

**การปรับปรุงสมบัติของใบอ้อยด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน
โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง**
**Improvement of Sugarcane Leaves Property by Torrefaction
in a Continuous Tubular Flow Reactor**

สถาพร สอนสุภาพ¹ อติศักดิ์ ปัตติยะ^{2*}

¹นักศึกษาปริญญาโท ²รองศาสตราจารย์ หน่วยปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Sathapon Sonsupap¹ Adisak Pattiya^{2*}

Bio-Energy and Renewable Resources Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham
University, Khamriang, Kantharawichai, Maha Sarakham, 44150

*Corresponding author: Email: adisak_pattiya@yahoo.com

(Received: January 19, 2018; Accepted: April 20, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการทอรรีแฟกชันของใบอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบท่อไหลแบบต่อเนื่องขนาดห้องทดลอง 600 กรัมต่อชั่วโมง มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงค่าความร้อนของชีวมวลโดยให้มีการสูญเสียมวลน้อยที่สุดและมุ่งให้มีการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่ำที่สุด โดยมีการศึกษาผลของอุณหภูมิทอรรีแฟกชันที่ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส และระยะเวลาคงอยู่ของของแข็งที่ 1, 3 และ 5 นาที ต่อปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงาน ค่าความร้อนและค่าการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟด์ ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ช่วงของตัวแปรที่ศึกษาดังกล่าว ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์คือร้อยละ 68-89 โดยมวลฐานแห้ง ปริมาณผลได้เชิงพลังงานคือร้อยละ 84-95 ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์อยู่ในช่วง 19-21 MJ/kg เมื่อเทียบกับชีวมวลตั้งต้นที่มีค่าความร้อนสูงเพียง 17.5 MJ/kg ทำให้ค่าการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่าเป็น 1.06-1.21 โดยพบว่าสภาวะที่ทำให้ถ่านทอรรีไฟด์มีค่าความร้อนสูงที่สุดและมีค่าการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงที่สุดคือที่ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที

คำสำคัญ: ใบอ้อย ทอรรีแฟกชัน อุณหภูมิ เวลาคงอยู่ของของแข็ง เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง

ABSTRACT

In this paper, torrefaction of sugarcane leaves was carried out in a lab-scale 600 g/h continuous flow pyrolysis reactor with an aim to improve the biomass heating value with minimum weight loss and minimum reaction time. The effects of torrefaction temperature (260, 280 and 300°C) and solid residence time (1, 3 and 5 min) were investigated to determine the mass and energy yields, the heating value and the energy densification of the torrefied biomass. The results show that, within the ranges of the parameters studied, the mass yields of 68-89 wt% on dry basis were obtained, corresponding to

the energy yields of 84- 95%. The higher heating values of the torrefied sugarcane leaves were in the range of 19-21 MJ/kg compared to 17.5 MJ/kg for the original biomass. This corresponds to the energy densification of 1.06- 1.21. The torrefaction conditions that gave the highest torrefied biomass heating value and energy densification were 280°C and 5 minutes.

Keyword: Sugarcane leaves, torrefaction, temperature, residence time, continuous tubular flow reactor.

1. บทนำ

ในปัจจุบันและที่ผ่านมามีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นจำนวนมาก ผลจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนและสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ วิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหาหรือช่วยบรรเทา คือ การสนับสนุนการใช้ชีวมวล ซึ่งทุกวันนี้มีการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอยู่ในหลายรูปแบบ โดยทั่วไปอาจนำมาใช้ในการเผาไหม้โดยตรง การนำมาอัดเม็ดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน หรือการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน เช่น “กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process)” ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 5 ระดับ คือ ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) ไพโรไลซิสแบบกลาง (Intermediate pyrolysis) ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และทอร์รีแฟกชัน (Torrefaction) โดย 5 กระบวนการดังกล่าวมีความแตกต่างกันที่อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาคงอยู่ ตัวแปรเหล่านี้ส่งผลให้ปริมาณผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน [1]

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอน้ำประมาณ 2-3 วินาที [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของเหลว ส่วนปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งและแก๊สเท่า ๆ กัน กระบวนการไพโรไลซิสแบบกลางใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอน้ำประมาณ 10-30 วินาที [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของเหลว แต่น้อยกว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าหรือ

กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ใช้อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่หลายชั่วโมงหรืออาจนานเป็นวัน [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์มีใกล้เคียงกันทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แก๊สซิฟิเคชันใช้อุณหภูมิประมาณ 750-900 องศาเซลเซียส [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นแก๊ส ส่วนปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวเท่า ๆ กัน กระบวนการทอร์รีแฟกชันหรือเรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิสแบบอ่อน (Mild pyrolysis) [2] ใช้อุณหภูมิประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ประมาณ 1-120 นาที ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของแข็ง รองลงมาเป็นของเหลวและมีแก๊สเล็กน้อย โดยผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งเรียกว่า ถ่านทอร์รีไฟด์ (Torrefied biomass) หากมีการปรับปรุงสมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์มากพอ ถ่านสามารถมีค่าพลังงานความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหินได้ และดีกว่าถ่านหินในแง่ของปริมาณกำมะถันและไนโตรเจน เนื่องจากชีวมวลมีปริมาณกำมะถันและไนโตรเจนน้อยมาก จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านทอร์รีไฟด์และใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพทดแทนถ่านหิน

สมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์มีข้อดีหลายอย่าง เช่น ค่าความร้อน สัดส่วนของคาร์บอน [3, 4] การไม่ดูดความชื้นจากอากาศ [4-6] และความเปราะ โดยสมบัติของความเปราะของถ่านทอร์รีไฟด์ส่งผลให้สามารถบดอัดได้ง่าย จึงทำให้มีความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงขึ้นและลดต้นทุนการขนส่งได้ ทั้งนี้ยังสามารถนำถ่านทอร์รีไฟด์ไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับโรงไฟฟ้าถ่านหินได้ [7]

การสำรวจในปี 2013 พบว่าทั่วโลกมีการปลูกอ้อยอยู่ที่ประมาณ 2 พันล้านตันต่อปี ประเทศไทยมีการปลูกอ้อยเป็นอันดับที่ 4 ของโลก รองจากประเทศบราซิล อินเดีย และจีน ประเทศไทยมีการปลูกอ้อยอยู่ประมาณ 1 ร้อยล้านตันต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 5 ของทั่วโลก [8] อัตราส่วนของของเหลือใช้จากอ้อยต่ออ้อยคือ 0.302 [9] ดังนั้นของเหลือใช้จากอ้อยของทั่วโลกมีประมาณ 6 ร้อยล้านตันต่อปี ของเหลือใช้จากอ้อยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ใบอ้อยและชานอ้อย ชานอ้อยมีการนำไปใช้งานโดยการนำไปเผาไหม้ให้ความร้อนกับหม้อต้มไอน้ำ แต่ก็ยังสามารถปรับปรุงได้ด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน [10-14] เช่นงานวิจัยของ A. T. Conag และคณะ 2017 [10] ได้ทำการศึกษาโดยใช้ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ในแต่ละการทดลองใช้ชีวมวลประมาณ 9 กรัม ที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาคงอยู่ของของแข็ง 0-75 นาที ซึ่งเวลาคงอยู่ของของแข็งเริ่มจับเมื่อชีวมวลที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิถึงที่กำหนด ในกระบวนการใช้แก๊สออกซิเจนปริมาณร้อยละ 3 โดยปริมาตร การใช้แก๊สออกซิเจนปริมาณน้อยนี้ไม่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของถ่านทอรรีไฟต์อย่างมีนัยสำคัญ [15] ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งอย่างน้อย 60 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ ซึ่งได้ถ่านทอรรีไฟต์ที่มีความร้อนสูงประมาณ 26 MJ/kg แต่สำหรับการวิจัยที่ใช้ใบอ้อยเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านทอรรีไฟต์นั้นมีเพียงงานวิจัยของ A. T. Conag และคณะ 2018 [16] ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ในแต่ละการทดลองใช้ชีวมวลประมาณ 17 กรัม ที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาคงอยู่ของของแข็ง 0-75 นาที เวลาคงอยู่ของของแข็งเริ่มจับเมื่อชีวมวลที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิถึงที่กำหนด ในกระบวนการใช้แก๊สออกซิเจนปริมาณร้อยละ 3 โดยปริมาตร การใช้แก๊สออกซิเจนปริมาณน้อยนี้ไม่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของถ่านทอรรีไฟต์อย่างมีนัยสำคัญ [15]

ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งอย่างน้อย 45 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ดังนั้นเวลาในการทดลองทั้งสิ้นตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 30 ไปจนถึง 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 27 นาที เวลาคงอยู่ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อีก 45 นาที รวมเป็น 72 นาที เพื่อผลิตถ่านทอรรีไฟต์ที่มีค่าความร้อนสูง 21.6 MJ/kg ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ร้อยละ 52 โดยน้ำหนักฐานแห้ง และมีปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ร้อยละ 68 โดยน้ำหนักฐานแห้ง แสดงให้เห็นว่าใช้ระยะเวลาในการผลิตถ่านทอรรีไฟต์ค่อนข้างนาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการป้อนชีวมวลแบบต่อเนื่อง โดยมีการอุ่นเตาปฏิกรณ์ให้ถึงอุณหภูมิไว้ล่วงหน้าก่อนที่จะป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ เพื่อให้กระบวนการทอรรีแฟกชันใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งลดลง โดยมีการศึกษาที่ 1-5 นาที และอุณหภูมิที่ 260-300 องศาเซลเซียส

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1. วัตถุดิบ

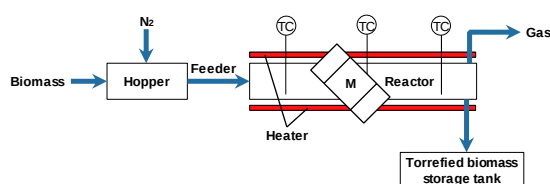
ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ใบอ้อย ซึ่งได้มาจากโรงผลิตน้ำตาลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขั้นตอนการเตรียมชีวมวลเริ่มจากนำชีวมวลมาบดย่อยและคัดแยกขนาดให้ได้อนุภาคเล็กกว่า 6.5 มิลลิเมตร นำชีวมวลไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ประกอบด้วย ความชื้น (Moisture) สารระเหย (Volatile) คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) และเถ้า (Ash) นอกจากนี้ยังนำชีวมวลมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่

ตารางที่ 1 สมบัติพื้นฐานของชีวมวลตั้งต้น

Proximate analysis (wt%)	
Moisture	4.9
Volatile	73.2
Fixed carbon	14.8
Ash	7.1
HHV (MJ/kg, ฐานแห้ง)	17.5

2.2. วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองแสดงดังรูปที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คือเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องในท่อวางแนวนอน เริ่มดำเนินการทดลองโดยการเติมชีวมวล (Biomass) 300 กรัม ใส่ในถังป้อน (Hopper) จากนั้นชีวมวลถูกปล่อยลงจากถังป้อนด้วยชุดลำเลียง (Feeder) เข้าไปยังท่อปฏิกรณ์ (Reactor) ชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์นั้นเคลื่อนที่ได้โดยการสั่นของมอเตอร์สั่นและถูกผลักไปยังถังเก็บถ่านทอร์รีไฟด์ (Torrefied biomass storage tank) ขณะที่ชีวมวลเคลื่อนที่ภายในท่อปฏิกรณ์ ก็ได้รับความร้อนจากหลอดความร้อนที่ควบคุมด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller, TC) ที่ควบคุมด้วยระบบ PID การควบคุมเวลาคงอยู่ของของแข็งสามารถทำได้โดยการปรับความถี่ของมอเตอร์สั่นที่อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในระหว่างกระบวนการไนโตรเจน (N_2) ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งถังป้อนด้วยอัตราการไหลที่ 4 ลิตรต่อนาที เพื่อนำพาไอไฟโรไลซิสออกจากท่อปฏิกรณ์ เนื่องจากการสะสมของไอไฟโรไลซิสในท่อปฏิกรณ์เป็นเวลานานอาจเกิดการควบแน่นภายในท่อปฏิกรณ์ได้ ผลิตภัณฑ์ของกระบวนการทอร์รีฟิเคชันที่ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ถ่านทอร์รีไฟด์ (Torrefied biomass) และ แก๊ส (Gas)



รูปที่ 1 แผนภาพการดำเนินการ

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ใช้ อุณหภูมิ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา คงอยู่ของของแข็งคงที่ที่ 3 นาที ส่วนที่ 2 ใช้เวลาคงอยู่ ของของแข็ง 1 3 และ 5 นาที โดยใช้อุณหภูมิคงที่ที่ 280 องศาเซลเซียส ในแต่ละการทดลองใช้อัตราป้อนชีวมวล 600 กรัมต่อชั่วโมง

2.3. การวิเคราะห์สมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์

สมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์ ได้แก่ การวิเคราะห์ แบบประมาณ การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง และการเพิ่ม ความหนาแน่นเชิงพลังงาน มีรายละเอียดการคำนวณและ วิธีการดังนี้

2.3.1. การวิเคราะห์แบบประมาณ

การวิเคราะห์แบบประมาณแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ความชื้น (Moisture content, M) วิเคราะห์ตาม มาตรฐาน ASTM E871-82 สารระเหย (Volatile matter, VM) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E872-82 เถ้า (Ash) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E1755-01 และคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon, FC) คำนวณจากความ แตกต่างดังสมการ (1)

$$FC = 100 - M - VM - Ash \quad (1)$$

จากนั้นสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงที่ ที่ได้ จากการวิเคราะห์แบบประมาณมาแปลงหน่วยเป็นฐาน แห้ง ได้เป็นสารระเหยฐานแห้ง (VM_{db}) เถ้าฐานแห้ง (Ash_{db}) และคาร์บอนคงที่ฐานแห้ง (FC_{db}) ดังสมการ (2) ถึง (4)

$$VM_{db} = \frac{VM}{100 - M} \times 100\% \quad (2)$$

$$Ash_{db} = \frac{Ash}{100 - M} \times 100\% \quad (3)$$

$$FC_{db} = \frac{FC}{100 - M} \times 100\% \quad (4)$$

2.3.2. การวิเคราะห์ค่าความค่าความร้อนสูง

การวิเคราะห์ค่าความร้อนเริ่มจากการนำ ตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาหาค่าความร้อนโดยใช้เครื่อง Oxygen bomb calorimeter รุ่น Parr 1341 ค่าที่ได้เป็นค่าความร้อนสูงฐานแห้ง

2.3.3. ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงาน

ปริมาณผลได้เชิงมวล (Mass yield, Y) และเชิงพลังงาน (Energy yield, EY) เป็นตัวแปรในการประเมินประสิทธิภาพกระบวนการผลิตของกระบวนการทอรรีแฟกชัน สามารถคำนวณได้ดังสมการ (5) และ (6)

$$Y_S = \frac{M_S}{M_B - M_{\text{water}}} \times 100\% \quad (5)$$

$$EY_S = Y_S \times \frac{HHV_S}{HHV_B} \quad (6)$$

โดยที่ $M_{\square}$ = มวลของถ่านทอรรีไฟต์, g

M_B = มวลของชีวมวลตั้งต้น, g

M_{water} = มวลของความชื้น, g

Y_S = ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ฐานแห้ง, wt%

EY_S = ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ฐานแห้ง, wt%

HHV_S = ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟต์ฐานแห้ง, MJ/kg

HHV_B = ค่าความร้อนสูงของชีวมวลตั้งต้นฐานแห้ง, MJ/kg

2.3.4. การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน

การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ (Energy densification, η) คือปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ (EY_S) ต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ (Y_S) การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์อาจเรียกว่าจำนวนเท่าตัวของการเพิ่มค่าความร้อน สามารถคำนวณได้จากค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟต์ (HHV_S) ต่อค่าความร้อนสูงของชีวมวลตั้งต้น (HHV_B) ดังสมการ (7)

$$\eta = \frac{EY_S}{Y_S} = \frac{HHV_S}{HHV_B} \quad (7)$$

3. ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการผลิตถ่านทอรรีไฟต์จากใบอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ผลผลิตจากกระบวนการ ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงาน และสมบัติของถ่านทอรรีไฟต์ มีรายละเอียดดังนี้

3.1. ผลผลิตจากกระบวนการ

เมื่อใช้ใบอ้อยที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2 เป็นวัตถุดิบในกระบวนการทอรรีแฟกชัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ถ่านทอรรีไฟต์ และแก๊ส เมื่อนำใบอ้อยมาผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชันได้ผลิตภัณฑ์คือถ่านทอรรีไฟต์ที่เป็นสีน้ำตาลเข้มถึงสีดำ ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการทำปฏิกิริยา กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงและเวลาคงอยู่ของของแข็งนานทำให้สีของผลิตภัณฑ์เข้มขึ้นแสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ส่วนแก๊สนั้นมีสีขาวและมีกลิ่นฉุน



รูปที่ 2 ใบอ้อยตั้งต้น



(ก)



(ข)



(ค)

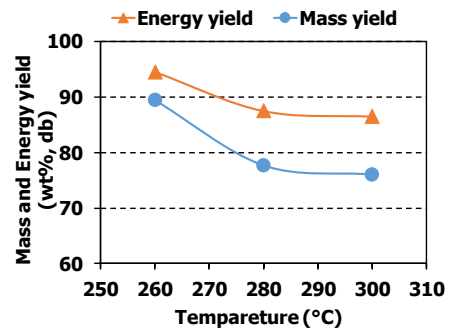
รูปที่ 3 ถ่านทอรรีไฟต์ที่อุณหภูมิ (ก) 260 (ข) 280 และ (ค) 300 องศาเซลเซียส โดยเวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่ 3 นาที



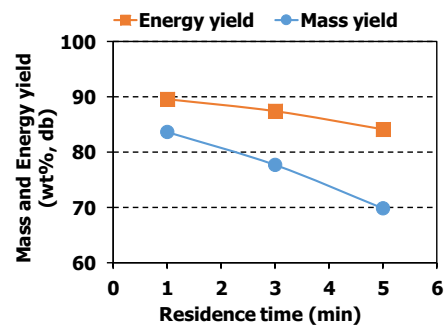
รูปที่ 4 ถ่านทอร์รีไฟด์ที่เวลาคงอยู่ของของแข็ง (ก) 1 (ข) 3 และ (ค) 5 นาที โดยอุณหภูมิคงที่ที่ 280 องศาเซลเซียส

3.2. ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงาน

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์ ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟด์ร้อยละ 70-89 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ขณะที่ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟด์ร้อยละ 84-94 ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์มีแนวโน้มลดลง การทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที ให้ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์สูงสุด ขณะที่การทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที มีปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์ต่ำสุด ทั้งในกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นที่เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่และเพิ่มเวลาคงอยู่ของของแข็งให้นานขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ N. Doassans-Carrère และคณะ 2014 [17] ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง วัสดุที่ใช้คือไม้สับ ทำการศึกษาที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่ที่ 30 นาที พบว่าให้ปริมาณผลได้เชิงมวลร้อยละ 72 64 และ 50 โดยน้ำหนัก และปริมาณผลได้เชิงพลังงานร้อยละ 89 80 และ 67 ตามลำดับ และยังได้ทำการศึกษาที่เวลาคงอยู่ของของแข็งต่างกันที่ 15 และ 30 นาที โดยใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่ที่ 300 องศาเซลเซียส พบว่าให้ปริมาณผลได้เชิงมวลร้อยละ 59 และ 51 โดยน้ำหนัก และปริมาณผลได้เชิงพลังงานร้อยละ 78 และ 69 ตามลำดับ



(ก)



(ข)

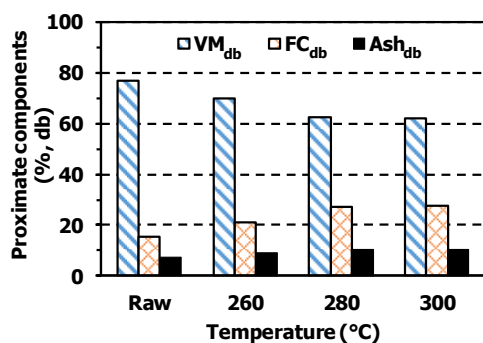
รูปที่ 5 ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์ (ก) ที่เวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที (ข) ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส

3.3. สมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์

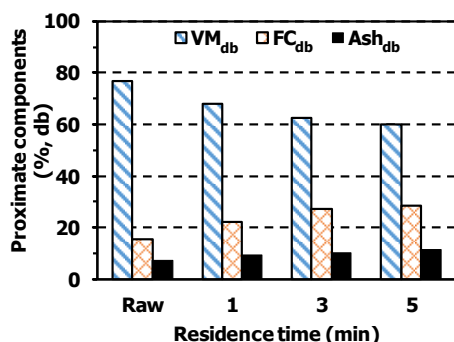
สมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ ค่าความร้อนสูง และการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน มีรายละเอียดดังนี้

การวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านทอร์รีไฟด์ประกอบด้วย สารระเหย คาร์บอนคงที่ และเถ้า แสดงดังรูปที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารระเหยของชีวมวลตั้งต้นกับถ่านทอร์รีไฟด์ เห็นได้ว่าปริมาณสารระเหยของถ่านทอร์รีไฟด์มีปริมาณลดลงทั้งในกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นที่เวลาคงอยู่ของของแข็งเดียวกัน หรือแม้กระทั่งที่เวลาคงอยู่ของของแข็งนานขึ้นแต่อุณหภูมิคงที่ สาเหตุเกิดจากเอมิเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสารระเหย เอมิเซลลูโลสเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส [18] การใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 200 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็งนานทำให้เกิดการสลายตัวของเอมิเซลลูโลสได้มากขึ้น การที่ปริมาณสารระเหยลดลงนี้ส่งผล

ให้ปริมาณคาร์บอนคงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับกระบวนการทอรีไฟกชัน ส่วนถ่านมีปริมาณเท่าเดิมแต่มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลตั้งต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของชีวมวลและถ่านทอรีไฟด์ (ก) ที่เวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที (ข) ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส

เมื่อนำถ่านทอรีไฟด์มาวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง ซึ่งเป็นสมบัติหลักที่ใช้ในการพิจารณาในการนำไปใช้ร่วมกับถ่านหินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าถ่านหิน [17] ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรีไฟด์แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 18.5-21.1 MJ/kg ทั้งในกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นที่เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่และเพิ่มเวลาคงอยู่ของของแข็งให้นานขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรีไฟด์เพิ่มขึ้น สำหรับการทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที ถ่านทอรีไฟด์ที่ได้มีค่าความร้อนสูงและปริมาณคาร์บอนคงที่สูงสุด ขณะที่การทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที ถ่านทอรี-

ไฟด์ที่ได้มีค่าความร้อนสูงและปริมาณคาร์บอนคงที่ต่ำสุด นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าความร้อนสูงของถ่านทอรีไฟด์ยังมีค่าสูงหากปริมาณคาร์บอนคงที่สูง

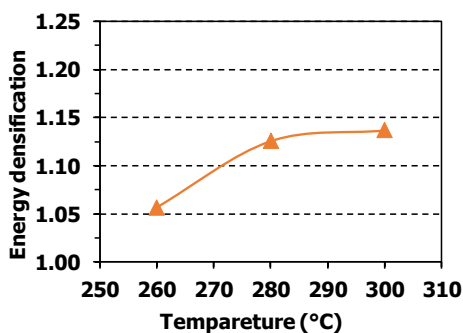
เมื่อพิจารณาค่าความร้อนสูงของถ่านทอรีไฟด์ที่ได้จากการทดลองที่มีค่าสูงที่สุดเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ A. T. Conag และคณะ 2018 [16] ซึ่งใช้ใบอ้อยด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 72 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่แนะนำสำหรับการนำไปใช้งาน ถ่านทอรีไฟด์ค่าความร้อนสูง 21.6 MJ/kg เห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงมีค่าใกล้เคียงกันกับงานวิจัยนี้แม้ว่าใช้อุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งน้อยกว่า นั้นหมายความว่า การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่องนั้นสามารถลดได้ทั้งอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งได้ หากพิจารณาที่เวลาคงอยู่ของของแข็งงานวิจัยนี้สามารถลดเวลาคงอยู่ของของแข็งได้จาก 72 เป็น 5 นาที หรือคิดเป็นประมาณ 14 เท่า

ตารางที่ 2 ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรีไฟด์

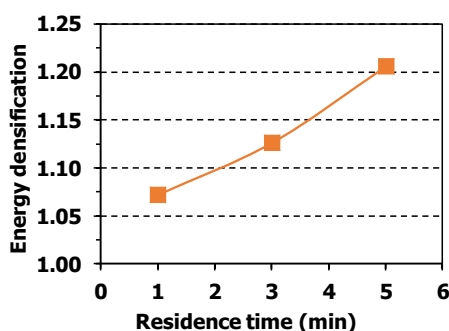
Temperature (°C)	Residence time (min)	HHV ₅ (MJ/kg, ฐานแห้ง)
260	3	18.5
280	3	19.7
300	3	19.9
280	1	18.7
280	5	21.1

ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรีไฟด์ถูกนำมาคำนวณเป็นการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรีไฟด์ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.06-1.21 รูปที่ 7 (ก) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิจาก 260 ถึง 280 องศาเซลเซียส ที่เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่ที่ 3 นาที การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรีไฟด์มีการเพิ่มขึ้นมากกว่าที่อุณหภูมิจาก 280 ถึง 300 องศาเซลเซียส นั้นหมายความว่า การใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 300 องศาเซลเซียส อาจทำให้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรีไฟด์

เพิ่มขึ้นได้ไม่มากนัก เนื่องจากสังเกตจากลักษณะของเส้นกราฟกำลังเข้าสู่สภาวะคงที่ ส่วนรูปที่ 7 (ข) แสดงให้เห็นว่าเวลาคงอยู่ของของแข็งจาก 1 ถึง 5 นาที ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 280 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หากมีการเพิ่มเวลาคงอยู่ของของแข็งให้นานขึ้น อาจส่งผลให้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์สูงขึ้นกว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่มากกว่า 300 องศาเซลเซียส หากพิจารณาแล้วทั้งในกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นที่เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่และเพิ่มเวลาคงอยู่ของของแข็งให้นานขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ส่งผลให้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนสูงและปริมาณคาร์บอนคงที่ที่เพิ่มขึ้นด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ (ก) ที่เวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที (ข) ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส

การทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที มีการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์สูงสุดที่ 1.21 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ J. S. Tumuluur และคณะ 2014 [17] ที่มีค่าเป็น 1.19 โดยใช้ไม้สับที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 30 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง อีกทั้งยังมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ D. A. Granados และคณะ 2014 [14] ที่มีค่าเป็น 1.26 โดยใช้ขานอ้อยที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 204 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ แม้กระทั่งยังมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ A. T. Conag และคณะ 2018 [16] ที่มีค่าเป็น 1.23 โดยใช้ใบอ้อยที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 82 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่องในงานวิจัยนี้ สามารถผลิตถ่านทอร์รีไฟต์ที่มีการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานเทียบเคียงกับงานวิจัยที่ใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งนาน ดังนั้นการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่องมีโอกาพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้

4. สรุป

การผลิตถ่านทอร์รีไฟต์ด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง โดยใช้ใบอ้อยเป็นวัตถุดิบ ตัวแปรหลักของกระบวนการคืออุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็ง จากการทดลองพบว่าทั้งการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งนั้น ส่งผลให้ถ่านทอร์รีไฟต์มีค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์เพิ่มขึ้นด้วยสถานะของกระบวนการที่ทำให้ได้ถ่านทอร์รีไฟต์มีค่าความร้อนสูงที่สุดที่ 21.1 MJ/kg และยังเป็นสถานะที่ทำให้ได้ค่าการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงสุดที่ 1.21 คือสถานะที่ใช้อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที ซึ่งสถานะนี้ให้ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟต์ร้อยละ 70 และปริมาณผลได้เชิง

พลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์ร้อยละ 84 โดยน้ำหนักฐานแห้ง เมื่อเปรียบเทียบการทดลองนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้ไบโอะยเป็นวัตถุดิบเหมือนกัน หากพิจารณาที่ค่าความร้อนสูงเป็นหลักพบว่างานวิจัยนี้สามารถลดเวลาคงอยู่ของของแข็งได้จาก 72 เหลือแค่ 5 นาที หรือคิดเป็นประมาณ 14 เท่า ดังนั้นการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่องมีความเป็นไปได้สำหรับนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และทุนการศึกษาจากโครงการพัฒนาศักยภาพบุคคลากร STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) เพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม ประจำปี 2559 รหัสผู้รับทุน SCA-CO-2560-3624-TH

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading," *Biomass Bioenergy*, vol. 38, pp. 68-94, March 2012.
- [2] 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, Dec. 2012.
- [3] B. N. Madanayake, S. Gan, C. Eastwick, and H. K. Ng, "Thermochemical and structural changes in *Jatropha curcas* seed cake during torrefaction for its use as coal co-firing feedstock," *Energy*, vol. 100, pp. 262-272, Feb. 2016.
- [4] M.-F. Li, C.-Z. Chen, X. Li, Y. Shen, J. Bian, and R.-C. Sun, "Torrefaction of bamboo under nitrogen atmosphere: Influence of temperature and time on the structure and properties of the solid product," *Fuel*, vol. 161, pp. 193-196, Sep. 2015.
- [5] M.-F. Li, X. Li, J. Bian, J.-K. Xu, S. Yang, and R.-C. Sun, "Influence of temperature on bamboo torrefaction under carbon dioxide atmosphere," *Ind. Crops Prod.*, vol. 76, pp. 149-157, Jul. 2015.
- [6] B. Acharya and A. Dutta, "Fuel property enhancement of lignocellulosic and nonlignocellulosic biomass through torrefaction," *Biomass Convers. Biorefinery*, journal article vol. 6, no. 2, pp. 139-149, Jun. 2016.
- [7] J. S. Tumuluru, C. T. Wright, J. R. Hess, and K. L. Kenney, "A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application," *Biofuels*, *Bioprod. Bioref.*, vol. 5, pp. 683-707, Jul. 2011.
- [8] FAO. (2018, 9 Oct.). Food and Agriculture Organization of the United Nations for a World without Hunger (FAOSTAT) [Online]. Available: www.fao.org
- [9] A. Pattiya, "Thermochemical Characterization of Agricultural Wastes from Thai Cassava Plantations," *Energy Sources*, vol. 33, no. 8, pp. 691-701, Feb. 2011.
- [10] A. T. Conag, J. E. R. Villahermosa, L. K. Cabatingan, and A. W. Go, "Energy densification of sugarcane bagasse through

- torrefaction under minimized oxidative atmosphere," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 6, pp. 5411-5419, Oct. 2017.
- [11] D. Supramono, Y. M. Devina, and D. Tristantini, Effect of Heating Rate of Torrefaction of Sugarcane Bagasse on its Physical Characteristics (2015, no. 7). *IJTech*, 2015, p. 1084.
- [12] W.-H. Chen, S.-C. Ye, and H.-K. Sheen, "Hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse via wet torrefaction in association with microwave heating," *Bioresour. Technol.*, vol. 118, pp. 195-203, May 2012.
- [13] W.-H. Chen, H.-J. Hsu, G. Kumar, W. M. Budzianowski, and H. C. Ong, "Predictions of biochar production and torrefaction performance from sugarcane bagasse using interpolation and regression analysis," *Bioresour. Technol.*, vol. 246, pp. 12-19, Aug. 2017.
- [14] D. A. Granados, R. A. Ruiz, L. Y. Vega, and F. Chejne, "Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process," *Energy*, vol. 139, pp. 818-827, Aug. 2017.
- [15] Y. Joshi, M. Di Marcello, E. Krishnamurthy, and W. de Jong, "Packed-Bed Torrefaction of Bagasse under Inert and Oxygenated Atmospheres," *Energy & Fuels*, vol. 29, no. 8, pp. 5078-5087, Aug. 2015.
- [16] A. T. Conag, J. E. R. Villahermosa, L. K. Cabatingan, and A. W. Go, "Energy densification of sugarcane leaves through torrefaction under minimized oxidative atmosphere," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 42, pp. 160-169, Dec. 2018.
- [17] N. Doassans-Carrère, S. Muller, and M. Mitzkat, "REVE — a new industrial technology for biomass torrefaction: pilot studies," *Fuel Process. Technol.*, vol. 126, pp. 155-162, May 2014.
- [18] A. Uslu, A. P. C. Faaij, and P. C. A. Bergman, "Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation," *Energy*, vol. 33, no. 8, pp. 1206-1223, Jun. 2008.