สุด ความร้อนในกระบวนการทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ จากนั้นเกิดการฟอร์มตัวได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของของเหลวและก๊าซ ประสิทธิภาพการลดลงของออกซิเจนในผลิตภัณฑ์แข็งจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มการก่อกวนของน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ [22]

ปริมาณเถ้าและค่าความร้อน

ผลการคำนวณค่าความร้อนและปริมาณเถ้าของเหง้ามันสำปะหลังและเหง้ามันสำปะหลังทอร์รีไฟด์แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าเหง้ามันสำปะหลังมีค่าความร้อนประมาณ 17.79 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nakason และคณะ [23] ที่ศึกษาการผลิตไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังและรายงานค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังมีค่า 17.79 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

เมื่อทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 250 เป็น 275 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังทอร์รีไฟด์มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เป็น 18.87 21.49 และ 24.81 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.07 20.79 และ 39.46 เมื่อเทียบกับเหง้ามันสำปะหลังก่อนปรับสภาพ การปรับสภาพทางความร้อนด้วยเทคโนโลยีทอร์รีแฟกชันนอกจากส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้นแล้วนั้น ยังส่งผลให้ปริมาณเถ้าของผลิตภัณฑ์แข็งมีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกันคือ เมื่ออุณหภูมิของการทอร์รีแฟกชันเพิ่มขึ้นเป็น 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากร้อยละ 6.18 เป็นร้อยละ 6.50 6.70 และ 8.92 ตามลำดับ เชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้ามากกว่าจะมีค่าความร้อนน้อยกว่าจึงจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงในปริมาณมากขึ้นเพื่อให้ได้พลังงานที่เท่ากัน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lieskovský และคณะ [24] ที่พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าในเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้เพียงร้อยละ 1 ทำให้ค่าความร้อนมีค่าลดลง 0.11 เมกะจูลต่อกิโลกรัม อีกทั้งทำให้ต้นทุนในการจัดการเถ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องออกแบบห้องเผาไหม้ให้มีระบบรวบรวมเถ้าออกจากห้องเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามกระบวนการทอร์รีแฟกชันส่งผลให้ปริมาณความชื้นและออกซิเจนลดลง ในขณะที่คาร์บอนคงตัวและคาร์บอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้นมากกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ค่าความร้อน และเถ้าของเหง้ามันสำปะหลังดิบและเหง้ามันสำปะหลังทอร์รีไฟด์

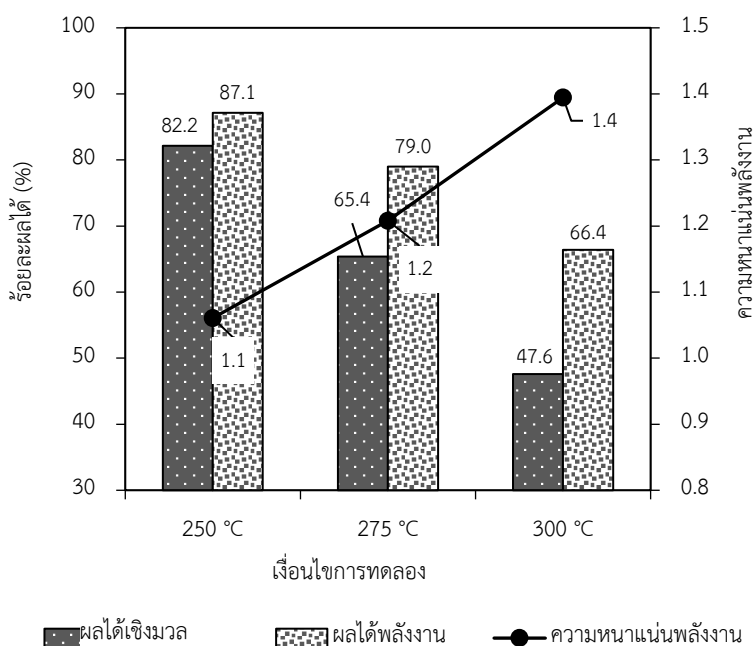
เงื่อนไขการทดลอง	ร้อยละองค์ประกอบทางเคมี				ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)
	คาร์บอน	ออกซิเจน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน		
เหง้ามันสำปะหลังดิบ	44.56±0.09 ^d	41.90±0.34 ^a	6.10±0.10 ^a	1.26±0.01 ^d	17.79±0.04 ^d	6.18±0.15 ^b
250 °C	47.54±0.41 ^c	39.20±0.53 ^b	5.39±0.14 ^b	1.34±0.02 ^c	18.87±0.19 ^c	6.53±0.05 ^b
275 °C	54.07±0.55 ^b	32.27±0.60 ^c	5.28±0.12 ^b	1.63±0.00 ^b	21.49±0.30 ^b	6.75±0.07 ^b
300 °C	62.51±0.04 ^a	22.00±0.29 ^d	4.71±0.09 ^c	2.03±0.01 ^a	24.81±0.07 ^a	8.76±0.22 ^a

^{a-d} หมายถึง อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวดิ่ง ($P \leq 0.05$)

ผลได้เชิงมวล ผลได้พลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์

ผลได้เชิงมวล ผลได้พลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 5 พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอรรีแฟกชันสูงขึ้น ส่งผลให้ผลได้เชิงมวลของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 82.2 65.4 และ 47.6 ตามลำดับ จากผลการศึกษาของ Niu และคณะ [25] พบว่า ผลได้เชิงมวลที่เหมาะสมควรมีค่าระหว่างร้อยละ

60 ถึง 80 ดังนั้นการทอรรีไฟด์เหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ได้ผลได้เชิงมวลต่ำกว่าในช่วงที่เหมาะสม ผลได้เชิงมวลของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์มีค่าลดลงเนื่องจากกระบวนการระเหยด้วยความร้อนของน้ำอิสระ (Free Water) ที่อยู่บนผิวหน้าและระหว่างโมเลกุลของชีวมวล การเกิดการดีไฮเดรชัน (Dehydration) ของน้ำในโครงสร้างโมเลกุล และการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลได้มากขึ้นของเอมิเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีในชีวมวลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) จำนวนมาก และมีความเสถียรทางความร้อนต่ำ [26]



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของผลได้เชิงมวล ผลได้พลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์

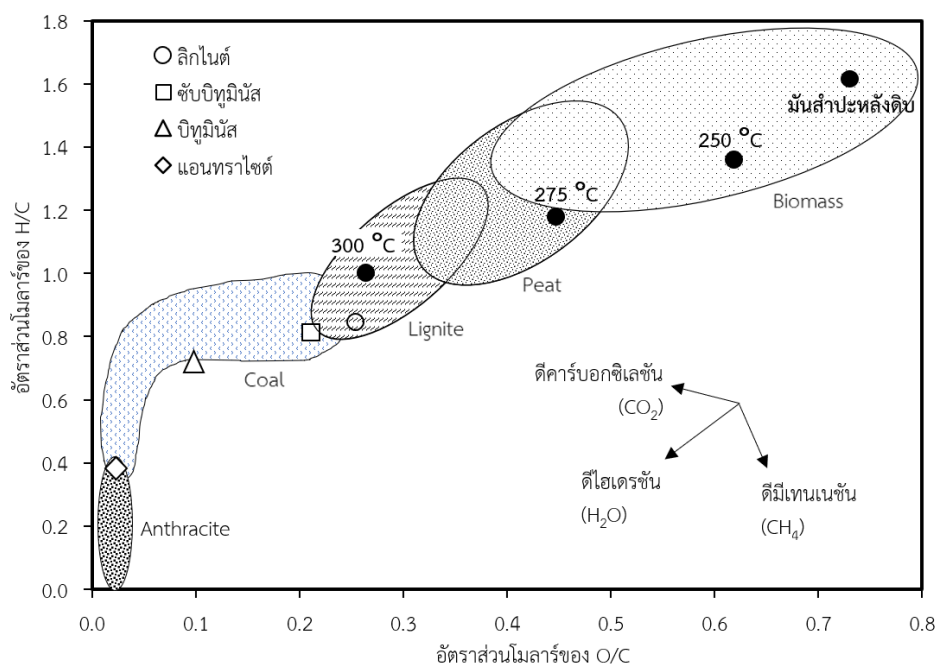
การลดลงของผลได้เชิงมวลยังส่งผลให้ผลได้พลังงานลดลงเช่นกันเนื่องจากพลังงานบางส่วนอยู่ในไอระเหยซึ่งเกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวล (เซลลูโลส เอมิเซลลูโลส และ ลิกนิน) ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและก๊าซในระหว่างการทอรรีแฟกชันโดยผลได้พลังงานของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 87.1 79.0 และ 66.4 ตามลำดับ และแม้แนวโน้มของทั้งผลได้เชิงมวลและผลได้พลังงานมีค่า

ลดลงแต่เมื่อพิจารณาด้านความหนาแน่นพลังงานพบว่ามีความสูงขึ้นเป็น 1.1 1.2 และ 1.4 ตามลำดับ แม้ว่าผลได้พลังงานจะมีค่าลดลงแต่เนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนภายหลังการปรับปรุงซึ่งมีนัยสำคัญมากกว่าการลดลงของผลได้พลังงานจึงส่งผลให้ความหนาแน่นพลังงานของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์มีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิทอรรีแฟกชันที่สูงขึ้น

อัตราส่วนอะตอม

ความแตกต่างระหว่างเชื้อเพลิงฟอสซิลกับเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแสดงผ่านแผนภาพ Van Krevelen ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ของเหง้ามันสำหรับและเหง้ามันสำหรับหลังทอรรีไฟด์ในรูปแบบของสัดส่วนอะตอม ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ดังรูปที่ 6 การวิเคราะห์สัดส่วนอะตอม O/C และ H/C ของเหง้ามันสำหรับหลังให้ค่าสัดส่วนอะตอมเป็น 0.49 และ 1.34 ตามลำดับ เมื่อปรับปรุงคุณภาพเหง้ามันสำหรับที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าแนวโน้มสัดส่วนอะตอม O/C และ H/C มีค่าลดลง นั่นคือสัดส่วนอะตอม O/C มีค่าเป็น 0.47 0.40 และ 0.30 และสัดส่วนอะตอม H/C มีค่าเป็น 0.97 0.73 และ 0.76 ตามลำดับ ซึ่งที่อุณหภูมิทอรรีไฟชัน 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้สัดส่วนอะตอมมีค่าต่ำที่สุดและมีสมบัติใกล้เคียงถ่านหินลิกไนต์ เนื่องจากลิกไนต์มีอัตราส่วนอะตอม H/C อยู่

ในช่วง 0.8–1.3 และ O/C อยู่ในช่วง 0.2–0.38 [27] ดังนั้นจึงมีเพียงเงื่อนไขเดียวที่ส่งผลทำให้เหง้ามันสำหรับหลังทอรรีไฟด์มีสมบัติอยู่ในช่วงของถ่านหินลิกไนต์ นั่นคือ การทอรรีไฟชันเหง้ามันสำหรับหลังที่ 300 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nakason และคณะ [7] เนื่องจากกระบวนการทอรรีไฟชันเป็นกระบวนการทางความร้อน ซึ่งชีวมวลจะได้รับความร้อนและเกิดการสลายพันธะโควาเลนต์ (Covalent) ในโครงสร้างเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ของเหง้ามันสำหรับด้วยปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ทำให้เกิดการสูญเสียสารระเหยที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบา ได้แก่ โมโนแซคคาไรด์ (Monosaccharide) พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ดีไฮโดรซูก้า (Dehydrosugar) สารประกอบจำพวกกรดและน้ำ ส่งผลให้สัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน และสัดส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมีค่าลดลง การลดลงของอัตราส่วนโดยอะตอมระหว่าง C กับ H ส่งผลให้เขม่าควันระหว่างการเผาไหม้มีปริมาณน้อยลง



รูปที่ 6 แผนภาพ van Krevelen ของเหง้ามันสำหรับหลังทอรรีไฟด์และถ่านหิน

ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของชีวมวล

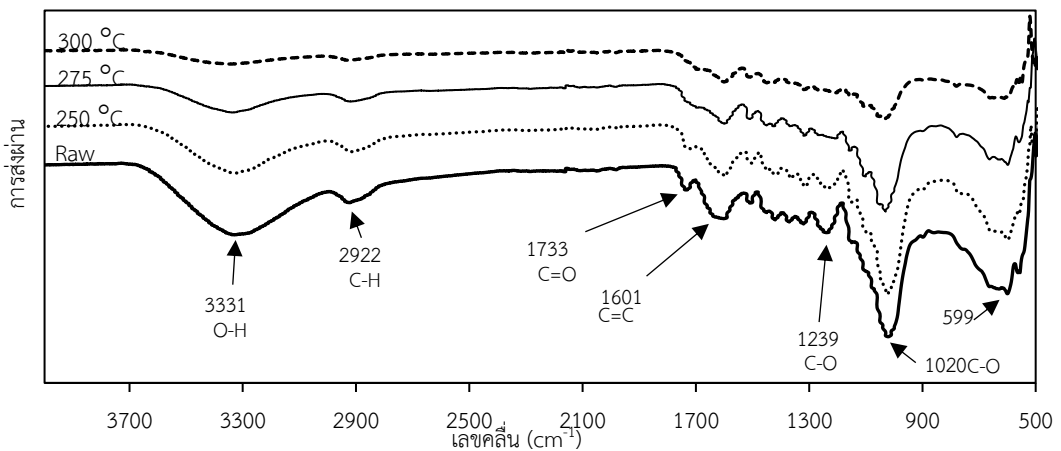
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ในเหง้ามันสำปะหลังและเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์ด้วยเทคนิค FT-IR โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดและให้สเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์ของพันธะในโมเลกุลในเหง้ามันสำปะหลัง สารอินทรีย์ชนิดเดียวกันจะมีหมู่ฟังก์ชันเดียวกันจึงมีสมบัติเฉพาะตัวคล้ายกัน ลักษณะของสเปกตรัมที่ปรากฏในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ จำแนกได้ตามหมู่ฟังก์ชันที่เป็นส่วนประกอบหลักของชีวมวล คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน การเปลี่ยนแปลงของพีคการดูดกลืนเมื่อเหง้ามันสำปะหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทอรรีไฟกชัน ดังรูปที่ 7 การปรากฏลักษณะแถบสเปกตรัมและความเข้มสูงเกิดขึ้นในช่วงเลขคลื่น 3,600-3,200 2,922 1,733 1,601 1,239 และ 1,020 ต่อเซนติเมตร และภายหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทอรรีไฟกชันที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าพีคยังคงปรากฏที่ตำแหน่งเดิมแต่ความเข้มมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด การปรากฏลักษณะแถบสเปกตรัมและความเข้มสูงเกิดขึ้นในช่วงเลขคลื่น 3,600-3,200 ต่อเซนติเมตร ซึ่งแสดงการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิล [28] ทั้งก่อนและภายหลังการปรับปรุงคุณภาพโดยพีคยังคงปรากฏที่ตำแหน่งเดิมแต่ความเข้มมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรรีไฟกชันมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส สามารถอธิบายได้จากการที่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่หลักในโครงสร้างและเป็นส่วนที่มีขั้วในโมเลกุล ทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำหรือไอน้ำในอากาศได้ เมื่อทอรรีไฟกซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้หมู่ไฮดรอกซิลเกิดการสลายตัว จึงทำให้สภาพขั้วของโมเลกุลอ่อนลง การสร้างพันธะกับน้ำหรือไอน้ำในอากาศจึงเกิดได้น้อยลง ดังนั้นเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่าน

การปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทอรรีไฟกชันจึงมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้สามารถชะลอการย่อยสลายทางชีวภาพส่งผลให้สามารถเก็บได้นานมากขึ้น การปรากฏพีคที่เลขคลื่น 2,922 ต่อเซนติเมตรแสดงการสั่นแบบยืดของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbon; C-H) ประเภทแอลเคน (Alkane) ซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส [29] โดยให้แถบที่มีความเข้มสูงในช่วงเลขคลื่น 3,000-2,800 ต่อเซนติเมตร จากรูปที่ 7 ยังคงปรากฏพีคในทุกอุณหภูมิที่ใช้ทอรรีไฟกซ์แต่ความเข้มพีคมีค่าลดลง นั่นคือเมื่ออุณหภูมิในการทอรรีไฟกซ์มีค่าสูงขึ้นส่งผลต่อการลดลงของปริมาณเซลลูโลสในเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟกซ์ซึ่งเป็นสาเหตุการลดลงของผลได้เชิงมวล

การปรากฏพีค 1,733 ต่อเซนติเมตร ในช่วงเลขคลื่น 1,765-1,715 ต่อเซนติเมตร ตรงกับการสั่นของพันธะ C=O ในหมู่คาร์บอนิลที่อยู่ภายในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [30] พบว่าความเข้มของพีคมีค่าลดลงในทุกอุณหภูมิที่ใช้ทอรรีไฟกซ์ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิในการทอรรีไฟกซ์สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสลายตัวของหมู่คาร์บอนิลในเฮมิเซลลูโลสได้มากขึ้นซึ่งส่งผลอย่างมากต่อการลดลงของผลได้เชิงมวล การปรากฏพีค 1,601 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=C ในอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbon) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีเสถียรภาพสูงภายในโครงสร้างของลิกนิน [31] ความเข้มพีคมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิทอรรีไฟกซ์มีค่าสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส แม้โครงสร้างของลิกนินจะมีความแข็งแรงแต่เนื่องจากลิกนินมีช่วงการสลายตัวที่กว้างคือ 150-900 องศาเซลเซียส จึงพบการสลายตัวของลิกนินเพียงบางส่วนเนื่องจากในการศึกษานี้ทำการทอรรีไฟกซ์เฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส

การปรากฏพีคที่ 1,239 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นแบบยืดหดที่ไม่สมมาตร (Asymmetric stretching) ของพันธะ C-O ในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน และการปรากฏพีค 1,020 ต่อ

เซนติเมตร ตรงกับการสั่นของพันธะ C-O ในโครงสร้าง พิกะมีค่าลดลงอย่างมากและเริ่มไม่ปรากฏพิกะที่อุณหภูมิ ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส [32] ซึ่งความเข้มของ ในกระบวนการสูงกว่า 275 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 สเปกตรัมการส่งผ่านของเหง้ามันสำปะหลังดิบและเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 250-300 °C

สรุปผล

การปรับปรุงสมบัติด้านเชื้อเพลิงของเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการทอรรีไฟกชันที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่อเนื่องนาน 30 นาที ส่งผลให้สมบัติด้านเชื้อเพลิงของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์หรือก็คือ ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีค่าสูงกว่าเหง้ามันสำปะหลังดิบ และที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ส่งผลให้สมบัติด้านเชื้อเพลิงมีค่าความร้อน ความหนาแน่นพลังงานมีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียง ถ่านหินลิกไนต์ อีกทั้งปริมาณเถ้าของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย สำหรับการผลิตชีวมวลทอรรีไฟด์ในเชิงพาณิชย์ควรตระหนักถึงปริมาณผลได้เชิงมวล เนื่องจากมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ

เอกสารอ้างอิง

1. Pattiya A. Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor. *Bioresour Technol.* 2011;102(2):1959-67.
2. Jongpluempiti J, Tangchaichit K. Comparison proximate analysis and heating value between cassava rhizome and perennial Wood. *Adv Mater Res.* 2012;415-417:1693-6.
3. Chitsanucha S, Khwanruthai T. The study on efficacy charcoal from corn cob and charcoal from cassava rhizome. In: *The 3th National Conference KPRU. Kamphaeng Phet, Thailand;* 608-13.
4. Günther B, Gebauer K, Barkowski R, Rosenthal M, Bues C-T. Calorific value of selected wood species and wood products. *Eur J Wood Prod.* 2012;70(5):755-7.
5. Shariff A, Noor N, Lau A, Ali M. A comparative study on biochar from slow pyrolysis of corn cob and cassava wastes. *Int j sci res innov.* 2016;10(12):767-71.
6. Rueangsana K, Kraisoda P, Heman A, Tasarod H, Wangkulangkool M, Trisupakitti S, et al. Bio-oil and char obtained from cassava

- rhizomes with soil conditioners by fast pyrolysis. *Heliyon*, 2021;7(11):e08291.
7. Acharya B, Sule I, Dutta A. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. *Biomass Conv Bioresour*. 2012;2(4):349–69.
 8. Nakason K, Khemthong P, Kraithong W, Chukaew P, Panyapinyopol B, Kitkaew D, et al. Upgrading properties of biochar fuel derived from cassava rhizome via torrefaction: Effect of sweeping gas atmospheres and its economic feasibility. *Case Stud Therm Eng*. 2021;23:100823.
 9. Tumuluru JS, Sokhansanj S, Hess JR, Wright CT, Boardman RD. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Ind Biotechnol*. 2011;7(5):384-401.
 10. Negi S, Jaswal G, Dass K, Mazumder K, Elumalai S, Roy JK. Torrefaction: a sustainable method for transforming of agri-wastes to high energy density solids (biocoal). *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2020;19(2):463–88.
 11. Soponpongpiat N, Nanetoe S, Comsawang P. Thermal Degradation of Cassava Rhizome in Thermosyphon-Fixed Bed Torrefaction Reactor. *Processes*. 2020;8(3):267.
 12. Mamvura TA, Danha G. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon*, 2020;6(3):e03531.
 13. Granados DA, Velásquez HI, Chejne F. Energetic and exergetic evaluation of residual biomass in a torrefaction process. *Energy*. 2014;74: 181–9.
 14. Bai X, Wang G, Gong C, Yu Y, Liu W, Wang D. Co-pelletizing characteristics of torrefied wheat straw with peanut shell. *Bioresour Technol*. 2017;233:373–81.
 15. Matali S, Rahman NA, Idris SS, Yaacob N, Alias AB. Lignocellulosic biomass solid fuel properties enhancement via torrefaction. *Procedia Eng*. 2016;148:671–8.
 16. Friedl A, Padouvas E, Rotter H, Varmuza K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta*. 2005;544(1):191–8.
 17. Watanabe T, Shino A, Akashi K, Kikuchi J. Chemical profiling of jatropha tissues under different torrefaction conditions: application to biomass waste recovery. *PLoS One*. 2014; 9(9):e106893.
 18. Kosolkittiamporn S. Assumption test of one-way analysis of variance in social science research. *J YRU*. 2020;15(1):118-27.
 19. Viroj J. One-way ANOVA and multiple comparison in public health research: a case study of hemorrhagic fever protection. *Scimsu*. 2015;34(3):304-11.
 20. Dyjakon A, Noszczyk T, Smedzik M. The influence of torrefaction temperature on hydrophobic properties of waste biomass from food processing. *Energies*. 2019;12 (24):4609.

21. Mamvura TA, Pahla G, Muzenda E. Torrefaction of waste biomass for application in energy production in South Africa. *S Afr J Chem Eng.* 2018;25:1–12.
22. Chen D, Gao A, Cen K, Zhang J, Cao X, Ma Z. Investigation of biomass torrefaction based on three major components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energy Convers Manag.* 2018;169:228–37.
23. Nakason K, Pathomrotsakun J, Kraithong W, Khemthong P, Panyapinyopol B. Torrefaction of agricultural wastes: influence of lignocellulosic types and treatment temperature on fuel properties of biochar. *Int Energy J.* 2019;19(4):253–66.
24. Lieskovský M, Jankovský M, Trenčiansky M, Merganic J. Ash content vs. the economics of using wood chips for energy: model based on data from central europe. *Bioresources.* 2017;12(1):1579–92.
25. Niu Y, Lv Y, Lei Y, Liu S, Liang Y, Wang D, et al. Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. *Renew Sustain Energy Rev.* 2019;115:109395.
26. Ramos-Carmona S, Pérez JF, Pelaez-Samaniego MR, Barrera R, Garcia-Perez M. Effect of torrefaction temperature on properties of Patula pine. *Maderas Ciencia y tecnología.* 2017;19(1):39–50.
27. Pala M, Kantarli IC, Buyukisik HB, Yanik J. Hydrothermal carbonization and torrefaction of grape pomace: a comparative evaluation. *Bioresour Technol.* 2014;161:255–62.
28. Hadjiivanov K. Identification and characterization of surface hydroxyl groups by infrared spectroscopy. *Adv Catal.* 2014;57:99–318.
29. Yin Y, Yin J, Zhang W, Tian H, Hu Z, Ruan M, et al. Effect of char structure evolution during pyrolysis on combustion characteristics and kinetics of waste biomass. *J Energy Resour Technol.* 2018;140(7):072203.
30. Granados DA, Ruiz RA, Vega LY, Chejne F. Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. *Energy.* 2017;139:818–27.
31. Horikawa Y, Hirano S, Mihashi A, Kobayashi Y, Zhai S, Sugiyama J. Prediction of lignin contents from infrared spectroscopy: chemical digestion and lignin/biomass ratios of cryptomeria japonica. *Appl Biochem Biotechnol.* 2019;188(4):1066–76.
32. So CL, Eberhardt TL. FTIR-based models for assessment of mass yield and biofuel properties of torrefied wood. *Wood Sci Technol.* 2018;52:209-27.