คุณสมบัติการเผาไหม้ของเปลือกทุเรียน ทางปาล์ม และทางตาล ที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่น
Combustion Properties of Torrefied Durian Peel, Palm Frond, and Sugar Palm Frond

สุรเศรษฐ์ พาพันธ์[1] พิเชฐ นิลดวงดี[1,*] และเอกวุฒิ แสนคำวงษ์

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี อำเภอเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี 76000 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000
*ติดต่อ: ninduangdee.p@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเผาไหม้ของชีวมวล 3 ชนิดที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟชั่นได้แก่ เปลือกทุเรียน ทางปาล์ม และทางตาล โดยก่อนการทดลองชีวมวลได้นำชีวมวลไปลดความชื้นด้วยการตากแดดใช้เวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นถูกนำมาผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นในเตาปฏิกรณ์แบบนอนโดยมีเงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิ 240, 260, 280, และ 300 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทดลองของแต่ละอุณหภูมิได้แก่ 20, 60 และ 90 นาที โดยการทดลองใช้ในโตรเจนที่มีอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นมีคุณสมบัติทางการเผาไหม้ที่ดีขึ้น ค่าความร้อนของเปลือกทุเรียน ทางปาล์ม และทางตาล มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 22.8 MJ/kg, 23.1 MJ/kg และ 24.5 MJ/kg เพิ่มขึ้นจากเดิม 71%, 58% และ 62% ตามลำดับ สามารถเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบเผาไหม้หรือเผาไหม้ร่วมได้

คำหลัก: ทอรีแฟกชั่น; ชีวมวล; คุณสมบัติการเผาไหม้

Abstract

This research aimed at study combustion properties of 3 torrefied biomasses namely durian peel, palm frond, and sugar palm frond. Prior to torrefaction process, the feedstock was pre-dried in open air for 12 h. The treated feedstock was torrefied in a horizontal reactor at temperatures: 240, 260, 280, and 300 °C. At each torrefaction temperature, a residence time was varied for 20, 60, and 90 min. All tests were performed at fixed nitrogen flowrate of 100 ml/min. The findings revealed that the three torrefied biomasses have a better combustion property. The heating values of durian peel, palm frond, and sugar palm frond increased to be 22.8 MJ/kg, 23.1 MJ/kg and 24.5 MJ/kg, higher than the raw materials 71% 58% and 62%, respectively. It can be suggested to be used as alternative fuel for combustion or co-firing systems.

Keywords: Torrefaction, biomass; combustion property

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญที่สุดแห่งหนึ่งของโลก ประชากรในประเทศมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม แต่ละปีมีการสร้างผลิตผลทางการเกษตรอย่างมากมายทั้งเพื่อการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก ซึ่งในระหว่างกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรก็มีของเสียและวัสดุเหลือทิ้ง (residues) จากการเกษตรเกิดขึ้นปริมาณมาก เช่น วัสดุเหลือทิ้งจากการทำนาข้าว มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน หรือข้าวโพด เป็นต้น แม้ว่าวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการเหล่านี้บางส่วนจะถูกนำไปใช้ในด้านพลังงาน ยกตัวอย่างเช่น แกลบ กะลาปาล์ม เป็นต้น แต่ยังมีวัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่นๆ ปริมาณมากที่ยังไม่ถูกใช้ประโยชน์เชิงพลังงานอย่างแพร่หลายและจริงจัง ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ นอกจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรหลักแล้ว ในประเทศไทยยังมีวัสดุ

เหลือทิ้งชนิดอื่นที่ยังไม่แพร่หลาย เช่น เปลือกทุเรียน ทางปาล์ม และทางตาล อย่างไรก็ตามวัสดุที่กล่าวมาทั้ง 3 ชนิดนี้ ยังไม่ถูกนำมาใช้เป็นเป็นชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงาน สาเหตุหลักคือมีความชื้นสูง ทำให้การนำมาใช้ประโยชน์เป็นไปได้ค่อนข้างยาก

กระบวนการทอรีแฟกชั่น (torrefaction) เป็นกระบวนการทางความร้อนเชิงเคมีหนึ่งที่ได้รับการยอมรับเหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล [1–3] กระบวนการทอรีแฟกชั่นใช้หลักการไพโรไลซิสที่ไม่รุนแรง (mild pyrolysis) กระบวนการนี้เป็นการนำวัสดุชีวมวลมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 250–300 °C ในสภาวะอับออกซิเจน [4–6] ที่ช่วงอุณหภูมินี้ ความชื้นและสารอินทรีย์ระเหยได้ จะถูกไล่ออกจากเนื้อของวัสดุ และเฮมิเซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวที่ความร้อนต่ำ (ประมาณ 200–300 °C) แต่เซลลูโลสและลิกนินที่เหลืออยู่จะใช้ความร้อนสูงกว่า กระบวนการทอริแฟคชั่นสามารถเพิ่มความสม่ำเสมอของคุณสมบัติเชื้อเพลิง เพิ่มความหนาแน่นพลังงาน มีความต้านทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ดีขึ้น ลดการกักเก็บน้ำ เพิ่มความสามารถในการบด และยังสามารถลดพื้นที่การจัดเก็บและค่าการขนส่งได้ นอกจากนี้หากนำชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นมาทำการอัดขึ้นรูปจะสามารถเพิ่มคุณสมบัติที่เหมาะต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตพลังงานได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกทุเรียน ทางปาล์ม และทางตาล ที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นที่สภาวะแตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มข้อมูลเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใหม่ที่อาจนำไปใช้ในด้านพลังงานทดแทนได้

2. วัสดุและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมชีวมวลตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุตัวอย่าง 3 ชนิดได้แก่ เปลือกทุเรียน (durian peel, DP) ทางปาล์ม (palm frond, PF) และทางตาล (sugar palm frond, SPF)เปลือกทุเรียนที่ใช้เป็นพันธุ์ป่าละอู สำหรับทางปาล์มและทางตาล เป็นตัวอย่างจากพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี

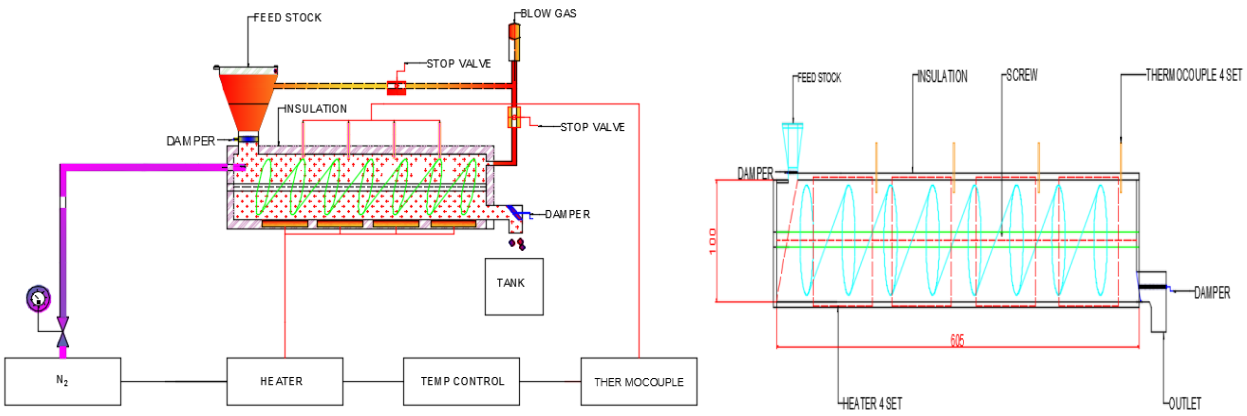
เนื่องจากวัสดุตัวอย่างที่ได้มา มีความชื้นที่ค่อนข้างสูง ดังนั้น ก่อนกระบวนการทอรีแฟกชั่น ตัวอย่างวัสดุทั้ง 3 ชนิดถูกนำไปตากแดด เป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อลดความชื้น

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงประกอบด้วย proximate และ ultimate analyses ค่า

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเปลือกทุเรียน (DP) ทางปาล์ม (PF) และ ทางตาล (SF) ก่อนกระบวนการทอรีแฟกชั่น

Biomass	Ultimate analysis (wt.%, as tested basis)				Ultimate analysis (wt.%, as tested basis)					HHV (MJ/kg)
	M	VM	FC	A	C	H	O	N	S	
DP	15.1	59.9	20.0	5.0	36.9	16.6	43.1	2.4	0.8	13.3
PF	3.1	64.6	24.0	8.3	40.3	4.8	54.2	0.7	-	14.6
SPF	4.6	69.3	22.1	4.0	42.1	5.5	47.5	0.7	0.1	15.1

(ก) (ข)



รูปที่ 1. (ก) แผนภาพระบบที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟกชั่น (ข) แผนภาพเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟกชั่น

ความร้อนสูง (higher heating value) ของเชื้อเพลิงจากตาราง เห็นได้ว่าแม้จะผ่านการตากแดดเป็นเวลา 8 ชั่วโมง เชื้อเพลิงทั้ง 3 ยังมีค่าความชื้นที่อยู่ในระดับปานกลางประมาณ 13–17 % ส่งผลให้ค่า HHV ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 อยู่ในระดับปานกลางประมาณ 13–16 MJ/kg

2.2 เตาปฏิกรณ์ทอร์รีแฟคชั่น

ในการวิจัยนี้ เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟกชั่นแบบนอน ดังแสดงในรูปที่ 2 ถูกใช้สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลทอรีไฟด์ ส่วนประกอบหลักของเตาปฏิกรณ์นี้ประกอบด้วยเตาปฏิกรณ์ทำจากเหล็กหนา 4 mm ภายในห้องปฏิกรณ์มีสกรูสำหรับลำเลียงตัวอย่างชีวมวล เตาปฏิกรณ์นี้สามารถบรรจุชีวมวลได้สูงสุด 2 kg มีระบบการจ่ายและควบคุมแก๊ส ใช้ฮีตเตอร์ (heater) ขนาด 300 W 4 ตัว สำหรับการให้ความร้อนตลอดความยาวของเตาปฏิกรณ์ การควบคุมอุณหภูมิใช้คอนโทลเลอร์ดิจิตอลที่สามารถตั้งค่าอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ โดยใช้สายวัดอุณหภูมิตรวจจับความแม่นยำของแต่ละจุดไว้ที่ผนังของตัวเครื่องทดลอง และหุ้มฉนวนกันความร้อนภายนอกเพื่อรักษาระดับของความร้อนให้แม่นยำและคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด อุณหภูมิของผิวนอกของเตาปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าอุณหภูมิบรรยากาศไม่เกิน 5 °C

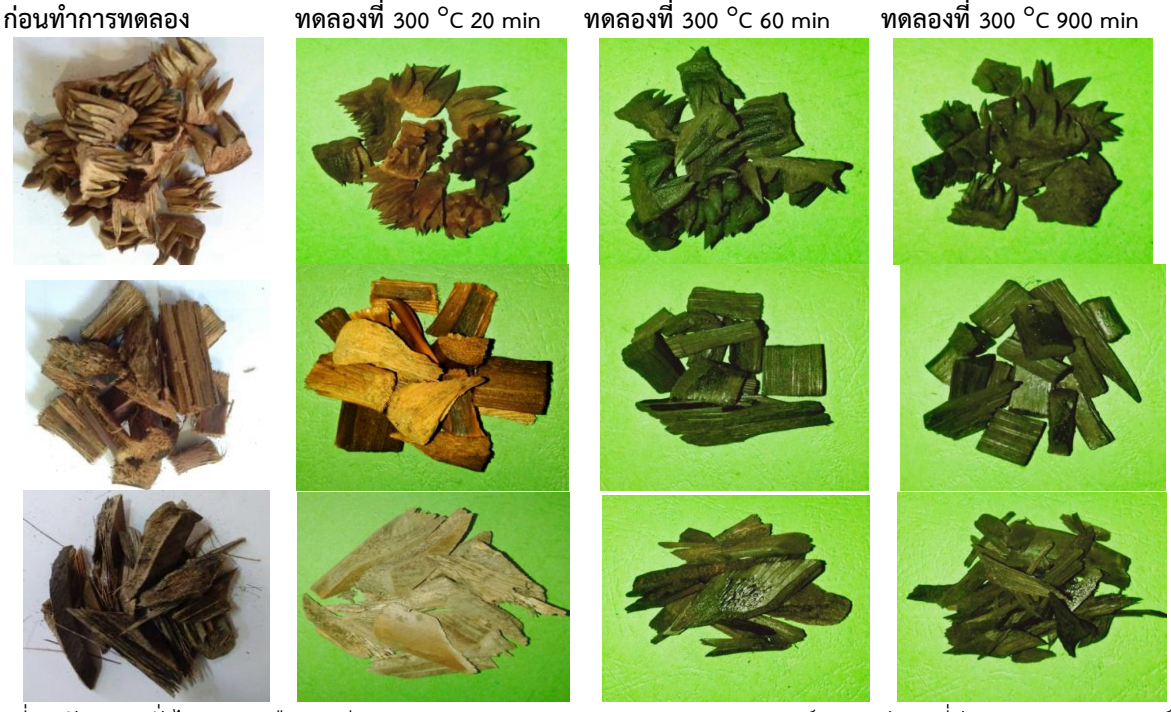
ตัวอย่างชีวมวลประมาณ 100 g ถูกป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งถังป้อนชีวมวล (feed stock) จากนั้นเปิดระบบให้ความร้อนให้กับระบบ ในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 240, 260, 280 และ 300 °C แต่ละอุณหภูมิมีการกำหนดเวลาเป็น 20, 60 และ 90 min กำหนดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในเตาปฏิกรณ์ที่ 100 ml/min ในชุดทดลองนี้ได้มีการติดตั้งโบลแก๊ส (safety valve)ไว้ที่ด้านบนของชุดทดลองเพื่อป้องกันแรงดันเกินพิกัดในขณะทำการทดลองและป้องกันแรงดันจากการเกิดแก๊สแรงดันขณะทำการทลอง เมื่อสิ้นสุดแต่ละการทดลอง ฮีตเตอร์จะถูกหยุดการทำงาน แต่ยังมีการไหลของแก๊สไนโตรเจนอยู่สำหรับการลดอุณหภูมิระบบให้เข้าสู่สภาวะบรรยากาศปกติ แต่ละการทดลองถูกทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูล

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากการทดลองเชื้อเพลิงชีวมวลถูกวัดน้ำหนัก จากนั้นนำมาคำนวณหาผลได้เชิงมวล (mass yield) หาจากสมการที่ 1

$$\text{mass yield}(\%) = \frac{m_t}{m_r} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ m_t คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอรี



รูปที่ 2 ลักษณะทั่วไปของเปลือกทุเรียน (รูปบน) ทางตาล (รูปกลาง) และทางปาล์ม (รูปล่าง) ที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชั่น 300 °C ที่เวลาต่างกัน

แฟกชั่น และ m_r คือมวลของตัวอย่างการการทดลอง

การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของตัวอย่างใช้วิธีการที่แนะนำโดย ASTM E-871 สำหรับความชื้น (M), E-872 สำหรับสารระเหย, E-1755 สำหรับเถ้า (A), D-3172 สำหรับคาร์บอนคงที่ (FC) และใช้ ASTM-D-5291 สำหรับการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) เพื่อหาค่า คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และ ซัลเฟอร์ (S) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงใช้เครื่องบอมบ์ bomb calorimeter (LECO AC500)

3. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

3.1 ลักษณะทั่วไปของเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชั่น

รูปที่ 2 แสดงรูปตัวอย่างของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นที่อุณหภูมิ 300 °C ทำการทดลอง 90 นาที จากรูปจะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นมีสีเข้มขึ้น เนื่องจากการสูญเสียสารระเหยและการกลายเป็นถ่านบางส่วน

3.2 ผลได้เชิงมวล

รูปที่ 3 แสดงผลได้เชิงมวลของเชื้อเพลิงชีวมวล 3 ชนิดที่สภาวะการทดลองแตกต่างกัน จากรูปที่ 3 เห็นได้ว่า ในทุกกรณีศึกษา ค่าผลได้เชิงมวลมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิและเวลาทอรีแฟกชั่นชันมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีการระเหยของน้ำและสาระเหยบางส่วนออกจากเชื้อเพลิง นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิ 240–300 °C มีการเกิดการสลายตัวของ cellulose และ hemicellulose ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่ออุณหภูมิทอรีแฟกชั่นสูงขึ้น ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา [7]

เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิและเวลาที่เท่ากัน จะเห็นได้ว่า ค่าผลได้เชิงมวลของเปลือกทุเรียนมีค่าสูงสุด

3.3 Proximate analysis

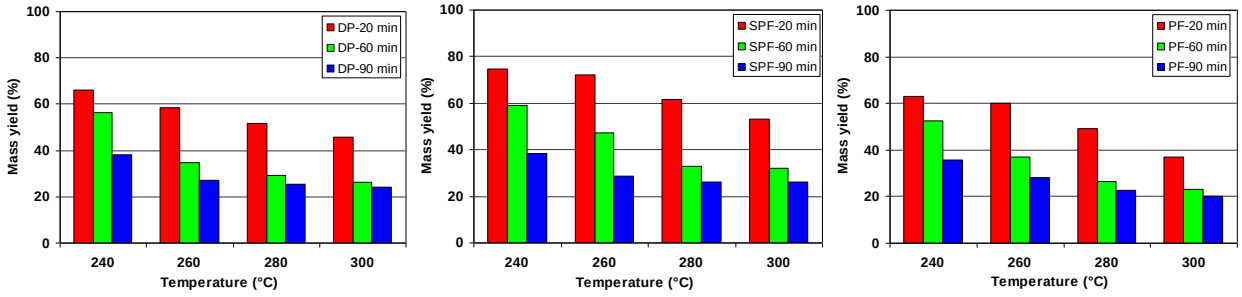
ผลการวิเคราะห์ proximate analysis ของเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นแสดงในรูปที่ 4 ในบทความนี้แสดงผลเฉพาะ สารระเหย (VM) คาร์บอนคงที่ (FC) และเถ้า (A) ไม่ได้แสดงผลของความชื้น ทั้งนี้เนื่องจาก หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นแล้วความชื้นของเชื้อเพลิงถูกไล่ออกไปจนหมด

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่า proximate analysis ของเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปอย่างมากเมื่อเทียบกับค่าในตารางที่ 1 จากรูปที่ 4 มีการลดลงของสารระเหย เมื่ออุณหภูมิทอรีแฟกชั่นและเวลามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการสูญเสียสารระเหยเนื่องจากความร้อน

ค่าผลได้เชิงมวลของแต่ละเชื้อเพลิงเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นที่ อุณหภูมิ 300 °C และ 90 นาที มีค่าเป็น 37.5%, 20.0% และ 32.7% สำหรับเปลือกทุเรียน ทางตาล และทางปาล์ม ตามลำดับ

ค่าคาร์บอนคงที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสูญเสียสารระเหย ทำให้สัดส่วนของปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคาร์บอนคงที่ของเชื้อเพลิงก่อนทำการทดลองจะเห็นได้ว่าคาร์บอนคงที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากจาก 20.0% เป็น 53.3% สำหรับเปลือกทุเรียน 24% เป็น 61.9% สำหรับทางตาล และจาก22.1% เป็น 64.0% สำหรับทางปาล์ม ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิงต่อไป

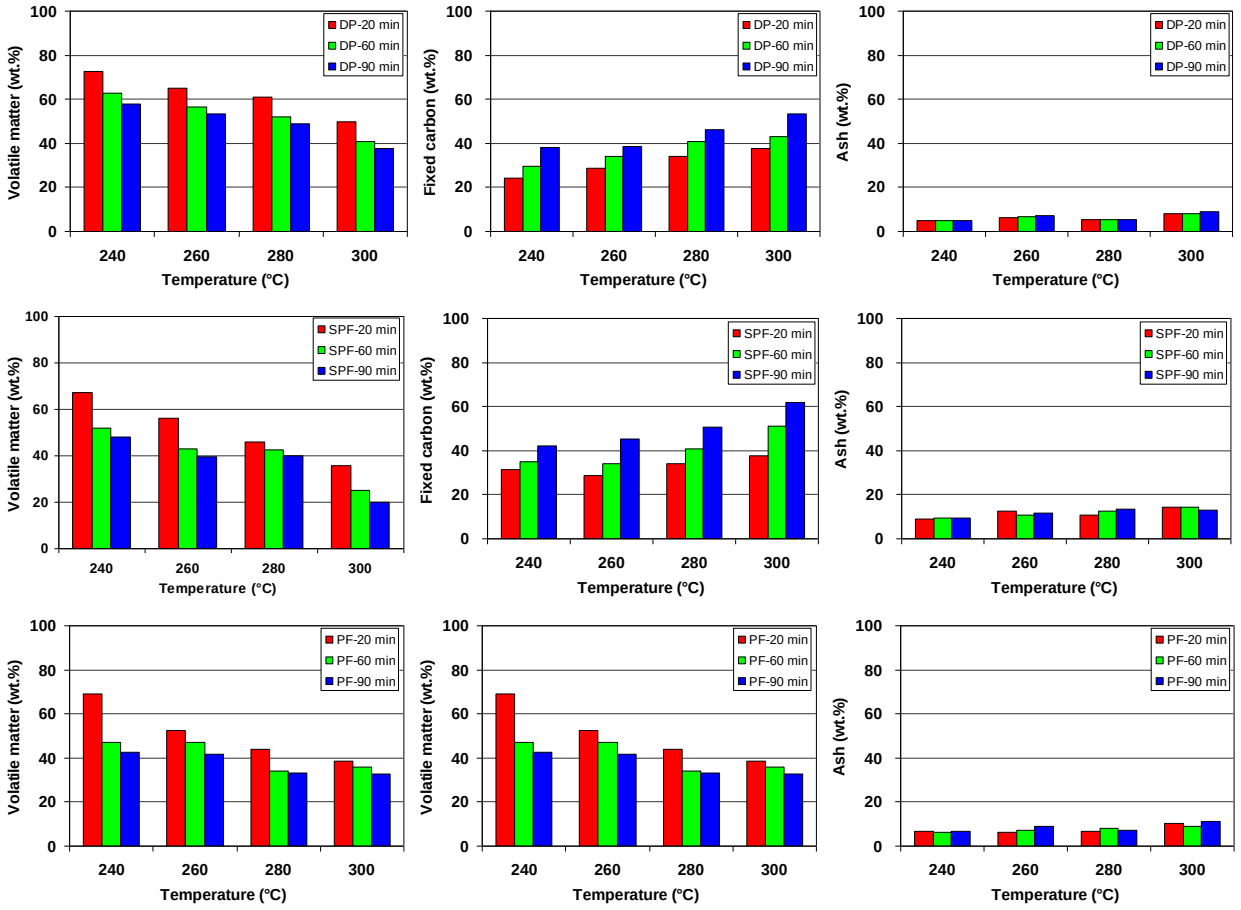
ในกรณีของเถ้า เมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นจะเห็นได้ว่า มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเป็นผลมาจากการสูญเสียสารอินทรีย์บางชนิดระหว่างกระบวนการทอรีแฟกชั่น [8]



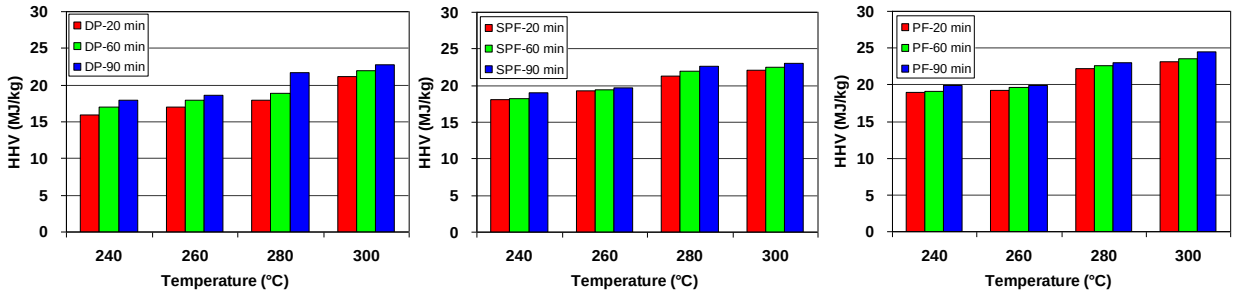
รูปที่ 3 ผลได้เชิงมวล (mass yield) ของเปลือกทุเรียน (กราฟซ้าย) ทางตาล (กราฟกลาง) และทางปาล์ม (กราฟขวา) ที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นต่างกัน

3.4 ค่าความร้อน

รูปที่ 5 แสดงผลกระทบของสภาวะทอรีแฟกชั่นต่อค่าความร้อนของชีวมวล จากรูป เห็นได้ว่าเมื่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีค่าสูงสุดที่การทดสอบ 300 °C และ 90 นาที มีค่าเป็น 22.8 MJ/kg สำหรับเปลือกทุเรียน 23.1 MJ/kg สำหรับทางปาล์ม และ 24.5 MJ/kg สำหรับ เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงก่อนทำการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นประมาณ 71% 58% และ 62% ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสามารถอธิบายได้จากการลดลงของความชื้นสารระเหยและการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนคงที่ในเชื้อเพลิง และนอกจากนี้ หากทำการวิเคราะห์ ultimate analysis คาดว่าอัตราส่วนระหว่าง C/O จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง [9]



รูปที่ 4 Proximate analysis ของเปลือกทุเรียน (รูปบน) ทางตาล (รูปกลาง) และทางปาล์ม (รูปล่าง) ที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชั่น 300 °C ที่เวลาต่างกัน



รูปที่ 5 ค่าความร้อนสูง (HHV) ของเปลือกทุเรียน (กราฟซ้าย) ทางตาล (กราฟกลาง) และทางปาล์ม (กราฟขวา) ที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชั่นต่างกัน

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ชีวมวลที่ไม่แพร่หลายในประเทศไทย 3 ชนิด ได้แก่เปลือกทุเรียน ทางตาล และทางปาล์ม ถูกปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ทางพลังงานด้วยกระบวนการทอรีแฟกชั่น จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลามีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิง ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นมีค่าเป็น 22.8 MJ/kg สำหรับเปลือกทุเรียน 23.1 MJ/kg สำหรับทางปาล์ม และ 24.5 MJ/kg สำหรับทางตาล เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงก่อนทำการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นประมาณ 71% 58% และ 62% ตามลำดับ จากค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด มีศักยภาพในการเอาไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบขนาดเล็กหรือเผาไหม้ร่วมได้ แต่อย่างไรก็ตามต้องมีการศึกษาคุณสมบัติอื่นของเชื้อเพลิงเพิ่มเติมเช่นคุณสมบัติเถ้า ความสามารถในการบด เป็นต้น

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Bridgeman, T.G., Jones, J.M., Shield, I., Williams, P.T. (2008). Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. Fuel 87 (6), 844–856.

[2] Chen, W.H., Hsu, H.C., Lu, K.M., Lee, W.J., Lin, T.C. (2011). Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. Energy 36, 3012–3021.

[3] Chen, W.H., Kuo, P.C. (2010). A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. Energy 35, 2580–2586.

[4] Chew, J., Doshi, V. (2011). Recent advances in biomass pretreatment torrefaction fundamentals and technology. Renew. Sust. Energ. Rev. 15, 4212–4222.

[5] Ru, B., Wang, S., Dai, G., Zhang, L. (2015). Effect of torrefaction on biomass physicochemical characteristics and the resulting pyrolysis behavior. Energy Fuels 29, 5865–5874.

[6] Felfli, F.F., Luengo, C.A., Suárez, J.A., Beatón, P.A. (2005). Wood briquette torrefaction. Energy Sustain. Deve. 9, 19–22.

[7] Ciolkosz, D., Wallace, R. (2011). A review of torrefaction for bioenergy feedstock production Biofuels. Bioprod. Biorefining 5 (3), 317–329.

[8] Phanphanich, M., Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. Bioresour. Technol. 102, 1246–1253.

[9] Meng, J., Park, J., Tilotta, D., Park, S. (2012). The effect of torrefaction on the chemistry of fast-pyrolysis bio-oil. Bioresour. Technol. 111, 439–446.