

อิทธิพลของสัดส่วนอากาศต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ในหัวเผาชีวมวลชนิดวางตั้ง

THE EFFECT OF AIR RATIO ON COMBUSTION BEHAVIOR IN VERTICAL

BIOMASS BURNER

ชินภัทร ชูระการ, อภิชน มุ่งชู, กัมปนาท ไชยเพชร และ อนุวัช แสนพงษ์*

Chinnapat Turakarn, Aphichon Mungchu, Kumpanat Chaiphet,

and Anuwat Saenpong*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,

Kalasin University

Received: 13 December 2022

Revised: 14 February 2023

Accepted: 20 March 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนอากาศส่วนที่หนึ่งและอากาศส่วนที่สองต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบวางตั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 เซนติเมตร สูง 70 เซนติเมตร อากาศที่ป้อนเข้าสู่ภายในหัวเผาแบ่งเป็นสองส่วน อากาศส่วนที่หนึ่งเป็นอากาศที่นำพาเชื้อเพลิงจากสกรูลำเลียงเข้าสู่ส่วนล่างของหัวเผา และอากาศส่วนที่สองถูกป้อนเข้าสู่หัวเผาบริเวณกึ่งกลางในลักษณะหมุนควงสามทาง โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาดรู 1.5 มิลลิเมตร การเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 150 กิโลวัตต์ ด้วยสภาวะอากาศส่วนเกินร้อยละ 10 และทดสอบที่อัตราส่วนอากาศ 2 : 3, 1 : 1 และ 3 : 2 ตามลำดับ จากผลการวิจัยพบว่า อิทธิพลของอากาศส่วนที่สองส่งผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรุนแรงในบริเวณจุดศูนย์กลางภายในหัวเผา ระหว่างระยะ r/R 0.33 ถึง 1.00 เมื่อพิจารณาลักษณะของเปลวไฟ พบว่าปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งมากขึ้น ส่งผลให้อนุภาคเชื้อเพลิงขนาดใหญ่หลุดออกมาเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ภายนอกหัวเผาเป็นจำนวนมาก และการเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศส่วนที่หนึ่งต่อ

* Corresponding author: อนุวัช แสนพงษ์

E-mail: anuwat.sa@ksu.ac.th

ส่วนที่สอง 2 ต่อ 3 ให้อุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณท่อไฟสูงสุด 925 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอยคิดเป็นร้อยละ 38.22 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ร้อยละ 89.29

คำสำคัญ: หัวเผา, เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น, อากาศส่วนเกิน, อากาศส่วนที่สอง

Abstract

The objective of this research was to investigate the effect of primary and secondary air ratios on the combustion behavior. In this experiment, the vertical biomass burners had an internal diameter of 30 cm. and the height of 70 cm. The air that enters the burner is split into two portions. The primary air transports the fuel from the screw conveyor to the bottom of the burner, while the secondary air feeds the center burner in a three-way swirling air system. This experiment used rubber-wood sawdust as biomass; biomass fuel, dust from rubber wood ivy sifted through a 1.5 mm hole sieve. Combustion with a heating power of 150 kW and 10 percent excess air, tested at primary and secondary air ratios of 2:3, 1:1, and 3:2, respectively. The result showed that injecting secondary air creates an intensive combustion reaction inside the burner's center, between the radius ratio (r/R) 0.33 to 1.00. Considering the flame's nature, it was discovered that when the primary air increases, numerous large particles escape and catch fire outside the burner. A primary and secondary air ratio of 2:3 results in a maximum flue gas temperature of 925 °C and a minimum carbon residual in flying ash of 38.22 %. The combustion efficiency is expected to be 89.29 %.

Keywords: Burner, Pulverized biomass, Excess air, Secondary air

บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานของประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้น (ปานใจ สื่อประเสริฐ สิทธิ์ และคณะ, 2563, พลชัย ขาวนวล และคณะ, 2563). ตามพัฒนาการของประเทศ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานไฟฟ้า ความร้อนและเชื้อเพลิงชีวภาพ (พิมพ์พรรณ อำพันธ์ทอง และคณะ, 2564) ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตประจำวัน พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหิน ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น แหล่งพลังงานเหล่านี้ใช้แล้วหมดไป ประกอบกับวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ทั้งภาครัฐ และเอกชนพยายามมองหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ มาใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตรจำนวนมากซึ่งเป็นวัสดุหาง่ายและราคาถูก (ปกรณ อุ่นไธสง และ รชต์ มณีโชติ, 2562) เช่น เศษไม้ยางพารา ฟางข้าว ชังข้าวโพด แกลบ และขี้เลื่อย เป็นต้น เศษวัสดุทางการเกษตรถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้าน (เยวพล ชุมพล และ โฉมยง ไชยอุบล, 2563, ภราภรณ์ เหล็กสูงเนิน และคณะ, 2560) ลักษณะการใช้งานชีวมวลต้องนำเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ได้พลังงานความร้อน เช่น กระบวนการผลิตไอน้ำหรือน้ำร้อน ทดแทนพลังงานจากน้ำมันเตาซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด แต่การนำชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตความร้อนนั้น จำเป็นต้องหาเทคโนโลยีหรือเทคนิคมาประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และเกิดมลพิษที่น้อย (Garcia-Maraver et al., 2015; Riaza et al., 2017; Saeed et al., 2017; Sousa & Azevedo, 2016, คณิต มานะธูระ และ อุกฤต สมัครสมาน, 2565, นิกราน หอมดวง และคณะ, 2564) การเผาไหม้เชื้อเพลิงมีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก ๆ คือ เชื้อเพลิง ออกซิเจนในอากาศ และความร้อน ดังนั้นลักษณะการป้อนอากาศและเชื้อเพลิงจึงมีความสำคัญต่อการเผาไหม้เพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจกับการออกแบบหัวเผาสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนเกินต่อพฤติกรรมเผาไหม้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งนำไปสู่สมรรถนะการเผาไหม้ที่เหมาะสมจากการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบวางตั้งและคาดว่าในอนาคตสามารถนำหัวเผาที่ถูกสร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

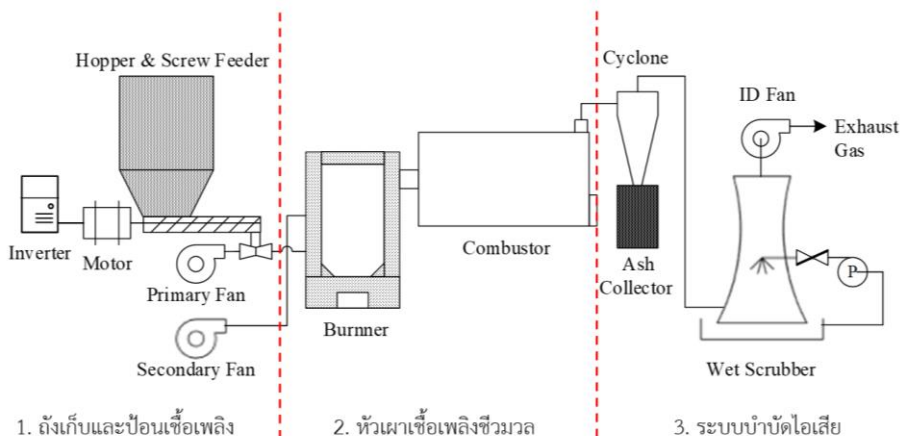
รูปที่ 1 แสดงแผนภาพชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ดังนี้

1. ถังเก็บและป้อนเชื้อเพลิง ที่สามารถควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง ด้วยการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของสกรูลำเลียง (Kamal, 2008)

2. หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล มีลักษณะวางในแนวตั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของห้องเผาไหม้ 30 เซนติเมตร สูง 70 เซนติเมตร พิจารณารูปที่ 2(ก) อากาศที่ป้อนเข้าสู่ภายในหัวเผาจะแบ่งออกเป็นสองส่วน อากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air) เป็นอากาศที่นำพาเชื้อเพลิงจากสกรูลำเลียงเข้าสู่ส่วนล่างของหัวเผาและอากาศส่วนที่สอง (secondary air) ถูกป้อนเข้าสู่หัวเผาบริเวณกึ่งกลางในลักษณะหมุนควงสามทาง ซึ่งให้อัตราการไหลของแก๊สร้อนที่มีความดันสูง การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ และประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่อัตราความร้อนสูง (Jugjai & Polmart, 2003; Rasoulkhani et al., 2018.)

3. ระบบบำบัดไอเสีย ซึ่งประกอบด้วยไซโคลน (cyclone) และระบบบำบัดไอเสียแบบเปียก (wet scrubber) ซึ่งเถ้าลอยที่อยู่ภายในส่วนล่างของไซโคลนถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอย (unburnt char)

โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นหลัก



รูปที่ 1 แผนภาพชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ขี้เลื่อยไม้ยางพาราชนิดละเอียดถูกเลือกใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทดลอง เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ และมีค่าความร้อนสูง 17.5 MJ/kg (Laphirattanakul et al., 2020) โดยเริ่มต้นเชื้อเพลิงทดสอบถูกนำไปผึ่งแดดในสภาวะบรรยากาศเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการจัดเก็บเชื้อเพลิง จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร ชีวมวลขี้เลื่อยไม้ยางพารามีสมบัติ และขนาดดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ตารางสมบัติเชื้อเพลิงขี้เลื่อยยางพารา

การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis)						
Volatiles (%W)		Fixed Carbon (%W)		Moisture (%W)		Ash (%W)
76.8		15.2		5.8		2.2
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)					As received Base	
C (%W)	H (%W)	N (%W)	S (%W)	O (%W)	HHV (MJ/kg)	LHV (MJ/kg)
49.4	6.1	0.4	0	43.9	17.5	16.2

ที่มา: Laphirattanakul et al. (2020)

ตารางที่ 2 ขนาดของเชื้อเพลิงขี้เลื่อยไม้ยางพาราในงานวิจัยครั้งนี้

ขนาดของเชื้อเพลิง (ไม่โครเมตร)	ร้อยละโดยน้ำหนัก
≥ 1000	24.00
$500 \leq S \leq 1000$	40.00
$250 \leq S \leq 500$	16.00
$125 \leq S \leq 250$	10.00
$53 \leq S \leq 125$	6.00
≤ 53	4.00

เงื่อนไขการทดลองและการเผาไหม้

สำหรับการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจากชีเลื่อยไม้ยางพารา ให้กำลังความร้อนที่ 150 กิโลวัตต์ ก่อนการทดสอบนำข้อมูลองค์ประกอบของธาตุและค่าความร้อนของชีวมวล จากตารางที่ 1 มาคำนวณปริมาณเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศตามทฤษฎี และปริมาณอากาศส่วนเกิน ที่ใช้สำหรับกระบวนการเผาไหม้ โดยสมการความสัมพันธ์ที่ 1, 4 และ 7 ตามลำดับ (Koppejan & Van Loo, 2012; Stephen, 2000) ซึ่งจากการคำนวณได้เงื่อนไขของการทดลองตามตารางที่ 3

อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (m_{fuel} , kg/s) สำหรับการเผาไหม้ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$m_{fuel} = \frac{\text{Thermal Throughput}}{LHV} \quad (1)$$

เมื่อ *Thermal Throughput* คือ กำลังความร้อนของหัวเผา (kW)

LHV คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

ปริมาณออกซิเจน ($m_{O_2,Air}$) สำหรับการเผาไหม้ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$m_{O_2,Air} \left[\frac{kg \ O_2}{kg \ fuel(waf)} \right] = \left(X_C \frac{M_{O_2}}{M_C} + \frac{X_H}{4} \frac{M_{O_2}}{M_H} + X_S \frac{M_{O_2}}{M_S} - X_O \right) (1 - X_{H_2O}) \lambda \quad (2)$$

เมื่อ $M_i \left[\frac{kg}{kmole} \right]$ คือ มวลโมเลกุลของธาตุ i

X_i คือ สัดส่วนโดยมวลของธาตุ i ในเชื้อเพลิงที่ปราศจากความชื้นและเถ้า (daf)

X_{H_2O} คือ สัดส่วนโดยมวลของน้ำ (H_2O) ในเชื้อเพลิงที่ปราศจากเถ้า (waf)

λ คือ อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (excess air ratio)

ปริมาณไนโตรเจน $m_{N_2,Air}$ ที่อยู่ในอากาศสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$m_{N_2,Air} \left[\frac{kg \ N_2}{kg \ fuel(waf)} \right] = m_{O_2,Air} \frac{Y_{N_2,Air}}{Y_{O_2,Air}} \frac{M_{N_2}}{M_{O_2}} \quad (3)$$

เมื่อ $Y_{O_2,Air}$ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของออกซิเจน O_2 ในอากาศ (โดยปกติจะเท่ากับ 0.21)

$Y_{N_2,Air} = 1 - Y_{O_2,Air}$ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของออกซิเจน N_2 ในอากาศ

ปริมาณอากาศ m_{Air} สำหรับการเผาไหม้ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4

$$m_{Air} \left[\frac{kg \text{ air}}{kg \text{ fuel (waf)}} \right] = m_{O_2, Air} + m_{N_2, Air} \quad (4)$$

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี $(A/F)_{stoic}$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5

$$(A/F)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right) \quad (5)$$

ร้อยละอากาศส่วนเกิน ($\%excess \text{ air}$) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6

$$\%excess \text{ air} = \frac{(1-\Phi)}{\Phi} \times 100\% \quad (6)$$

เมื่อ Φ คือ Equivalence ratio ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 7

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)} \quad (7)$$

การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ *Combustion Efficiency* (η_{comb})

$$Combustion \text{ Efficiency } (\eta_{comb}) = 100 - \frac{flue \text{ heat losses}}{fuel \text{ heating value}} \times 100 \quad (8)$$

โดยที่

$$flue \text{ heat losses} = \dot{m}_{unburn} \times H_{burnout} \quad (9)$$

เมื่อ $\dot{m}_{unburn}$ คือ ปริมาณอนุภาคคาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ (kg/s)

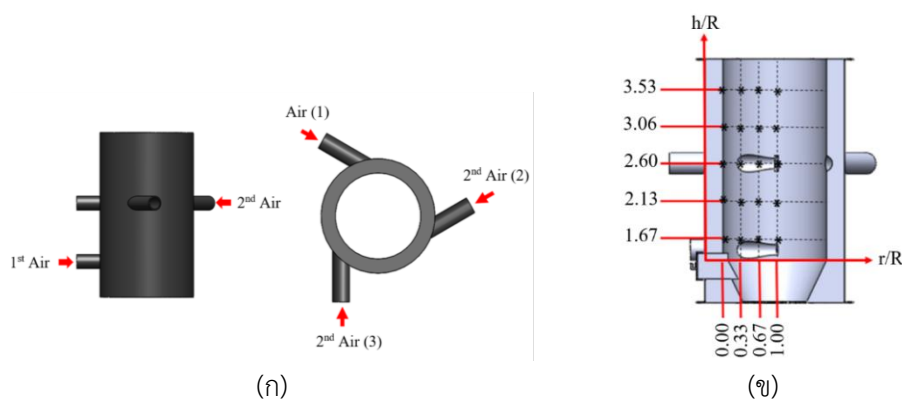
$H_{burnout}$ คือ ค่าความร้อนของคาร์บอน (MJ/kg)

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดลอง

กำลังความร้อน (Thermal Throughput) [kW]	150 ± 5.40
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง [kg/min]	0.56 ± 0.02
ปริมาณอากาศตามทฤษฎี [m^3/min]	2.63 ± 0.05
ปริมาณอากาศส่วนเกินร้อยละ 10 [m^3/min]	2.89 ± 0.05
อัตราส่วนอากาศส่วนที่หนึ่งต่ออากาศส่วนที่สอง (primary - secondary air ratio)	2 : 3 หรือ ร้อยละ 40 : 60 1 : 1 หรือ ร้อยละ 50 : 50 3 : 2 หรือ ร้อยละ 60 : 40

วิธีการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล จะทำการบันทึกผลการกระจายตัวของอุณหภูมิ ภายในหัวเผาทั้งหมด 20 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) โดยใช้ Thermocouple type k และบันทึกข้อมูลผ่าน Data logger ยี่ห้อ Graphtec รุ่น midi LOGGER GL840 ซึ่งมีค่าความแม่นยำ ± 0.05 และมีลำดับการทดลองดังนี้



รูปที่ 2 ลักษณะหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล (ก) ตำแหน่งของอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สอง และ (ข) ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิภายในหัวเผา

1. ทำการอุ่นหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้หัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG pilot burner) เปิดการทำงานของเครื่องอัดอากาศส่วนที่หนึ่ง สังเกตการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

2. เมื่ออุณหภูมิของผนังภายในหัวเผาเพิ่มขึ้นถึง 300 องศาเซลเซียส ทำการเปิดการทำงานของเครื่องอัดอากาศส่วนที่สอง และปรับอัตราส่วนของอากาศตามเงื่อนไขการทดลองซึ่งปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งร้อยละ 40 นั้นเป็นปริมาณอากาศขั้นต่ำที่สามารถนำพาเชื้อเพลิงจากสกรูล้ำเลียงเข้าสู่ส่วนล่างของหัวเผาได้อย่างต่อเนื่อง

3. ทำการเปิดการทำงานของสกรูล้ำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวล แล้วปรับความเร็วรอบของสกรูล้ำเลียงที่ให้อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.56 กิโลกรัมต่อวินาที

4. เมื่ออุณหภูมิภายในหัวเผาคงที่ บันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟที่ท่อไฟ อุณหภูมิภายในหัวเผา และอุณหภูมิทางออกของแก๊สร้อน พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างเถ้าบริเวณส่วนล่างของไซโคลน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอย

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในหัวเผาชีวมวล

อากาศส่วนที่หนึ่งซึ่งถูกป้อนเข้าสู่หัวเผาในทิศของการสัมผัสเส้นรอบวง จะส่งผลให้ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในหัวเผามีลักษณะหมุนวน และสัมผัสกับผนังภายในหัวเผาโดยรอบ ดังแสดงในรูปที่ 3 และเมื่อพิจารณารูปที่ 4 การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในหัวเผาที่สภาวะอากาศส่วนเกินร้อยละ 10 พบว่าที่อัตราส่วนความสูง (h/R) เท่ากับ 1.67 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่หัวเผา ในทุกเงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิบริเวณนี้จะสูงมากกว่า 800 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเมื่อเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่หัวเผา เชื้อเพลิงจะเข้าสู่กระบวนการทำแห้ง ปลดปล่อยสารระเหย และเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ได้ทันที จึงส่งผลให้หัวเผาสามารถคงสภาวะการไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3 พฤติกรรมการหมุนวนของอากาศภายในหัวเผา ขณะทำการอุ่นหัวเผา

ปฏิกิริยาการเผาไหม้สารระเหย ยังเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ที่ระยะ h/R เท่ากับ 2.13 ส่งผลให้อุณหภูมิภายในหัวเผาเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อนุภาคคาร์บอนเริ่มเกิดปฏิกิริยาการไหม้ และด้วยพฤติกรรมของอากาศส่วนที่หนึ่งที่มีลักษณะหมุนควง จึงส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของอัตราส่วนความสูงค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยเงื่อนไขการเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศส่วนที่หนึ่งต่ออากาศส่วนที่สองเท่ากับ 2 : 3 ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 926 องศาเซลเซียส

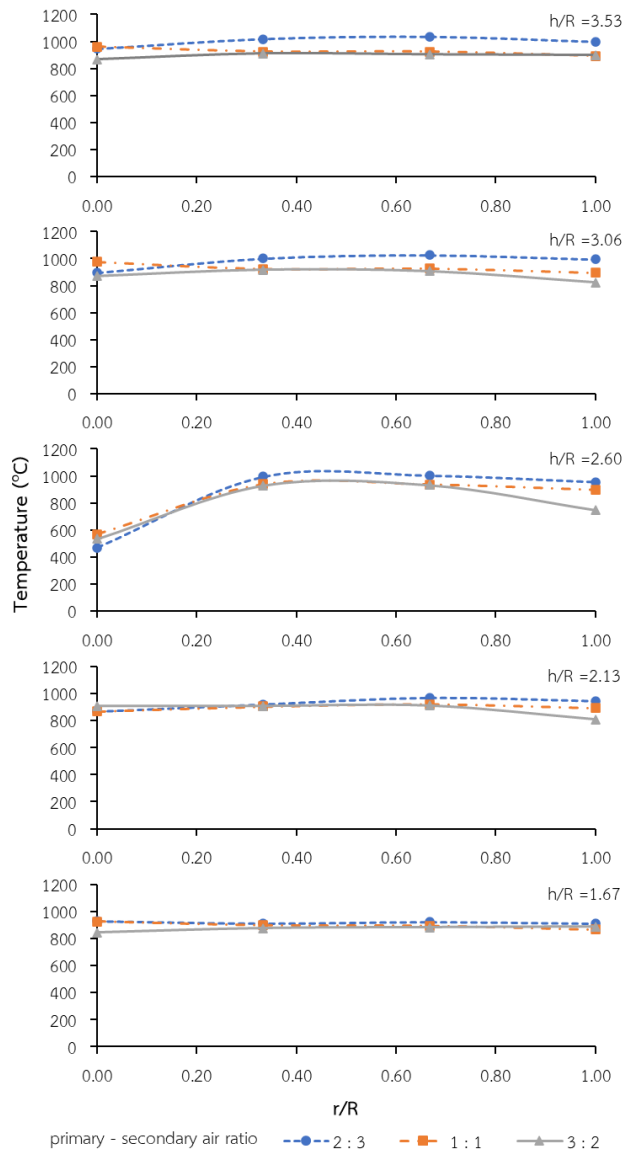
ที่ระยะ h/R เท่ากับ 2.60 เป็นตำแหน่งที่อากาศส่วนที่สองถูกป้อนเข้าสู่ภายในหัวเผา อนุภาคคาร์บอนจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้บริเวณตำแหน่งระหว่างอัตราส่วนรัศมี r/R เท่ากับ 0.33 ถึง 1.00 ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวค่อนข้างสูงกว่าบริเวณผนังหัวเผา แต่ด้วยมวลของอากาศส่วนที่สองซึ่งเป็นอากาศที่เย็น ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดความหน่วง อุณหภูมิบริเวณที่ติดกับผนังหัวเผาที่อัตราส่วนความสูงนี้จึงลดต่ำลง

ปฏิกิริยาการเผาไหม้กลับมารุนแรงอีกครั้งที่ระยะ h/R เท่ากับ 3.06 และ 3.53 เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในอากาศที่เพียงพอต่อการเผาไหม้คาร์บอน ส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผาสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ระยะ r/R ระหว่าง 0.33 ถึง 1.00 ซึ่งเงื่อนไขการทดลองอัตราส่วนอากาศส่วนที่หนึ่งต่ออากาศส่วนที่สองเท่ากับ 2 : 3 ยังคงให้ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าเงื่อนไขอัตราส่วนอากาศอื่น ๆ โดยสามารถทำอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดได้ที่ 1,035 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่ง h/R และ r/R เท่ากับ 3.53 และ 0.67 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศ 2 : 3 พบว่าในทุกๆ ระยะอัตราส่วนความสูง h/R อุณหภูมิสูงสุดของแก๊สร้อนภายในหัวเผาจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งอัตราส่วนระยะตามแนวรัศมี r/R เท่ากับ 0.67 แสดงให้เห็นว่าอากาศส่วนที่หนึ่งมีลักษณะหมุนเหวี่ยงตามแนวเส้นรอบวง และอากาศส่วนที่สอง ถูกป้อนเข้าสู่หัวเผาบริเวณกึ่งกลางในลักษณะหมุนควงสามทาง ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่รุนแรงภายในบริเวณดังกล่าว

เมื่อพิจารณารูปที่ 5 อุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณท่อไฟ พบว่าการเผาไหม้เงื่อนไขอัตราส่วนอากาศส่วนที่หนึ่งต่ออากาศส่วนที่สอง 2 : 3 ทำให้อุณหภูมิแก๊สร้อนสูงสุด รองลงมาคือเงื่อนไขการเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศ 1 ต่อ 1 โดยเงื่อนไขการเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศ

3 : 2 จะให้อุณหภูมิแก๊สร้อนต่ำที่สุด เท่ากับ 924 857 และ 827 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในหัวเผาที่ระยะ h/R เท่ากับ 3.53

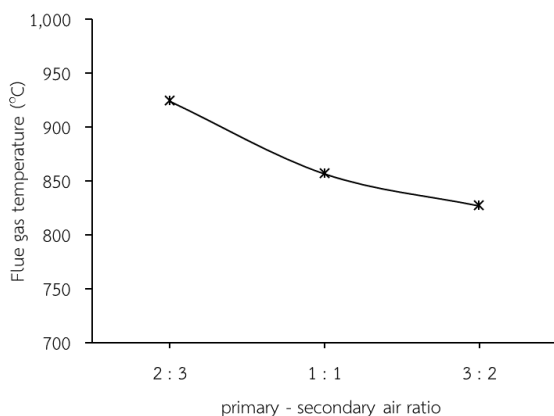


รูปที่ 4 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผาที่สภาวะอากาศส่วนเกินร้อยละ 10 และ อัตราส่วนอากาศส่วนที่หนึ่งต่ออากาศส่วนที่สองเท่ากับ 2 : 3, 1 : 1 และ 3 : 2

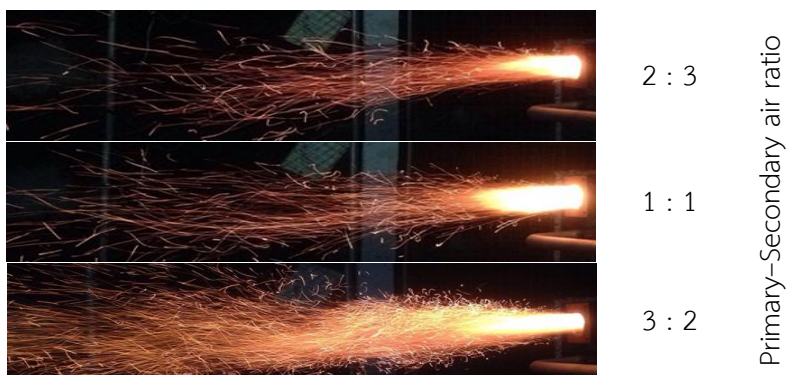
ลักษณะของเปลวไฟที่พุ่งออกจากหัวเผา

เมื่อพิจารณารูปที่ 6 จะพบว่ามิสเกิดเปลวไฟที่พุ่งออกจากหัวเผาบริเวณท่อไฟ ลักษณะดังกล่าวเกิดจากอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่หลุดลอยออกมาพร้อมกับแก๊สร้อน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (residence time) ของอนุภาคเชื้อเพลิง ขนาดใหญ่ ภายในหัวเผาไม่เพียงพอ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nishiyama et al. (2007) ที่ระบุว่า การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นนั้นเหมาะกับอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร

เมื่อพิจารณาลักษณะของเปลวไฟ พบว่าความยาวของเปลวไฟที่พุ่งออกมาจากหัวเผา จะแปรผกผันกับปริมาณอากาศส่วนที่สอง นั่นคือเมื่อสัดส่วนของอากาศส่วนที่สองเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้เปลวไฟที่พุ่งออกมามีความยาวลดลง เนื่องจากอากาศส่วนที่สองซึ่งถูกป้อนเข้าสู่หัวเผาในลักษณะหมุนควงสามทาง จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเผาไหม้ที่บริเวณกึ่งกลางภายในของหัวเผา ยิ่งปริมาณอากาศส่วนที่สองมาก ความสามารถในการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาภายในหัวเผาจึงมากขึ้นตาม จึงเป็นเหตุผลให้ความยาวของเปลวไฟลดลง ในขณะที่เมื่อปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งมากขึ้น ความรุนแรงของการหมุนเหวี่ยง และการลอยตัวของอนุภาคจะมีมากขึ้นตามไปด้วย จึงส่งผลให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในหัวเผาสั้นลง อนุภาคเชื้อเพลิงขนาดใหญ่จึงหลุดออกมาเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้นอกหัวเผาเป็นจำนวนมาก สังเกตได้จากที่เปลวไฟมีสะเก็ดไฟของอนุภาคพุ่งออกมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งเปลวไฟในลักษณะนี้มีโอกาสที่จะมีอนุภาคคาร์ที่เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หลุดลอยไปกับแก๊สลอยได้



รูปที่ 5 อิทธิพลของอัตราส่วนอากาศต่ออุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณท่อไฟ



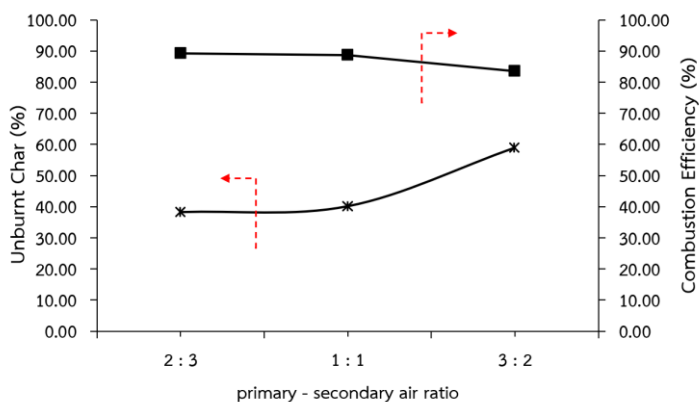
รูปที่ 6 อิทธิพลของสัดส่วนอากาศต่อลักษณะของเปลวไฟที่พุ่งออกจากหัวเผา

การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอยและประสิทธิภาพการเผาไหม้

การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอยนั้น ทำการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า (Ash) ในตัวอย่างเถ้าลอยที่เก็บจากบริเวณส่วนล่างของไซโคลน โดยควบคุมการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 3174 (ASTM D3174-12, 2018) โดยนำตัวอย่างเถ้าลอยมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปเผาด้วยความร้อน 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จนกระทั่งคาร์บอนถูกเผาไหม้หมดสิ้น หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักเถ้าอีกครั้ง น้ำหนักส่วนต่างที่หายไป คือ ปริมาณคาร์บอนคงเหลือ แต่เนื่องจากการทดลองไม่สามารถวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในองค์ประกอบของแก๊สไอเสียได้ ดังนั้นการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_{comb}) จึงพิจารณาเฉพาะค่าความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอย ดังสมการที่ 8 ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นนั้นปริมาณคาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้กว่าร้อยละ 90 จะอยู่ในรูปของคาร์บอนคงเหลือที่ปนไปกับเถ้าหนักและเถ้าลอย (ชินภัทร ชูระการ, 2558)

เมื่อพิจารณารูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนอากาศต่อปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอย และประสิทธิภาพการเผาไหม้ พบว่าเงื่อนไขการเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศส่วนที่หนึ่งต่ออากาศส่วนที่สอง 2 : 3 มีปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอยน้อยที่สุด รองลงมาคือเงื่อนไขการเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศ 1 ต่อ 1 โดยเงื่อนไขการเผาไหม้ที่ 3 : 2 มีปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอยมากที่สุด เท่ากับร้อยละ 38.22, 40.08 และ 58.98 ตามลำดับ และเมื่อนำปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอยมาคำนวณเพื่อประมาณการถึงประสิทธิภาพ

การเผาไหม้ พบว่าเงื่อนไขการเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศ 2 : 3 มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุด ร้อยละ 89.29 ซึ่งจากตัวเลขการกระจายตัวของอุณหภูมิ ปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอย และประสิทธิภาพการเผาไหม้ดังกล่าว ชี้ให้เห็นว่าเงื่อนไขการเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศส่วนที่หนึ่งต่ออากาศส่วนที่สอง 2:3 มีความเหมาะสมกับลักษณะการเผาไหม้ในหัวเผาชีวมวลฝุ่นชนิดวางตั้ง ที่สภาวะการเผาไหม้อากาศส่วนเกินร้อยละ 10



รูปที่ 7 อิทธิพลของอัตราส่วนอากาศต่อปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอย และประสิทธิภาพการเผาไหม้

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่เชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่หัวเผาสูงกว่าอุณหภูมิของกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย จะส่งผลให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง อากาศส่วนที่สองจะส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณขีดผนังห้องเผาไหม้ลดลงที่ระยะ r/R ต่ำกว่า 0.33 โดยอุณหภูมิผนังที่ลดลงแปรผันตามปริมาณอากาศส่วนที่สองที่ถูกป้อนเข้าสู่หัวเผา แต่ความยาวของเปลวไฟที่พุ่งออกมาจากหัวเผาจจะแปรผกผันกับปริมาณอากาศส่วนที่สอง ในขณะที่เมื่อปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงขนาดใหญ่หลุดออกมาเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ภายนอกหัวเผาเป็นจำนวนมาก ซึ่งการเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศ 2 : 3 ให้อุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณท่อไฟสูงสุด 925 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณคาร์บอนคงเหลือในเถ้าลอยคิดเป็นร้อยละ 38.22 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ร้อยละ 89.29 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสัดส่วนอากาศส่วนที่หนึ่งต่อส่วนที่สอง 2 ต่อ 3 มีความเหมาะสมกับหัวเผาชีวมวล

ผู้ชนิตวางตั้ง และคาดว่าจะสามารถนำหัวเผาดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เกษตร และเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- คณิต มานะธูระ และ อุกฤต สมัครสมาน. (2565). สมรรถนะของเตาไฟโรไลซิสกะลามะพร้าว ชนิดให้ความร้อนด้วยตนเอง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 11(2), 13–20.
- ชินภัทร ชูระการ. (2558). *การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม*. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- นิกราน หอมดวง, พันธวัฒน์ ไชยวรรณ, ภูนิชต์ สายแก้ว, ประภัสสร รัตนไพบูลย์, กิตติกร สาสุจิตต์, เสริมสุข บัวเจริญ, นงเยาว์ หอมดวง, ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล และ ชูรัตน์ ธารารักษ์ (2564). การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสสำหรับการใช้งานผลิตความร้อนถ่านชีวภาพ. *วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน*, 4(1), 47–53.
- ปกรณ อุ่นไธสง และ รชต มณีโชติ. (2562). การสร้างเครื่องและหาประสิทธิภาพถ่านอัดแท่งจากฝักราชพฤกษ์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*, 7(2), 147–157.
- ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์, ศิริวรรณ แก้วswing และ อมรประภา ทิศกระโทก. (2563). การผลิตถ่านชีวภาพและเชื้อเพลิงเขียวจากเปลือกทุเรียน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 39(5), 580–586.
- พลชัย ขาวนวล, สมบูรณ์ ประสงค์จันทร์ และ สุนารี บดีพงศ์. (2563). การพัฒนาสมรรถนะเตาชีวมวลชนิด TLUD ระดับครัวเรือน. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ*, 14(1), 52–62.

- ภราภรณ์ เหล็กสูงเนิน, วรชาติ วิศว์พัฒน์ และ ดาวจรัส เกตุโรจน์. (2560). ผลการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบต่อสภาพการละลายจุลธาตุอาหารพืชและการเจริญเติบโตของข้าวที่ปลูกในดินเหนียว. *วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์*, 4(3), 65–74.
- เยาวพล ชุมพล และ โฉมยง ไชยอุบล. (2564). ผลของถ่านไม้มะม่วงชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดข้าวเหนียว. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*, 9(1), 113–125.
- พิมพ์พรรณ อัมพันธ์ทอง, เสริมศิริ ปราบเสร็จ และ ลลิตพัทธ์ สุขเรื่อน. (2564). การพยากรณ์ก๊าซที่เกิดจากการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*, 9(1), 31–46.
- ASTM D3174-12. (2018). *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Retrieved October 26, 2022, from www.astm.org.
- Garcia-Maraver, A., Perez-Jimenez, J. A., Serrano-Bernardo, F., & Zamorano, M. (2015). Determination and comparison of combustion kinetics parameters of agricultural biomass from olive trees. *Renewable Energy*, 83, 897–904.
- Jugjai, S., & Polmart, N. (2003). Enhancement of evaporation and combustion of liquid fuels through porous media. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27(8), 901–909.
- Kamal, M. (2008). Parametric study of combined premixed and non-premixed flame coal burner. *Fuel*, 87(8–9), 1515–1528.
- Koppejan, J., & Van Loo, S. (2012). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge.
- Laphirattanakul, P., Charoensuk, J., Turakarn, C., Kaewchompoo, C., & Suksam, N. (2020). Development of pulverized biomass combustor with a pre-combustion chamber. *Energy*, 208, 118333.
- Nishiyama, A., Shimojima, H., Ishikawa, A., Itaya, Y., Kambara, S., Moritomi, H., & Mori, S. (2007). Fuel and emissions properties of Stirling engine operated with wood powder. *Fuel*, 86(15), 2333–2342.

- Rasoulkhani, M., Ebrahimi-Nik, M., Abbaspour-Fard, M. H., & Rohani, A. (2018). Comparative evaluation of the performance of an improved biomass cook stove and the traditional stoves of Iran. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 438–443.
- Riaza, J., Gibbins, J., & Chalmers, H. (2017). Ignition and combustion of single particles of coal and biomass. *Fuel*, 202, 650–655.
- Saeed, M. A., Andrews, G. E., Phylaktou, H. N., & Gibbs, B. M. (2017). Flame speed and Kst reactivity data for pulverised corn cobs and peanut shells. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 880–887.
- Sousa, N., & Azevedo, J. L. (2016). Model simplifications on biomass particle combustion. *Fuel*, 184, 948–956.
- Stephen, R. T. (2000). *An introduction to combustion: concepts and applications*. McGraw-Hill Companies, Inc.