FEAT JOURNAL
FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL
วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การปรับปรุงสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของชานอ้อย ใบอ้อย และเศษไม้ยูคาลิปตัส ด้วยกระบวนการทอริแฟกชั่นขั้นต้น

Upgrading fuel property of Bagasse, Cane leaves, and Eucalyptus-wood Residues via torrefaction Pretreatment

ณรงค์ฤทธิ์ สายลุน[1] และ วรินรำไพ เศรษฐ์ธณบุตร[2*]

Narongrit Sailoon[1] and Varinrumpai Seithtanabutara[2*]

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

[2]ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

Received: 12 December 2019

Revised: 24 June 2020

Accepted: 17 July 2020

Available online: 7 December 2020

บทคัดย่อ

กระบวนการทอริแฟกชั่นชีวมวลได้ถูกออกแบบการทดลองและมีการวิเคราะห์ทางสถิติร่วมกับการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพื้นผิว ตัวแปรอิสระ ได้แก่ อุณหภูมิ (250-300 องศาเซลเซียส) และเวลา (30-60 นาที) ตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ค่าความร้อน ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเชื้อเพลิง และร้อยละผลได้พลังงาน จากการศึกษาพบว่า ชีวมวลทอร์ริไฟด์จะมีค่าความร้อนสูงขึ้น ค่าร้อยละการสูญเสียโดยน้ำหนักของชีวมวลเพิ่มขึ้น และค่าร้อยละผลได้ของพลังงานจากกระบวนการจะลดลงตามสภาวะความรุนแรงของกระบวนการ ทั้งนี้ชีวมวลทอร์ริไฟด์จะมีสัดส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอน ที่ต่ำกว่าชีวมวลดิบ และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่มากขึ้น มีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น จากผลการวิเคราะห์ค่าการแปรปรวนทางสถิติและการตอบสนองเชิงพื้นผิว จะทำให้ได้สภาวะการทอร์ริแฟคชั่นที่เหมาะสมสำหรับชีวมวลชานอ้อย กากใบอ้อย และ เศษไม้ยูคาลิปตัส โดยชีวมวลทอร์ริไฟด์ที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสมนี้จะถูกนำมาอัดเม็ดโดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ จะได้ชีวมวลทอร์ริไฟด์อัดเม็ดที่มีสมบัติตรงกับเกรดมาตรฐาน

โดยทั่วไปของประเทศไทย มีสัดส่วนมิติความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 3.22 ถึง 3.88 ความหนาแน่น มีค่า 0.34 ถึง 0.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่า 8,927.10 ถึง 25,071.74 เมกกะจูลต่อลูกบากศ์เมตร มีค่าความแข็งแรง 41.20 ถึง 73.03 นิวตัน คุณสมบัติการเผาไหม้ของเม็ดเชื้อเพลิงใบอ้อยมีประสิทธิภาพสูงสุดรองลงมาคือ ชานอ้อยและเศษไม้ยูคาลิปตัส

คำสำคัญ: ชีวมวล ทอริเฟกชั่น ชานอ้อย ใบอ้อย เศษไม้ยูคาลิปตัส

Abstract

The biomass torrefaction process was experimental designed and statistically analyzed with response surface methodology. There were two independent factors; temperature (250-300ºC) and time (30-60 min) , and three response variables; heating value, weight loss percentage and energy yield. Results showed that torrefied biomass has higher heating value, weight loss of biomass during torrefaction increased and energy yield decreased according to the severity factor of the torrefaction process. Torrefied biomass had the lower molar ratio of H/C and O/C and had more thermal stability with improved fuel properties than of the raw biomass. Proposed equations based on the anova analysis and response surface methodology were estimated for the optimum condition of each biomass torrefaction; bagasse, cane leaves and eucalyptus wood residue. Torrefied biomass producing at the optimum condition was palletized using gluten as a binder at 5% wt. of biomass. The produced torrefied pellet met the general standard of THIALAND; the L/D dimension, the pellet density, the energy density, and the strength was about 3.22 to 3.88, 0.34 to 0.27 g/cm^3, 8,927.10 to 25,071.74 MJ/m^3, and 41.20 to 73.03 N respectively. Cane leaves-torrefied pellet to have the highest combustion efficiency than bagasse torrefied-pellet and eucalyptus torrefied-pellet.

Keywords: Biomass: Torrefaction: Palletization: Bagasse: Cane leaves: Eucalyptus

---

*ติดต่อ: tmallika@kku.ac.th, 086-459-9202

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานส่วนใหญ่ที่นำมาใช้คือพลังงานปิโตรเลียมซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป และมีอัตราการใช้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่องตามจำนวนประชากรโลกที่มากขึ้น ดังนั้นพลังงานทางเลือกจึงได้รับความสนใจในทุกภาคส่วน เนื่องจากประเทศไทยมีปริมานกากเกษตรกรรมอยู่เป็นจำนวนมากในแต่ละปี ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานชีวมวลที่มีศักยภาพและถูกนำมาแปลงเป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งกากเกษตรกรรมชีวมวลส่วนใหญ่จะมีความหนาแน่นรวม

ต่ำ (Low Bulk Density) ความหนาแน่นเชิงพลังงานต่ำ (Low Energy Density) และ มีความชื้นสูง (Moisture content) ส่งผลให้มีศักยภาพความเป็นเชื้อเพลิงที่ต่ำ อีกทั้งยังเกิดความยุ่งยากในการจัดเก็บและการขนส่ง [1-3] ดังนั้นกากเกษตรกรรมชีวมวลจึงถูกนำไปใช้ในรูปของเชื้อเพลิงแข็ง (Biofuel Solid) เช่น เชื้อเพลิงอัดแท่ง (Briquette) หรือ เชื้อเพลิงตะเกียบ (Pellet) โดยวัตถุดิบชีวมวลจะผ่านกระบวนการเพิ่มความหนาแน่น (Densification Process) ที่มีการเตรียมขั้นต้น (pretreatment) เพื่อให้ชีวมวลมีคุณลักษณะที่เหมาะสม แล้วจึงนำไปอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงแข็งดังกล่าว

ได้มีการนำเทคโนโลยีทอริแฟคชั่น (Torrefaction Technology) มาใช้เป็นกระบวนการขั้นต้นร่วมกับกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นชีวมวล [4-6] เพื่อเพิ่มศักยภาพความเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวล ซึ่งจะเรียกโดยรวมว่า กระบวนการ TOP (Torrefaction and Pelletization) [1] โดยผลผลิตเชื้อเพลิงที่ได้ถูกเรียกว่าชีวมวลอัดเม็ด TOP จะมีสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทั่วไป กระบวนการทอริแฟคชั่นชีวมวลมักจะกระทำในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-60 นาที เพื่อให้ได้ชีวมวลทอริไฟด์ที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเชื้อเพลิงตะเกียบ ซึ่งพบว่าเชื้อเพลิงตะเกียบทอริไฟด์ที่ผลิตได้จะมีความชื้นลดลง มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงขึ้น มีความหนาแน่นพลังงานและความหนาแน่นหลวมสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม สมบัติชีวมวลทอร์ริไฟด์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและปัจจัยด้านกระบวนการ เช่น ขนาด ความชื้น ค่าความร้อน สภาวะการทอร์ริแฟคชั่น เป็นต้น ซึ่งต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าทั้งทางด้านการลงทุนและกระบวนการผลิต ดังนั้น เงื่อนไขกระบวนการจึงมีความสำคัญ หลักการทางสถิติจึงเริ่มถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์หาผลการตอบสนองที่น่าพึงพอใจ

การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอร์ริแฟคชันชีวมวลแต่ละชนิด ด้วยการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ (Statistically method) เพื่อให้ได้ความคุ้มค่าทั้งคุณภาพและปริมาณของผลผลิตชีวมวลทอร์ริไฟด์ โดยเชื้อเพลิงทอร์ริไฟด์ที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสมจะถูกนำมาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชื้อเพลิง

2. วิธีการทดลอง

2.1 การออกแบบการทอร์ริแฟกชันชีวมวลในระดับห้องทดลอง

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลองแบบ CCD

Run	Variable		Coded		SF
	X_1 (min)	X_2 (°C)	X_1	X_2	
1	30	250	-1	-1	5.89
2	45	250	-1	0	6.07
3	60	250	-1	1	6.19
4	30	275	0	-1	6.63
5	45	275	0	0	6.81
6	45	275	0	0	6.81
7	45	275	0	0	6.81
8	45	275	0	0	6.81
9	45	275	0	0	6.81
10	60	275	0	1	6.93
11	30	300	1	-1	7.37
12	45	300	1	0	7.54
13	60	300	1	1	7.67

$$\text{Weight loss (\%)} = \left[\frac{M_U - M_T}{M_U}\right] X100 \quad (1)$$

$$\text{Energy yield (\%)} = \left[\left(\frac{M_T}{M_I}\right) \times \left(\frac{E_T}{E_I}\right)\right] \quad (2)$$

$$SF = \log\{t \times \exp[\frac{(T_H - T_R)}{14.75}]\} \quad (3)$$

ชีวมวลแต่ละชนิด ได้แก่ ชานอ้อย กากใบอ้อย และ เศษไม้ยูคาลิปตัส ถูกนำไปอบไล่ความชื้นที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วผ่านการบดลดขนาดด้วยเครื่องบดหยาบให้มีขนาดความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร ก่อนนำไปทำการทอร์ริแฟคชั่นในเตาระดับห้องทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบ CCD ด้วยโปรแกรมสถิติ Minitab (เวอร์ชั่น 16) มี 2 ปัจจัย 2 ระดับ คือ อุณหภูมิ (Temperature, X_1) ที่ 240-320 องศาเซลเซียส และเวลา (Time, X_2) 20-60 นาที โดยใช้ α=1 มีตัวแปรตอบสนอง 3 ตัว คือ ค่าความร้อน (Heating value, Y_1) ร้อยละน้ำหนักที่หายไป (weight loss%, Y_2) และ ร้อยละผลได้พลังงาน (Energy yield%, Y_3) ทั้งนี้จะมีการคำนวณค่า ตัวแปรความรุนแรง (Severity factor, SF) เพื่อใช้ประเมินผลร่วมกับเวลาและอุณหภูมิ ดังสมการที่ (1)-(3) เมื่อ t คือ เวลา (นาที) T_H คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) T_R คือ อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 100 (องศาเซลเซียส) M_U คือ น้ำหนักสารก่อนปรับปรุง (กรัม) M_T คือ น้ำหนักสารหลังการทอร์ริไฟด์ (กรัม) M_I คือ น้ำหนักสารเริ่มต้น (กรัม) E_T คือ ค่าความจุความร้อนหลังการทอร์ริไฟด์ (MJ/kg) และ E_I คือ ค่าความจุความร้อนเริ่มต้น (MJ/kg) ดังนั้นจากการออกแบบการทดลองตามข้างต้นจะได้ทั้งหมด 13 การทดลอง ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

2.2 การทอร์ริแฟคชันชีวมวล

นำชีวมวลที่เตรียมเบื้องต้น (ดังที่ระบุในหัวข้อ 2.1) มาบรรจุในท่อปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความยาว 45 เซนติเมตร แล้วนำไปใส่เตาที่ติดตั้งระบบให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า การทอร์ริแฟคชั่นตามสภาวะที่ออกแบบไว้ จะถูกดำเนินภายใต้สภาวะที่มีอัตราการไหลของไนโตรเจนคงที่เป็น 800 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์และร้อยละของน้ำหนักที่หายไป วิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อน เพื่อใช้ในการคำนวณและหาร้อยละผลได้พลังงาน (Energy yield) จากนั้นจะทำการวิเคราะห์พื้นผิวการตอบสนองของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีการทางสถิติ เพื่อหาสมการจำลองการทำนายค่าพลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ (Y_1) สมการจำลองการทำนายร้อยละน้ำหนักที่หายไป (Y_2) และ สมการจำลองการทำนายร้อยละผลได้พลังงานของผลิตภัณฑ์เทียบกับวัตถุดิบ (Y_3) จากนั้นจะใช้เทคนิควิธีการตอบสนองเชิงพื้นผิวนี้ (Response surface methodology, RSM) ในการประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทอร์ริแฟคชั่นชีวมวลแต่ละชนิด (ชานอ้อย กากใบอ้อย และ เศษไม้ยูคาลิปตัส) เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้พลังงานสูงสุด (Maximum energy yield) เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วจึงนำไปสู่กระบวนการต่อไป

2.3 สมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดชีวมวลทอร์ริไฟล์

นำชีวมวลแต่ละชนิดที่ผ่านการทอร์ริแฟคชันที่สภาวะที่เหมาะสม นำมาลดขนาดด้วยเครื่องบอลล์มิลล์ (ball mill) แล้วคัดขนาดอนุภาคให้มีขนาด 10 เมช ด้วยเครื่องร่อนตะแกรง (sieving machine) หลังจากนั้นจะถูกนำมาอัดเม็ดโดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เครื่องอัดเม็ดแบบลูกกลิ้ง (pelletizer) ที่มีแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 0.6 เซนติเมตร ความยาว 2.5 เซนติเมตร เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์ริไฟด์นำมาทดสอบสมบัติกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงได้แก่ ทางมิติ (สัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง, L/D) หาความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (pellet density) และความแข็งแรง (Strength) โดยจะใช้เครื่องมือ Universal testing machine (UTM) ในการทดสอบส่วนการวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ (Moisture Uptake) ของตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทอริแฟกชั่น จะดำเนินการโดยนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้น หลังจากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลาหนึ่งนาที แล้วชั่งนำหนักของตัวอย่างหลังแช่น้ำ เพื่อนำไปคำนวณเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นของน้ำหนัก และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ (Combustion) โดยนำน้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตรมาทำการต้มโดยใช้ตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงจำนวน 10 กรัม วัดอุณหภูมิของน้ำหลังจากนั้นวัดปริมาณน้ำที่เหลือ [2]

2.4 การวิเคราะห์

ตัวอย่างชีวมวลดิบที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น และตัวอย่างชีวมวลหลังจากการทอร์ริแฟคชันดังเงื่อนไขการทดลองที่ออกแบบไว้ในตารางที่ 1 จะถูกนำมาตรวจสอบหาค่าความจุความร้อน (heating value) โดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter และการสลายตัวทางความร้อน (Thermal Gravimetric Analysis) โดยใช้อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดที่ 700 องศาเซลเซียส และใช้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เพื่อนำผลการทดสอบมาคำนวณหาค่าปริมาณความชื้น (%MC) ปริมาณสารระเหยง่าย (%VM) ปริมาณเถ้า (%AC) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%FC) และปริมาณธาตุองค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และ ไนโตรเจน ถูกตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHNO Analyzer)

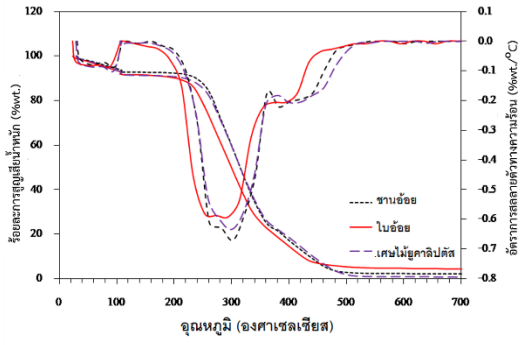
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทอริแฟกชั่น

จากการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมสถิติ MINITAB 16 จะได้การทดลองออกมาทั้งหมด 13 การทดลองซึ่งแต่ละการทดลองจะมีค่าความรุนแรงของสภาวะ (SF) ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตาม SF ที่สูงขึ้นเนื่องจากมีการปล่อยสารระเหยที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังนั้น ค่าความร้อนของชีวมวลก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ร้อยละผลได้ของพลังงานก็เปลี่ยนไปตามค่าความร้อนและค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของชีวมวลทอร์ริไฟด์ ซึ่งค่าความร้อนของชีวมวลชานอ้อยทอร์ริไฟด์จะอยู่ระหว่าง 19.29-40.90

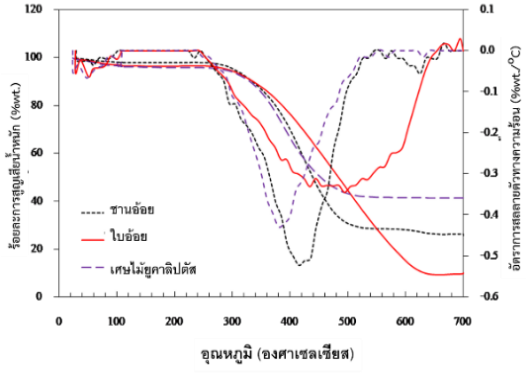
เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความร้อนสูงสุดจะอยู่ที่การทอริแฟกชั่นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลา 60 นาที ชีวมวลใบอ้อยทอร์ริไฟด์อยู่ระหว่าง 50.20-95.73 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าความร้อนสูงสุดจะอยู่ที่การทอริแฟกชั่นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลา 60 นาที ชีวมวลเศษไม้ยูคาลิปตัสทอร์ริไฟด์อยู่ระหว่าง 9.79-60.95 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าความร้อนสูงสุดจะอยู่ที่การทอริแฟกชั่นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลา 60 นาที

3.2 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน

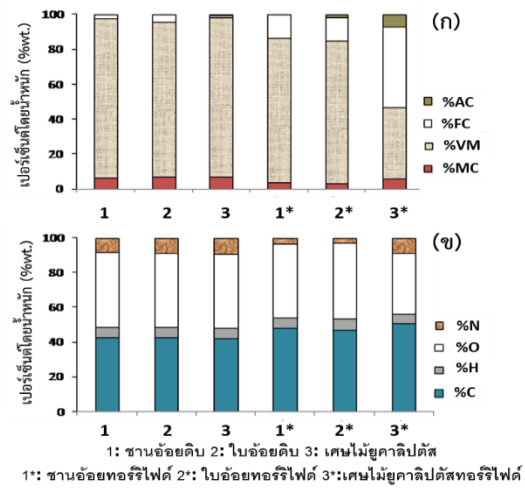


รูปที่ 1 เส้นโค้ง TGA/DTG ของชีวมวลดิบ

พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนแสดงผลออกมาเป็นร้อยละการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่า ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการระเหยความชื้นที่สิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาน 110 องศาเซลเซียส ช่วงของการปลดปล่อยสารระเหยง่าย ซึ่งจะเกิดขึ้นจนถึงอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส [3] โดยโครงสร้างที่เป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะมีการแตกสลายกลายเป็นผลผลิตแก๊สร้อนทำให้โครงสร้างชีวมวลมีองค์ประกอบชาร์มากขึ้น หลังจากนั้นจะเป็นช่วงที่มีการสลายตัวค่อนข้างคงตัวเนื่องจากที่เหลือจะเป็นคาร์บอนคงตัวและเถ้ามีปริมาณโดยรวมน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชีวมวลทั้งหมด ซึ่งใบอ้อยจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนก่อนชานอ้อยและเศษไม้ยูคาลิปตัส โดยใบอ้อยจะมีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 253 องศาเซลเซียส ชานอ้อยจะมีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เศษไม้ยูคาลิปตัสจะมีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 302 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 เส้นโค้ง TGA/DTG ของชีวมวลทอร์ริไฟด์ดิบ



รูปที่ 3 สมบัติชีวมวลก่อนและหลังการทอร์ริแฟคชั่น

ชีวมวลทอร์ริไฟด์จะถูกนำมาตรวจสอบพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนเปรียบเทียบกับชีวมวลที่ยังไม่ผ่านการทอริแฟกชั่น รูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าชีวมวลทอร์ริไฟด์มีการสลายตัว 3 ช่วง เช่นเดียวกันกับชีวมวลดิบ โดยจะมีช่วงการปลดปล่อยสารระเหยง่ายระหว่าง 250-650 องศาเซลเซียส โดยใบอ้อยทอร์ริไฟด์และชานอ้อยทอร์ริไฟด์จะมีสัดส่วนสารระเหยง่ายมากกว่าเศษไม้ยูคาลิปตัสทอร์ริไฟด์ น้ำหนักที่คงเหลือสุดท้ายจากการทดสอบบ่งบอกได้ว่าชีวมวลทอร์ริไฟด์จะมีสัดส่วนองค์ประกอบคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้นกว่าชีวมวลดิบ เศษไม้ยูคาลิปตัสทอร์ริไฟด์จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มากกว่าชีวมวลทอร์ริไฟด์อื่น

เมื่อนำข้อมูลพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนมาวิเคราะห์แบบประมาณการ(Proximate analysis) เพื่อหาปริมาณความชื้น สารระเหยง่าย คาร์บอนคงตัวและปริมาณเถ้า และการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Ultimate analysis) จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า ชีวมวลดิบชานอ้อย ใบอ้อย และเศษไม้ยูคาลิปตัส เมื่อผ่านการทอร์ริแฟคชัน จะมีสมบัติบ่งบอกความเป็นเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น นั่นคือ ชีวมวลทอร์ริไฟด์จะมีปริมาณสสารระเหยง่ายและปริมาณความชื้นลดลง มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น มีสัดส่วนธาตุออกซิเจนลดลงและมีสัดส่วนธาตุคาร์บอนสูงขึ้น และปริมาณเถ้าที่ร้อยละ 1.26 91.07 และ 0.46 ตามลำดับ เมื่อนำสัดส่วนเชิงโมล ของ O/C และ H/C ของทั้ง ชีวมวลดิบและชีวมวลทอร์ริไฟด์มาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าชีวมวลทอร์ริไฟด์จะมีสัดส่วนเชิงโมลของ O/C และ H/C ต่ำกว่าชีวมวลดิบ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของธาตุคาร์บอนและการลดลงของธาตุออกซิเจนในองค์ประกอบนั่นเอง ทำให้ชีวมวลทอร์ริไฟด์มีค่าความร้อนที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงเป็นข้อสนับสนุนได้ว่าชีวมวลทอร์ริไฟด์จะมีศักยภาพความเป็นเชื้อเพลิงที่ดีขึ้นกว่าชีวมวลดิบ [4]

3.3 สภาวะที่เหมาะสมของการทอริแฟกชั่น

โปรแกรม MINITAB (เวอร์ชัน 16) นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อประเมินผลของการเตรียมเชื้อเพลิงด้วยการทอริแฟกชั่นชีวมวลโดยใช้วิธี CCD (Central Composite design) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยมีการวิเคราะห์ปัจจัยดังนี้คือ อุณหภูมิและเวลา ซึ่งขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการทดลองหรือ Severity factor (SF) จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ของความแปรปรวน (ANOVA) ของข้อมูลการทดลองจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง (Y_1, Y_2 และ Y_3) และตัวแปรอิสระ (X_1 และ X_2) ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นกำลังสองเพื่อทำนายสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทอร์ริแฟคชันชีวมวลแต่ละชนิด ภายใต้ค่าความน่าจะเป็นที่มีระดับความเชื่อมั่น 95% เงื่อนไขในการตัดตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) และนัยสำคัญทางสถิติได้รับการตรวจสอบโดยค่า F- Test หลังจากพิจารณาความน่าเชื่อถือของแต่ละเทอมอย่างมีนัยสำคัญ สมการถดถอยที่ถูกเสนอใช้ในการทำนายกระบวนการทอร์ริแฟคชั่นชีวมวลแต่ละชนิด ถูกแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2, R^2_{adj}) จะมีค่าค่อนข้างสูง ดังผลในตารางที่ 2 ทำให้สามารถประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทอร์ริแฟคชันชีวมวลเพื่อให้ได้ปริมาณชีวมวลทอร์ริไฟด์สูง และ ร้อยละผลได้พลังงานสูงสุด ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 3 โดยได้มีการทดลองซ้ำที่สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อยืนยันค่าการทำนาย พบว่า ค่าเฉลี่ยที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าการทำนาย จึงเป็นการยืนยันได้ว่าสมการทำนายที่ได้นี้มีเป็นที่ยอมรับได้ในเชิงสถิติ

ตารางที่ 2 สมการทำนายกระบวนการทอร์ริแฟคชั่นชีวมวลแต่ละชนิด

ชีวมวล	ค่าตอบสนอง	สมการทำนาย	R^2_{adj}	R^2
ชานอ้อย	ค่าความร้อน (MJ/kg)	$Y_1 = 609 - 4.73 X_1 + 0.1800 X_2 + 0.00935 X_1^2$	90.69	88.98
	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป (%)	$Y_2 = -71.4 + 0.3805 X_1 + 0.1978 X_2$	85.91	87.56
	ร้อยละผลได้พลังงาน (%)	$Y_3 = 1185 - 8.49 X_1 - 1.85 X_2 + 0.01664 X_1^2 + 0.0233 X_2^2$	87.06	83.47
ใบอ้อย	ค่าความร้อน (MJ/kg)	$Y_1 = 822 - 4.73 X_1 + 0.405 X_2 + 0.01327 X_1^2$	77.93	79.25
	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป (%)	$Y_2 = 27.12 + 0.11313 X_1 + 0.0539 X_2$	92.07	95.56
	ร้อยละผลได้พลังงาน (%)	$Y_3 = 1185 – 8.49 X_1 – 1.85 X_2 + 0.1664 X_1^2 + 0.0233 X_2^2$	69.11	72.51
เศษไม้ยูคาลิปตัส	ค่าความร้อน (MJ/kg)	$Y_1 = 737 – 6.22 X_1 + 0.416 X_2 + 0.01299 X_1^2$	84.36	86.29
	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป (%)	$Y_2 = -43 – 0.27 X_1 + 0.4417 X_2 + 0.00183 X_1^2$	94.00	96.85
	ร้อยละผลได้พลังงาน (%)	$Y_3 = -1782 + 7.00X_1 + 24.3 X_2 – 0.0843 X_1X_2$	65.06	69.58

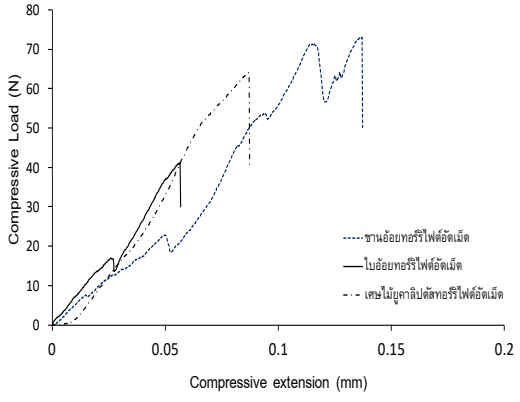
ตารางที่ 3 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอร์ริแฟคชันชีวมวลและสมบัติของชีวมวลทอร์รีไฟด์อัดเม็ด

ชีวมวลและเงื่อนไข	ค่าทำนาย (Y_1, Y_2, Y_3)	ค่าทดลอง (Y_1, Y_2, Y_3)	สมบัติเม็ดเชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์		
			Pellet Density (kg/m^3)	Heating Value (MJ/Kg)	Energy density (MJ/m^3)
ชานอ้อย 289°C, 30 min	30.70 MJ/kg, 44%, 88.27%	28.87 MJ/kg, 46.52%, 84.65%	339.96	50.02	18,127.25
ใบอ้อย 294°C, 30 min	66.57 MJ/kg, 61.97%, 79.61%	63.24 MJ/kg, 59.97%, 81.25%	382.70	67.67	25,071.74
เศษไม้ยูคาลิปตัส 297°C, 30 min	49.81 MJ/kg, 50.98%, 288%	47.55 MJ/kg, 52.21%, 280%	275.23	32.70	8,927.10

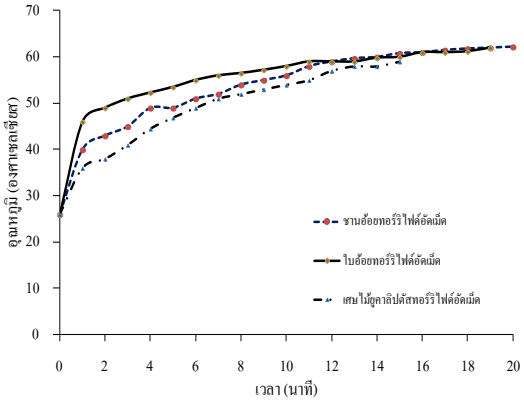
3.4 ชีวมวลทอร์รีไฟด์อัดเม็ด

จากการศึกษาข้างต้น ชีวมวลทอร์รีไฟล์แต่ละชนิดจะถูกเตรียมขึ้นมาโดยการใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ โดยชานอ้อยจะถูกทอร์ริแฟคชั่นที่ 289 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ชีวมวลใบอ้อยจะถูกทอร์ริแฟคชั่นที่ 294 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และชีวมวลเศษไม้ยูคาลิปตัสจะถูกทอร์ริแฟคชั่นที่ 297 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ชีวมวลทอร์รีไฟด์ที่ได้จะมีเสถียรภาพทางความร้อนที่มากขึ้นเป็นผลมาจากสารระเหยง่ายได้ถูกไล่ออกไปจากโครงสร้างและมีความเป็นคาร์บอนมากขึ้นทำให้ได้สมบัติความเป็นเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ชีวมวลทอร์รีไฟด์จากสภาวะที่เหมาะสมจะถูกนำมาอัดเม็ดโดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานผสมปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ของชีวมวลทอร์รีไฟด์ใช้เครื่องอัดเม็ดแบบเครื่องอัดแบบลูกกลิ้ง (Roll press) อัดที่กำลังการผลิต 100-150 กิโลกรัมต่อชั่วโมงได้ชีวมวลทอร์รีไฟด์อัดเม็ดออกมา หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยสมบัติที่วิเคราะห์ได้แก่ มิติ ความหนาแน่น ความแข็งแรง การดูดซับความชื้นและประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยทำการสุ่มตัวอย่างทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ที่มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน เมื่ออัดเสร็จแล้วนำไปทำการตากแห้งเป็นเวลา 1 วัน ผลวิเคราะห์พบว่า เม็ดชีวมวลชานอ้อยทอร์รีไฟด์มีค่า L/D เฉลี่ย 3.22 และมีความหนาแน่นเฉลี่ย 339.96 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เม็ดชีวมวลใบอ้อยทอร์รีไฟด์มีค่า L/D เฉลี่ย 3.68 และมีความหนาแน่นเฉลี่ย 382.70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและเม็ดชีวมวลยูคาลิปตัสทอร์รีไฟด์มีค่า L/D เฉลี่ย 3.88 และมีความหนาแน่นเฉลี่ย 275.23 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งขนาดที่ได้ขึ้นอยู่กับแม่พิมพ์และการเกาะตัวกันของชีวมวลทอร์รีไฟด์โดยใช้ตัวประสาน [5] ซึ่งเม็ดเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะง่ายต่อการขนส่งและประหยัดค่า

ขนส่งเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น อีกทั้งยังสามารถควบคุมปริมาณการใช้ได้ง่ายขึ้นในการเผาไหม้ แม้ว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจะมีขนาดเล็กแต่สามารถให้พลังงานความร้อนมากกว่าชีวมวลประเภทอื่น จึงมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่านั่นเอง



รูปที่ 4 ความแข็งแรงของชีวมวลทอร์ริไฟด์อัดเม็ด



รูปที่ 5 การให้ความร้อนของชีวมวลทอร์ริไฟด์อัดเม็ด

เมื่อพิจารณาค่าผลได้พลังงานของชีวมวลทอร์ริไฟด์ พบว่าชานอ้อย ใบอ้อย และไม้ยูคาลิปตัส มีค่าเท่ากับ 18,127.25, 25,071.74 และ 8,927.10 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 ใบอ้อยทอร์ริไฟด์จะมีความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงและค่าความร้อนสูงที่สุด ส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นเชิงพลังงานที่สูงขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง เมื่อนำชีวมวลทอร์ริไฟด์อัดเม็ดทั้ง 3 ชนิด ไปทดสอบค่าความแข็งแรงของเม็ดเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่อง Universal testing machine (UTM) จะได้ผลการทดลองออกมาดังกราฟรูปที่ 4 ซึ่งกราฟของการบีบอัดมีความชันประมาณเท่ากัน โดยสังเกตได้ว่าหลังจากถึงค่าสูงสุดอันดับแรกแล้วมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นได้อีกครั้ง เนื่องจากมีการบีบอัดของเม็ดเชื้อเพลิงทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและมีความแข็งแรงมากขึ้น [6] ซึ่งหลังจากทำการทดสอบจะเห็นได้ว่าเม็ดเชื้อเพลิงชานอ้อยทอร์ริไฟด์มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด (73.03 นิวตัน) รองลงมาคือเม็ดเชื้อเพลิงยูคาลิปตัสทอร์ริไฟด์(63.98 นิวตัน) และเม็ดเชื้อเพลิงใบอ้อยทอร์ริไฟด์ (41.20 นิวตัน) จากการทดสอบการให้ความร้อนในการต้มน้ำด้วยเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์ริไฟด์ โดยนำเม็ดเชื้อเพลิงจำนวน 10 กรัม ไปทำการต้มน้ำ 50 มิลลิลิตร (โดยไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงอื่นร่วม) และวัดอุณหภูมิได้ผลแสดงออกมาดังรูปที่ 5 พบว่าเส้นโค้งของเม็ดชีวมวลทอร์ริไฟด์ใบอ้อยมีความชันที่สูงที่สุดในช่วงการเผาไหม้ 2 ชั่วโมงแรก เนื่องจากมีปริมาณค่าความร้อนที่สูงนั่นเอง และรองลงมาเป็นชานอ้อย และไม้ยูคาลิปตัส ตามลำดับ จากการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์ริไฟด์แต่ละชนิด พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงยูคาลิปตัสมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่าคือ 49.64 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือชานอ้อย 46.90

เปอร์เซ็นต์ และใบอ้อย 44.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเม็ดเชื้อเพลิงที่ดีจะต้องมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำเพื่อให้งานต่อการขนส่ง การจัดเก็บ และการนำไปใช้ โดยจะเห็นว่าเม็ดเชื้อเพลิงชานอ้อยมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำที่สุด

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมชีวมวลทอร์ริไฟด์ พบว่า สมการที่ใช้ทำนายกระบวนการทอริแฟกชั่นมีความน่าเชื่อถือในทางสถิติ โดยค่าทำนายและค่าการทดลองจากสภาวะที่เหมาะสมในการทอร์ริไฟด์ชีวมวลมีความใกล้เคียงกัน และเมื่อนำชีวมวลทอริไฟด์มาทำการอัดเม็ด พบว่าเม็ดชีวมวลชานอ้อยทอร์ริไฟด์ที่ได้มีสมบัติสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานทั่วไปสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดชีวมวลในประเทศไทย [7] คือ มีสัดส่วนมิติความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 3.22 ถึง 3.68 ความหนาแน่น มีค่า 0.34 ถึง 0.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่า 8,927.10 ถึง 25,071.74 เมกกะจูลต่อลูกบากศ์เมตร มีค่าความแข็งแรง 41.20 ถึง 73.03 นิวตัน คุณสมบัติการเผาไหม้ของเม็ดเชื้อเพลิงใบอ้อยมีประสิทธิภาพสูงสุดรองลงมาคือ ชานอ้อยและเศษไม้ยูคาลิปตัส

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Van der Stelt MJ, et al. Biomass Upgrading by Torrefaction for the Production of Biofuels: A Review. Biomass and Bioenergy. 2011; 35(9): 3748-62.

[2] Kim H, et al. Biomass Briquette as a Technology for Desulphurizing and Energy Saving. Renewable Energy Journal. 2001; 8: 33-75.

[3] Wilson L, et al. Thermal Characterization of Tropical Biomass Feedstocks. Energy Conversion and Management. 2011; 52(1): 191-8.

[4] Bilgic E, et al. Limits of Variations on the Structure and the Fuel Characteristics of Sunflower Seed Shell Through Torrefaction. Fuel Processing Technology. 2016; 144: 197-202.

[5] Reza MT, et al. Engineered Pellets from Dry Torrefied and HTC Biochar Blends. Biomass and Bioenergy. 2014; 63: 229-38.

[6] Chrastina J, et al. Determination of Mechanical Properties of Poppy Waste Pellets. Agronomy Research. 2017; 15(5): 1906–17.

[7] คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร. รายงานฉบับสุดท้าย โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ Biomass Pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน; 2555.