ผลกระทบของความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชันต่อคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

EFFECT OF TORREFACTION SEVERITY ON THE FUEL PROPERTIES OF TORREFIED RICE STRAW

ฐณพล เวียงทอง ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน และ ณทพร จินดาประเสริฐ*

Thanaphon Wiangthong, Padipan Tinprabath, Prasert Wirotecheewan,

and Nataporn Chindaprasert*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

*corresponding author e-mail: nataporn.c@rmutp.ac.th

(Received: 26 January 2023; Revised: 19 February 2023; Accepted: 19 February 2023)

บทคัดย่อ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีพื้นที่นาข้าวคิดเป็นร้อยละ 51 ของพื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมด การกสิกรรมนี้มีของเหลือทิ้ง คือ ฟางข้าว ประมาณปีละ 35 ล้านตัน อย่างไรก็ตาม เกษตรกรบางส่วนกำจัดฟางข้าวดังกล่าวด้วยการเผาเพื่อความสะดวกต่อการไถเตรียมดินสำหรับการเพาะปลูกพืชใหม่ในฤดูกาลเพาะปลูกต่อไป นับเป็นการเสียประโยชน์ด้านพลังงานทั้งยังสร้างมลพิษทางอากาศ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าวด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชันเพื่อผลิตเป็นพลังงาน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิความร้อน (TGA) เพื่อทดลองกับฟางข้าวปริมาณ 10 มิลลิกรัม ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และระดับความรุนแรงของทอร์รีแฟคชันที่ต่างกัน (การลดลงของน้ำหนักเริ่มต้น ร้อยละ 10 20 และ 30) ผลการทดลอง พบว่า กระบวนการทอร์รีแฟคชันสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าวได้เป็นอย่างดี ฟางข้าวที่เหมาะสมเพื่อผลิตพลังงาน คือ ฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่ระดับความรุนแรงมากที่สุด (การลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นที่ร้อยละ 30) เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและปริมาณคาร์บอนและค่าความร้อนสูงมากที่สุด และมีค่าความชื้นน้อยที่สุด

คำสำคัญ: ทอร์รีแฟคชัน ฟางข้าว ชีวมวล

Abstract

Thailand is an agricultural country with the area of rice cultivation accounting for 51% of the total agricultural area. The rice cultivation yields an agricultural waste, which is rice straw about 35 million tons per year. However, some farmers burn rice straw to facilitate plowing to prepare the soil for planting new crops in the next cultivation season. This is considered a waste of energy and creates air pollution. Therefore, in this research, the improvement of fuel properties of rice straw by torrefaction process to produce energy was investigated using a thermogravimetric analyzer (TGA). The experiment was performed with 10 mg of rice straw at 280 °C with different degrees of torrefaction severity (10, 20, and 30% mass loss). The results show that the torrefaction process can greatly improve the fuel properties of rice straw. Rice straw with the most intense torrefaction process (30% mass loss) has the highest fixed carbon, carbon content and high heating value as well as the lowest humidity content. Therefore, it is suitable to be used for further energy production.

Keywords: Torrefaction, Rice straw, Biomass

บทนำ

ปัจจุบันภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจเป็นพิเศษจากนักวิชาการและผู้กำหนดนโยบายจากทั่วโลก การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหนึ่งในสาเหตุที่สำคัญที่สุดของปัญหานี้ ซึ่งทำให้สถานการณ์ภาวะโลกร้อนรุนแรงขึ้น จากปัญหาดังกล่าวอุณหภูมิโลกคาดว่าจะเพิ่มขึ้นจาก 1 °C เป็น 6.40 °C ภายในปี ค.ศ. 2100 เป็นผลมาจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ (Pachauri, Rani & Singh, 2017) แม้จะมีความกังวลเกี่ยวกับปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมดังกล่าว แต่ความต้องการพลังงานทั่วโลกก็เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี การใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งก่อให้เกิดผลเสียต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการลดปัญหาภาวะโลกร้อน ในปี พ.ศ. 2564 การใช้พลังงานหมุนเวียนคิดเป็นร้อยละ 14 ของการใช้พลังงานทั่วโลก ชีวมวลเป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่ใช้กันมากที่สุดเพื่อทดแทนพลังงานจากฟอสซิล การใช้ชีวมวลคิดเป็นร้อยละ 70.60 ของการใช้พลังงานหมุนเวียน ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากที่สุดของการใช้พลังงานหมุนเวียนในปี พ.ศ. 2564 (World Bioenergy Association, 2021)

ชีวมวลหมายถึงสสารที่เกิดจากพืชที่มีชีวิต ซึ่งรวมถึงลำต้น กิ่งก้าน ใบ ตลอดจนของเหลือทิ้งทางการเกษตรและการแปรรูปเมล็ดพืชหรือผลไม้ (Wigley et al., 2016) ปัจจุบันมีการใช้ชีวมวลประเภทต่างๆ อาทิ ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic biomass) ขยะมูลฝอย

มูลสัตว์ และของเสียอินทรีย์ ในบรรดาชีวมวลประเภทต่างๆ นั้น ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อผลิตพลังงาน อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวลส่วนใหญ่นั้นยังด้อยกว่าถ่านหิน (Prins, Ptasinski & Janssen, 2006) ปริมาณความชื้นที่สูงในชีวมวลเป็นหนึ่งในข้อเสียที่สำคัญและทำให้เกิดผลเสียหลายประการ เช่น ปัญหาระหว่างการเตรียมชีวมวลเพื่อใช้ผลิตพลังงาน นอกจากนี้ชีวมวลยังมีค่าความร้อนและความสามารถในการบดที่ต่ำ ประสิทธิภาพการเผาไหม้น้อยเมื่อเทียบกับถ่านหิน ข้อเสียเปรียบหลักอีกประการหนึ่งของชีวมวล คือ ความหนาแน่นของพลังงานต่ำ โดยความหนาแน่นของพลังงานชีวมวลอยู่ที่ร้อยละ 10–40 ของเชื้อเพลิงฟอสซิล และมีค่าความร้อนน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของถ่านหิน (Vassilev, Vassileva & Vassilev, 2015) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวล กระบวนการทอร์รีแฟคชัน (Torrefaction process) เป็นหนึ่งในกระบวนการปรับสภาพชีวมวลก่อนใช้งานเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวล กระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยทั่วไปจะดำเนินการในช่วงอุณหภูมิ 200–300 °C ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการเผาไหม้ในระหว่างดำเนินการ หลังจากผ่านกระบวนทอร์รีแฟคชันแล้ว ชีวมวลจะมีความชื้นต่ำกว่า ความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) และค่าความร้อน (Heating value) สูงกว่า คุณสมบัติการไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ดีกว่า และมีคุณสมบัติการบด (Grindability) ได้ง่ายกว่าชีวมวลก่อนผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน (Cahyanti, Doddapaneni & Kikas, 2020; Prins, Ptasinski & Janssen, 2006) นอกจากนี้ชีวมวลที่ผ่านกระบวนทอร์รีแฟคชันแล้ว ยังมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงเทียบเท่ากับถ่านหินอีกด้วย (Cremers et al., 2015; Nunes, Matias & Catalão, 2014) ดังนั้นชีวมวลที่ผ่านกระบวนทอร์รีแฟคชันจึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการใช้เพื่อผลิตพลังงานแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เพื่อลดปัญหาภาวะโลกร้อน

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีพื้นที่การปลูกข้าวคิดเป็นพื้นที่ร้อยละ 51 ของพื้นที่ทำการเกษตรทั้งหมด อีกทั้งยังมีของเหลือทิ้งจากการปลูกข้าวคือฟางข้าวประมาณปีละ 25.45 ล้านตัน (บัณฑิต เบญจมาศ และภรณี 2556) ฟางข้าวยังจัดเป็นชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสที่สามารถนำมาผลิตพลังงานได้ คณะผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการใช้ฟางข้าวเพื่อผลิตเป็นพลังงาน และมีแนวคิดที่จะปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าวด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทอร์รีแฟคชันของฟางข้าวให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยตัวแปรที่สนใจศึกษาได้แก่ น้ำหนักที่ลดลงของฟางข้าวร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักเริ่มต้น เพื่อศึกษาผลของความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชันต่อคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าว

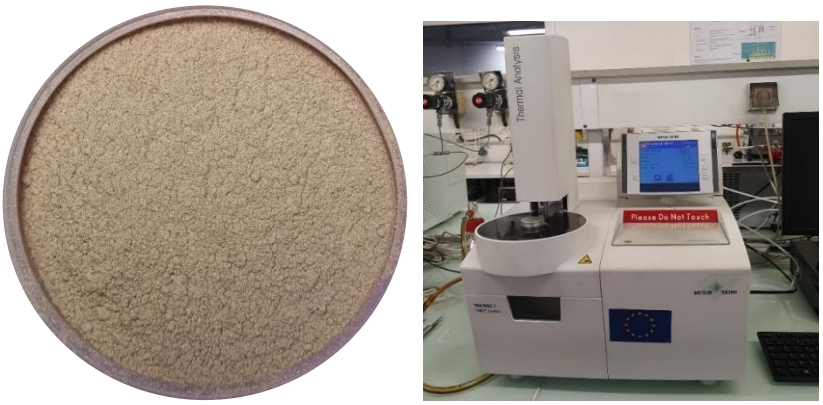
วิธีดำเนินการวิจัย

1. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ฟางข้าวถูกสับย่อยให้ได้ความยาวน้อยกว่า 2 เซนติเมตร หลังจากนั้นฟางข้าวถูกบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล รุ่น Retsch PM100 และร่อนให้ได้ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 μm ดังภาพที่ 1 และนำไปอบที่อณุหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นก่อนนำไปปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าวด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองดำเนินการโดยใช้ เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิความร้อน (Thermogravimetric Analyzer; TGA) ซึ่งเป็นเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน รุ่น TGA/DSC 1 Mettler–Toledo ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ฟางข้าวบดขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 μm และ เครื่อง TGA

3. การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทอร์รีแฟคชันคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าว

ฟางข้าวบด ปริมาณ 10 mg จะถูกนำเข้าเครื่อง TGA เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยฟางข้าวบดจะถูกให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 280 °C ด้วยอัตรา 10 °C/min และคงอุณหภูมิไว้ที่ 280 °C จนกว่าน้ำหนักของฟางข้าวบดจะลดลงร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักเริ่มต้น ระยะเวลาในการทอร์รีแฟคชัน 0 216 และ 843 วินาที ตามลำดับ โดยเริ่มนับเวลาเมื่ออุณหภูมิของฟางข้าวถึง 280 °C ในบรรยากาศที่มีก๊าซไนโตรเจนอัตราเร็ว 50 mL/min ตลอดการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้อุณหภูมิ 280 °C เนื่องจากในทางอุตสาหกรรมมักเลือกใช้อุณหภูมิสูงในกระบวนการทอร์รีแฟคชันเพื่อลดระยะเวลาของกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ซึ่ง

สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Romão & Conte (2021) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันและพบว่า ชีวมวลมีค่าความร้อนมากที่สุด หลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่ 280 °C และการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 30

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำฟางข้าวบดที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันแล้วไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) และปริมาณเถ้า (Ash content) โดยใช้มาตรฐาน ASTM Standard Test Method D7582–15 (García et al., 2013) วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) โดยมาตรฐาน XP CEN/TS 15104 standard และได้ทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำไปหาค่าเฉลี่ย และนำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าความร้อนสูง (High heating value)

ผลการวิจัย

หลังจากฟางข้าวบดผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันแล้วได้ถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ วิเคราะห์แบบแยกธาตุ และคำนวณหาค่าความร้อนสูง เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันและหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่น้ำหนักลดลงร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักเริ่มต้น ได้ผลการวิจัยดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ ดังตารางที่ 1 พบว่า ปริมาณคาร์บอนคงตัวของฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันอยู่ที่ร้อยละ 19.21 และของฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30 อยู่ที่ร้อยละ 22.52 24.50 และ 28.48 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปริมาณคาร์บอนคงตัวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 17.23 27.54 และ 48.26 ตามลำดับ เป็นที่สังเกตว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันมีปริมาณมากกว่าฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชัน และปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

ปริมาณสารระเหยของฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันอยู่ที่ร้อยละ 68.82 และของฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30 อยู่ที่ร้อยละ 63.52 60.33 และ 53.18 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว พบว่าปริมาณสารระเหยของฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันมีค่าน้อยกว่าฟางข้าวก่อนกระบวนการ

ทอร์รีแฟคชัน และยังพบอีกว่า ปริมาณสารระเหยลดลงอย่างมากตามความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

ปริมาณเถ้าของฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันมีค่าสูงกว่าฟางข้าวก่อนผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยพบว่าปริมาณเถ้าของฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันอยู่ที่ร้อยละ 11.97 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 13.96–18.34 หลังกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

จากผลค่าความชื้นเริ่มต้นของฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันและฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30 พบว่าค่าความชื้นของฟางข้าวลดลงเป็นอย่างมากหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชัน จากค่าความชื้นร้อยละ 8.77 ของฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 1.19–2.23 หลังจากผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์โดยประมาณของเชื้อเพลิงฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันและหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ	ฟางข้าวก่อนทอร์รีแฟคชัน	ฟางข้าวหลังทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30		
		10	20	30
ค่าความชื้น (%, ตามสภาพจริง)	8.77±0.06	2.23±0.09	1.78±0.08	1.19±0.07
สารระเหย (%, ความชื้นฐานแห้ง)	68.82±0.07	63.52±0.02	60.33±0.09	53.18±0.08
ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%, ความชื้นฐานแห้ง)	19.21±0.02	22.52±0.02	24.5±0.03	28.48±0.04
เถ้า (%, ความชื้นฐานแห้ง)	11.97±0.09	13.96±0.04	15.17±0.07	18.34±0.11

2. ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันและหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30 สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาพบว่า ปริมาณไนโตรเจนไม่มีความเปลี่ยนแปลงมากหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยอยู่ที่ร้อยละ 1.07–1.32 ปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงหลังจากฟางข้าวผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 7.32 และ 51.38 ตามลำดับ และหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันปริมาณไฮโดรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 4.95–6.31 และปริมาณออกซิเจนในช่วงร้อยละ 47.50–50.14

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์โดยประมาณของเชื้อเพลิงฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันและหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ฟางข้าวก่อนทอร์รีแฟคชัน	ฟางข้าวหลังทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30		
		10	20	30
ไนโตรเจน (%)	1.07±0.02	1.07±0.03	1.32±0.03	1.32±0.04
คาร์บอน (%)	40.23±0.11	42.48±0.09	44.45±0.12	46.23±0.11
ไฮโดรเจน (%)	7.32±0.03	6.31±0.02	5.80±0.07	4.95±0.07
ออกซิเจน (%)	51.38±0.10	50.14±0.10	48.43±0.12	47.50±0.14
*ส่วนที่เหลือโดยผลต่าง				

3. การคำนวณหาค่าความร้อนสูง

ค่าความร้อนสูง คือปริมาณพลังงานที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของตัวอย่างรวมถึงการควบแน่นของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ เนื่องจากปริมาณฟางข้าวที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณน้อย ค่าความร้อนสูงของฟางข้าวก่อนและหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันจึงได้จากการคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนสูง (Nhuchhen & Afzal ,2017)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนสูง เพื่อทำนายค่าความร้อนสูงของชีวมวลหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ดังสมการที่ 1

$$HHV = 32.7934 + 0.0053C^2 - 0.5321C - 2.8769H + 0.0608CH - 0.2401N \quad (1)$$

เมื่อ HHV หมายถึง ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)

C หมายถึง ปริมาณคาร์บอน (ร้อยละ)

H หมายถึง ปริมาณไฮโดรเจน (ร้อยละ)

N หมายถึง ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละ)

จากตารางที่ 3 ซึ่งแสดงค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันและฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชัน พบว่า ค่าความร้อนสูงของฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันอยู่ที่ 16.55 MJ/kg และค่าความร้อนสูงของฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30 อยู่ที่ 17.64 18.29 และ 18.88 ตามลำดับ โดยเมื่อเทียบกับค่าความร้อนสูงก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 6.59 10.51 และ 14.08 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันและฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30

คำนวณค่าความร้อน (คำนวณ)	ฟางข้าวก่อนทอร์รีแฟคชัน	ฟางข้าวหลังทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30		
		10	20	30
ค่าความร้อนสูง (MJ/kg, ความชื้นฐานแห้ง)	16.55	17.64	18.29	18.88

อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าวด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทอร์รีแฟคชันของฟางข้าวให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด พบว่า หลังจากฟางข้าวบดผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันแล้วคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน อาทิ ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณคาร์บอน และค่าความร้อนสูง เป็นที่น่าสังเกตอีกว่าการเพิ่มระดับความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชันส่งผลให้คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าว ดังที่กล่าวข้างต้น เพิ่มขึ้นอีกด้วย

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ พบว่า ปริมาณคาร์บอนคงตัวของฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชัน อีกทั้งยังพบว่า แนวโน้มของปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มีค่ามากที่สุดคือฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่น้ำหนักลดลงร้อยละ 30 อยู่ที่ร้อยละ 28.48 ค่านี้อยู่ในช่วงปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านหินซึ่งอยู่ที่ร้อยละ 17.90–70.70 (Vassilev et al., 2015) ซึ่งยืนยันได้ว่ากระบวนการทอร์รีแฟคชันสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าวได้ใกล้เคียงกับถ่านหิน

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสารระเหยของฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันมีค่าน้อยกว่าฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชัน และยังพบอีกว่าปริมาณสารระเหยลดลงอย่างมากตามความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ในระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟคชัน การเพิ่มความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชันส่งผลให้สารระเหยออกจากชีวมวลมากขึ้น (Wang et al., 2012) สารระเหยประกอบด้วยก๊าซที่ติดไฟได้ เช่น ไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซที่ไม่ติดไฟ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ($1SO_2$) ไนตริกออกไซด์ (NO) (Ilham, 2022) การลดลงของสารระเหยเกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และการสลายตัวของเซลลูโลส (Cellulose) บางส่วน (Chen

et al., 2021) การลดลงของสารระเหยส่งผลให้กลุ่มคาร์บอกซิลิกทำให้มีจำนวนคาร์บอนเพิ่มขึ้น และค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น

ปริมาณเถ้าของฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันมีค่าสูงกว่าฟางข้าวก่อนผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน เถ้าเป็นสารตกค้างอนินทรีย์หลังการเผาไหม้ เถ้าของชีวมวลมีความเป็นด่างตามธรรมชาติ ชีวมวลประเภทไม้โดยทั่วไปมีปริมาณเถ้าน้อย แต่ชีวมวลบางชนิดอาจมีเถ้ามากถึงร้อยละ 20 (Caillat & Vakkilainen, 2013) ข้อเสียเปรียบหลักข้อหนึ่งของการใช้ฟางข้าวเพื่อการเผาไหม้คือปริมาณเถ้าสูง ซึ่งอยู่ระหว่างร้อยละ 9–22 (Chaloupková et al., 2021) และปริมาณเถ้าที่สูงอาจนำไปสู่ปัญหาหลายอย่าง เช่น ค่าความร้อนต่ำ และการสะสมของเถ้าระหว่างการเผาไหม้อาจทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์เพิ่มมากขึ้น (García et al., 2012)

จากผลค่าความชื้นของฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันและฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30 พบว่า ค่าความชื้นของฟางข้าวลดลงเป็นอย่างมากหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชัน เนื่องจากระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟคชันปริมาณหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ลดลงเป็นอย่างมาก ส่งผลให้เกิดสารประกอบที่ไม่ชอบน้ำ ไม่มีขั้ว และไม่อิ่มตัว ทำให้ความชื้นของฟางข้าวลดลงหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชัน (Boudot, Elettro & Grosso, 2016; Granados et al., 2017)

เมื่อเทียบระหว่างฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันและฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชัน พบว่า ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลง ในทางตรงข้ามปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น และแนวโน้มดังกล่าวเพิ่มขึ้นเมื่อความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชันเพิ่มขึ้น การค้นพบนี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของนักวิจัยหลายคณะ (Campbell, Coller & Evitts, 2019; Cruz Ceballos, Hawboldt & Hellleur, 2015; Rousset et al., 2011; Sabil et al., 2013)

ในระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ออกซิเจนและไฮโดรเจนบางส่วนถูกกำจัดออกจากชีวมวลในรูปของ (1) น้ำจากการคายน้ำ (2) ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาอินทรีย์ เช่น กรดน้ำส้ม (CH_3COOH) ฟิวแรน (Furan) เมทานอล (CH_3OH) และ (3) ผลิตภัณฑ์ก๊าซ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ (Bergman & Kiel, 2005) Wang et al. (2013) รายงานว่าปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันลดลงเนื่องจากการสูญเสียปริมาณสารระเหย ซึ่งประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรเจนและออกซิเจน เช่น น้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์

ค่าความร้อนสูงของฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันและฟางข้าวหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30 พบว่า ค่าความร้อนสูงของฟางข้าวเพิ่มขึ้นหลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อระดับความรุนแรงของทอร์รีแฟคชันสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูง เป็นผลมาจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมักจะสลายตัวและเกิดการคาร์บอไนเซชัน (Carbonization) ภายใต้อุณหภูมิน้อยกว่า 250 °C

(Wang et al., 2013) Bridgeman et al., (2008) ได้ศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันของหญ้าคานารี ฟางข้าวสาลี และวิลโลว์ ที่อุณหภูมิ 290 ℃ เป็นเวลา 30 นาที และพบว่า ค่าความร้อนสูง ดังตารางที่ 4 ของตัวอย่างทั้งหมดเพิ่มขึ้นหลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวหลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่การลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 30 พบว่าค่าความร้อนสูงของฟางข้าวมีค่าน้อยกว่าหญ้าคานารี ฟางข้าวสาลี และวิลโลว์ เนื่องจากอุณหภูมิของกระบวนการทอร์แฟคชันของฟางข้าวต่ำกว่า อีกทั้งระยะเวลาในการทอร์รีแฟคชันยังน้อยกว่าอีกด้วย อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า ถึงแม้ค่าความร้อนสูงของฟางข้าวจะต่ำที่สุด แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนของฟางข้าวมีค่ามากกว่าหญ้าคานารี และวิลโลว์ โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนร้อยละ 14.08 11.79 และ 9.50 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนสูงของฟางข้าวกับงานวิจัยฉบับอื่น ดังตารางที่ 4 พบว่าก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันฟางข้าวมีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 14.77–16.55 หลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันค่าความร้อนสูงของฟางข้าวเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 17.90–19.25 อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูงหลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันของงานวิจัยฉบับนี้มีค่าน้อยที่สุด อยู่ที่ร้อยละ 14.08 ส่วนงานวิจัยฉบับอื่นอยู่ในช่วงร้อยละ 19.25–26.88 อาจส่งผลมาจากระยะเวลาของกระบวนการทอร์รีแฟคชันของงานวิจัยฉบับนี้ที่น้อยเมื่อเทียบกับงานวิจัยฉบับอื่น

จากผลการศึกษาพบว่ากระบวนการทอร์รีแฟคชันสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าวได้เป็นอย่างดี และยังพบว่าที่ 280 ℃ เชื้อเพลิงฟางข้าวที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณคาร์บอนและค่าความร้อนสูงมากที่สุด อีกทั้งยังมีค่าความชื้นน้อยที่สุด คือเชื้อเพลิงฟางข้าวที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 30 หลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ปัจจุบันมีการใช้เชื้อเพลิงประเภทชีวมวลอัดเม็ดกันอย่างแพร่หลาย และผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำไปปรับใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงฟางข้าวอัดเม็ดได้ โดยการนำเชื้อเพลิงฟางข้าวมาปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชันก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการอัดเม็ดต่อไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงฟางข้าวอัดเม็ด

อย่างไรก็ตามควรทำการศึกษาหรือวิเคราะห์ตัวอย่างเพิ่มเติม เช่น การวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ก่อนและหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชัน และเพิ่มปริมาณของตัวอย่างในการศึกษาเพื่อสังเกตุคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงหากทำการทอร์รีแฟคชันในปริมาณมาก รวมถึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

ตารางที่ 4 ค่าความร้อนสูงของชีวมวลชนิดต่างๆ ก่อนและหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

	ค่าความร้อนสูงก่อนผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน (MJ/Kg)	กระบวนการทอร์รีแฟคชัน					ที่มา
		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	การลดลงของน้ำหนักเริ่มต้น (ร้อยละ)	ค่าความร้อนสูงหลังผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน (MJ/Kg)	อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อน (ร้อยละ)	
ฟางข้าว	15.01	200	40	17.06	17.90	19.25	เจนจิรา (2561)
ฟางข้าว	14.77	280	180	ไม่ระบุ	18.74	26.88	สุวัฒน์ (2561)
ฟางข้าว	16.14	300	30	29.15	19.25	19.27	Zhang et al. (2022)
ฟางข้าว	16.55	280	14	30.00	18.88	14.08	งานวิจัยฉบับนี้
หญ้าคานารี	19.50	290	30	38.50	21.80	11.79	Bridgeman et al. (2008)
ฟางข้าวสาลี	18.90	290	30	44.90	22.60	19.58	Bridgeman et al. (2008)
วิลโลว์	20.00	290	30	28.00	21.90	9.50	Bridgeman et al. (2008)

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันของฟางข้าวที่มีการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นร้อยละ 10 20 และ 30 เพื่อเปรียบเทียบระหว่างฟางข้าวก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชันและหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่ระดับความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชันต่างกัน พบว่ากระบวนการทอร์รีแฟคชันสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของฟางข้าวได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณคาร์บอน ค่าความร้อนสูง ตลอดจนค่าความชื้นของฟางข้าวที่ลดลง และแนวโน้วดังกล่าวได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มระดับความรุนแรงของกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยเชื้อเพลิงฟางข้าวที่เหมาะสมเพื่อผลิตพลังงาน คือ ฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันที่ระดับความรุนแรงมากที่สุด (การลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นที่ร้อยละ 30) เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณคาร์บอนและค่าความร้อนสูงมากที่สุด และมีค่าความชื้นน้อยที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และขอขอบคุณ CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) สาธารณรัฐฝรั่งเศส ที่สนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

เจนจิรา อุตเรือน. (2561). **การเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชัน.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยแม่โจ้, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน.

บัณฑิต เกิดมงคล, เบญจมาศ อยู่ประเสริฐ, และภรณี ต่างวิวัฒน์. (2556). การไถกลบฟางและตอซังข้าวของเกษตรกร ตำบลตะคุ อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา. ใน **การประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 10** (น. 2894–2902). นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุวัฒน์ เณรโต. (2561). **การเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการทอร์รีแฟคชัน.** (วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศิลปากร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล.

World Bioenergy Association, W.B. (2021). **Global bioenergy statistics 2021**, Retrieved February, 10, 2023, from https://www.worldbioenergy.org/uploads/211214%20WBA%20GBS%202021.pdf.

Bergman, P.C.A., & Kiel, J.H.A. (2005). Torrefaction for biomass upgrading. **Proc. 14th European Biomass Conference**, Paris, France, (October), 17–21.

Boudot, M., Elettro, H., & Grosso, D. (2016). Converting water adsorption and capillary condensation in usable forces with simple porous inorganic thin films. **ACS Nano, 10**(11), 10031–10040.

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.

Cahyanti, M.N., Doddapaneni, T.R.K.C., & Kikas, T. (2020). Biomass torrefaction: An overview on process parameters, economic and environmental aspects and recent advancements. **Bioresource Technology, 301**, 122737.

Caillat, S., & Vakkilainen, E. (2013). **Biomass Combustion Science, Technology and Engineering**. Cambridge: Woodhead Publishing.

Campbell, W.A., Coller, A., & Evitts, R.W. (2019). Comparing severity of continuous torrefaction for five biomass with a wide range of bulk density and particle size. **Renewable Energy, 141**, 964–972.

Chaloupková, V., Ivanova, T., Hutla, P., & Špunarová, M. (2021). Ash melting behavior of rice straw and calcium additives. **Agriculture (Switzerland), 11**(12), 1–12.

Chen, W.H., Lin, B.J., Lin, Y.Y., Chu, Y.S., Ubando, A.T., Show, P.L., & Pétrissans, M. (2021). Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. **Progress in Energy and Combustion Science, 82**, 100887.

Cremers, M., Koppejan, J., Sokhansanj, S., Melin, S., & Madrali, S. (2015). **Status overview of torrefaction technologies**, Retrieved February, 10, 2023, from https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2015/11/IEA_Bioenergy_T32_Torrefaction_update_2015b.pdf.

Cruz Ceballos, D.C., Hawboldt, K., & Hellleur, R. (2015). Effect of production conditions on self-heating propensity of torrefied sawmill residues. **Fuel, 160**, 227–237.

García, R., Pizarro, C., Lavín, A.G., & Bueno, J.L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology, 103**(1), 249–258.

García, R., Pizarro, C., Lavín, A.G., & Bueno, J.L. (2013). Biomass proximate analysis using thermogravimetry. **Bioresource Technology, 139**, 1–4.

Granados, D.A., Ruiz, R.A., Vega, L.Y., & Chejne, F. (2017). Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. **Energy, 139**, 818–827.

Ilham, Z. (2022). Biomass classification and characterization for conversion to biofuels. **Value-Chain of Biofuels**, 69–87.

Romão, E.L., & Conte, R.A., (2021). Energy gains of eucalyptus by torrefaction process. **Maderas: Ciencia y Tecnología, 23**(3), 1–6.

Nhuchhen, D.R., & Afzal, M.T. (2017). HHV predicting correlations for torrefied biomass using proximate and ultimate analyses. **Bioengineering, 4**(1), 7.

Nunes, L.J.R., Matias, J.C.O., & Catalão, J.P.S. (2014). Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. **Applied Energy, 127**, 135–140.

Pachauri, N., Rani, A., & Singh, V. (2017). Bioreactor temperature control using modified fractional order IMC–PID for ethanol production. **Chemical Engineering Research and Design, 122**, 97–112.

Prins, M.J., Ptasinski, K.J., & Janssen, F.J.J.G. (2006). Torrefaction of wood. Part 2. Analysis of products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 77**(1), 35–40.

Rousset, P., Aguiar, C., Labbé, N., & Commandré, J.M. (2011). Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. **Bioresource Technology, 102**(17), 8225–8231.

Sabil, K.M., Aziz, M.A., Lal, B., & Uemura, Y. (2013). Synthetic indicator on the severity of torrefaction of oil palm biomass residues through mass loss measurement. **Applied Energy, 111**, 821–826.

Vassilev, S.V., Vassileva, C.G., & Vassilev, V.S. (2015). Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. **Fuel, 158**, 330–350.

Wang, C., Peng, J., Li, H., Bi, X.T., Legros, R., Lim, C.J., & Sokhansanj, S. (2013). Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets. **Bioresource Technology, 127**, 318–325.

Wang, M.J., Huang, Y.F., Chiueh, P.T., Kuan, W.H., & Lo, S.L. (2012). Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues. **Energy, 37**(1), 177–184.

Wigley, T., Yip, A.C.K., & Pang, S. (2016). Pretreating biomass via demineralisation and torrefaction to improve the quality of crude pyrolysis oil. **Energy, 109**, 481–494.

Zhang, C., Yang, W., Chen, W.H., Ho, S.H., Pétrissans, A., & Pétrissans, M. (2022). Effect of torrefaction on the structure and reactivity of rice straw as well as life cycle assessment of torrefaction process. **Energy, 240,** 122470.