

คุณลักษณะการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดิซ์เบด Combustion characteristics of Palm Shell in a Vortex-Fluidized Bed Combustor

ฐานิตย์ เมธิยานนท์^{1,*} และ ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์

^{1,2} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย
เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

*ติดต่อ: E-mail: thanid_m@yahoo.com, 029883655 ต่อ 3107

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอคุณลักษณะการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดิซ์เบด (VFBC) ที่ใช้ทรายเป็นเบด ตลอดจนสมรรถนะการเผาไหม้ในแง่ของประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน (η_c) และแก๊สไอเสียที่ทางออกเตา การทดลองได้ปรับเปลี่ยนความเร็วอากาศทุติยภูมิ (V_2) คือความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดิซ์ชันที่ 0.38, 0.45, 0.50 และ 0.60 m/s ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (λ_{total}) ในช่วง 1.88-2.40 ผลการวัดอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนภายในเตาบ่งชี้ว่าการเผาไหม้หลักเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ใต้วงแหวนวอร์เทค ในขณะที่การเพิ่มความเร็วอากาศส่วนนี้ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดลง ในแง่ขององค์ประกอบแก๊สเสียที่ปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน 6% ที่ทางออกพบว่า CO มีค่าในช่วง 49-157 ppm ในขณะที่ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้น V_2 ซึ่งมีค่าในช่วง 198-249 ppm นอกจากนี้ η_c ทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสูงกว่า 99% ตลอดจนพบว่า V_2 ที่เหมาะสมในแง่ของการปลดปล่อย NO_x ในการศึกษานี้คือ 0.38 m/s

คำหลัก: กะลาปาล์ม; แก๊สเสีย; ฟลูอิดิซ์เบด; วอร์เทค

Abstract

This paper presents the combustion characteristics of palm shell fired in the vortex-fluidized bed combustor (VFBC) using sand as the bed. The combustor performances, in terms of carbon conversion efficiency (η_c) as well as gas emissions were also presented. In this study, the secondary air velocity, also called fluidizing air velocity (V_2), was varied at 0.38, 0.45, 0.50 and 0.60 m/s, corresponding to the excess air ratio (λ_{total}) in the range of 1.88-2.40. The temperature and O_2 profiles along the combustor height implied that main combustion took place beneath the vortex ring, while increasing V_2 was responsible for a drop in temperature along the combustor height. In view of gas emissions corrected to 6% O_2 , CO were low ranging 49-157 ppm. However, NO_x ranged 198-249 ppm seemed to increase with the increased V_2 . Moreover, the η_c for all conditions were satisfied, mostly >99%. The results concluded that the optimum V_2 in terms of NO_x emission was 0.38 m/s.

Keywords: Emissions; Fluidized bed; Palm shell; Vortex

AEC-85

1. บทนำ

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานรูปแบบหนึ่งที่มีความยั่งยืน นอกเหนือจากพลังงานหมุนเวียนจำพวก ลม และแสงอาทิตย์ โดยศักยภาพของพลังงานชีวมวลในประเทศไทยนั้นมีค่าสูงถึง 504,339 TJ หรือเทียบเท่า 11,940 ktoe [1] ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนำชีวมวลที่เหลือจากกระบวนการเกษตรกรรมหรือการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร อาทิเช่น แกลบ ชานอ้อย และใยผลปาล์มมาใช้เป็นเชื้อเพลิงป้อนให้แก่หม้อไอน้ำของโรงงานเพื่อผลิตไอน้ำหรือไฟฟ้าสำหรับใช้ในโรงงาน เทคโนโลยีการแปลงพลังงานที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูง ปลอดภัยมลพิษต่ำ และมีความยืดหยุ่นในการใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้หลากหลายชนิดคือ การเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด [2-5] โดยตั้งแต่อดีตที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ ด้วยเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบนี้ เช่น แกลบ [4-6] ฟางข้าว [7] เปลือกมะกอก [8] เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของคณะผู้วิจัยที่ได้ทำการศึกษาศึกษาการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบด (VFBC) ซึ่งเป็นเตาเผาไหม้ที่รวมลักษณะเด่นของของเผาไหม้สองชนิดเข้าด้วยกัน คือ เตาเผาไหม้ไซโคลนและเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธซ์เบด ซึ่งได้ทำการศึกษาทั้งการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเดี่ยวและการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินในกรณีที่ไม่ใช้ทรายเป็นอนุภาคเบด หรือแม้กระทั่งกรณีที่ใช้ทรายเป็นอนุภาคเบดอีกด้วย ซึ่งในทุกการศึกษามีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ค่อนข้างสูง (>96%) และส่วนใหญ่มีการปลดปล่อยแก๊สพิษ (CO และ SO₂) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน [9-13]

อย่างไรก็ดี กะลาปาล์มซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มเป็นชีวมวลอีกชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานในเตาเผาไหม้แบบตะกั่วของโรงงานน้ำมันปาล์มและหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไธซ์เบด แต่ยังไม่เคยนำมาใช้กับเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบด ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาศึกษาการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาไหม้

วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบด (VFBC) ที่ใช้ทรายเป็นเบด โดยได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของความเร็วอากาศ ทูติงมุมหรืออากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไธซ์เบดที่มีต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของการเผาไหม้ ซึ่งพิจารณาถึงลักษณะการเผาไหม้ องค์ประกอบของแก๊สไอเสีย และประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน โดยทุกเงื่อนไขการทดลองจะควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและความเร็วอากาศในส่วนอื่นๆ ไว้คงที่ แต่จะปรับเปลี่ยนเพียงความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไธซ์เบดเท่านั้น

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบด (VFBC)

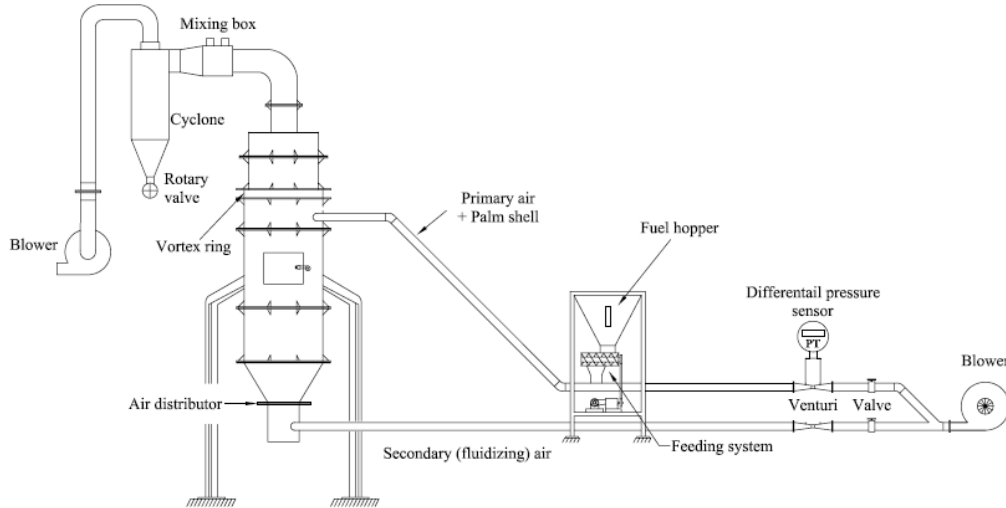
รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบด (VFBC) โดยเตาเผาไหม้ VFBC ที่ใช้ในการทดลองนั้นถูกออกแบบโดยรวมเอาลักษณะเด่นของเตาเผาแบบไซโคลนคือ การเผาไหม้แบบหมุนวนหรือวอร์เทคและการเผาไหม้อนุภาคแขวนลอยในอากาศของเตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบดเข้าด้วยกัน จึงทำให้เตาเผาชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง ขนาดของเตา VFBC คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาไหม้เท่ากับ 40 cm และสูง 165 cm โดยลักษณะของเตาเผาไหม้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2 คือส่วนที่หนึ่งเป็นรูปทรงกรวยหงายตัดยอดสูง 30 cm โดยที่ห้องเผาไหม้ทรงกระบอกจะมีการติดตั้งวงแหวนวอร์เทคซึ่งมีขนาดช่องเปิดของรูเท่ากับ 24 cm โดยวงแหวนวอร์เทคนี้จะช่วยในการดักอนุภาคเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมด ให้ตกลงมายังเบดซึ่งจะสามารถเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้ ส่วนด้านล่างของเตาเผาที่เป็นกรวยหงายนั้นจะเป็นส่วนรองรับอนุภาคเบดและเชื้อเพลิงในขณะเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด ซึ่งมีการติดตั้งตัวกระจายอากาศแบบหัวฉีดไว้ด้านล่างสุด สำหรับการจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ อากาศปฐมภูมิ (primary air) เป็นอากาศส่วนที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสกับผนังเตาพร้อมกับกะลาปาล์มที่ตำแหน่งใต้วงแหวนวอร์เทค

AEC-85

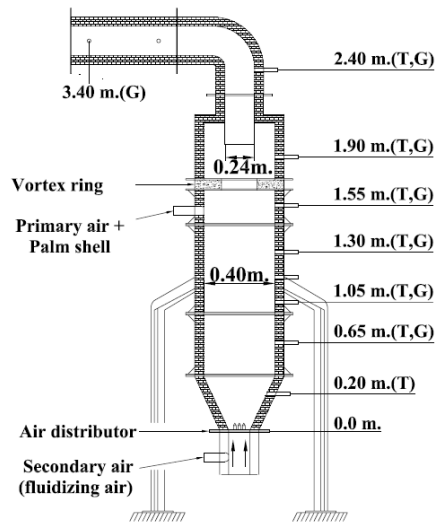
และอากาศหุดิยภูมิหรืออากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิโด-เซชันซึ่งถูกจ่ายเข้าบริเวณด้านล่างของเตาผ่านตัวกระจายอากาศแบบหัวฉีด นอกจากนี้ ในการทดลองได้ใช้ทรายขนาด 300 μm ปริมาณ 13 kg ซึ่งคิดเป็น

ความสูงเบตประมาณ 13 cm เป็นอนุภาคเบตเพื่อให้เกิดฟลูอิโดเซชัน

2.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง
เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือกะลาปาล์มซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิโดเซชันเบต



รูปที่ 2 ขนาดเตาเผาไหม้ VFBC ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและแก๊สไอเสียในการทดลอง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงกะลาปาล์ม (as received)

Proximate analysis (wt.%)		Ultimate analysis (Wt.%)	
Fixed carbon	19.28	Carbon	44.48
Volatile matter	68.35	Hydrogen	5.31

AEC-85

Moisture	9.79	Oxygen	37.46
Ash	2.58	Nitrogen	0.36
Higher heating value (MJ/kg)	19.03	Sulphur	0.02

2.3 ขั้นตอนการทดลอง

การวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้เวนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ ของย่านการวัด การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงกะลาปาล์มจะใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ขับสกรูป้อนเชื้อเพลิง ส่วนการวัดอุณหภูมิ (T) ในการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลซึ่งมีความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการวัดจำนวน 7 ตำแหน่งคือ 0.20, 0.65, 1.05, 1.30, 1.55, 1.90 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ และที่คอเตาเผาไหม้ (ระดับ 2.40) ดังรูปที่ 2 สำหรับในการวัดความเข้มข้นของแก๊ส (G) ภายในเตาคือ O_2 , CO และ NO_x ที่ระดับความสูงต่างๆ คือ 0.65, 1.05, 1.30, 1.55, 1.90, 2.40 m และที่ท่อทางออกเตา (3.40 m) นั้นได้ใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย Testo 350XL ซึ่งสามารถวัดแก๊ส O_2 , CO และ NO_x ด้วยเซนเซอร์ชนิดเซลล์เคมี ส่วน CO_2 ที่แสดงนั้น ได้มาจากการคำนวณย้อนกลับจากปริมาณ O_2 ที่ได้จากเครื่องวัด สำหรับประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน (Carbon conversion efficiency; η_c) นั้นหาได้จากการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ภายในถ้ำที่ติดจากไซโคลนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุ Leco CHNS932

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการปรับความเร็วลมที่ใช้ของอากาศส่วนต่างๆ ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลองตามตารางที่ 2 จากนั้นทำการจุดเตาเผาไหม้โดยเริ่มบรรจุทรายปริมาณ 13 kg เข้าสู่เตาเผาไหม้แล้วให้ความร้อนกับทรายด้วยถ่านไม้ติดไฟแล้ว จนอุณหภูมิในเตาสูงขึ้นถึง $400\text{-}500^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่กะลาปาล์มสามารถเกิดการลุกไหม้ตัวเองได้ หลังจากนั้นจึงเริ่มป้อนกะลาปาล์มเข้าสู่เตาเผาไหม้ เมื่อสภาวะการทำงานของเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60-90 นาทีแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าต่างๆ

ดังนี้คือ อุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาและความเข้มข้นของแก๊สต่างๆ (O_2 , CO, NO_x) ที่ระดับความสูงต่างๆ (ดังรูปที่ 2: T=อุณหภูมิ, G=แก๊ส) รวมถึงการวัดปริมาณถ้ำที่ติดได้จากไซโคลน (เก็บทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 15 นาที) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ โดยข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน ได้ตามสมการที่ (1)

$$\eta_c = \left[1 - \frac{C_{ub}}{C_{fuel}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

โดย

C_{ub} = สัดส่วนคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ในถ้ำลอยที่ติดได้ต่อหนึ่งกิโลกรัมเชื้อเพลิง ($\text{kg}_{C_{ub}}/\text{kg}_{Fuel}$)

C_{Fuel} = สัดส่วนคาร์บอนต่อหนึ่งกิโลกรัมเชื้อเพลิง ($\text{kg}_C/\text{kg}_{Fuel}$)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

Testing conditions	Run number			
	1	2	3	4
Primary air velocity (m/s)	22.35			
Primary excess air ratio (λ_1)	0.99			
Fluidizing air velocity (m/s)	0.38	0.45	0.50	0.60
Secondary excess air ratio (λ_2)	0.89	1.05	1.17	1.40
Excess air ratio (λ_{total})	1.88	2.05	2.16	2.40
Palm shell feed rate (kg/h)	12.42			

3. ผลการทดลอง

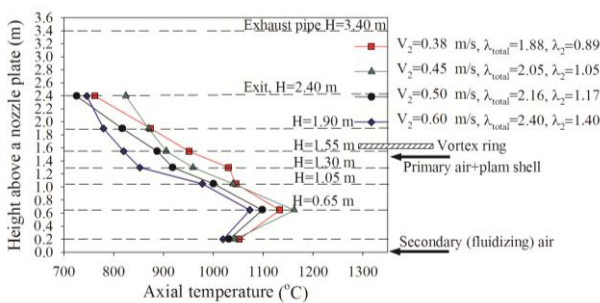
3.1 การกระจายอุณหภูมิในแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้

รูปที่ 3 แสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้ในแต่ละระดับความสูงของเตาเผาไหม้ VFBC โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาแต่ละเงื่อนไขการทดลองมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ มีอุณหภูมิเบด (ระดับ 0.2 m)

AEC-85

ในช่วง 1010–1050°C และมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นที่ระดับ 0.65 m ในช่วง 1050–1160°C หลังจากนั้นจึงลดลงตามความสูงของเตา โดยมีอุณหภูมิที่ทางออกเตา (ระดับ 2.4 m) ในช่วง 740–850°C ซึ่งมีแนวโน้มที่ลดลงตามการเพิ่มความเร็วก๊าซที่ก่อให้เกิดฟลูอิดิเซชันที่เพิ่มขึ้น

ผลการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าในทุกเงื่อนไขการทดลองมีอุณหภูมิในเบดที่สูงกว่า 1000°C นั้นบ่งบอกได้ถึงความหนาแน่นในการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งมีปริมาณคาร์บอนเสถียร (Fixed carbon) ประมาณ 19.3%wt. ภายในเบด ภายใต้อัตราส่วนอากาศส่วนเกินทุดิถุมิ ($[A_2/F]_{act}/[A_{total}/F]_{th}$; λ_2) ที่ใช้ในช่วง 0.89–1.40 ส่วนการเพิ่มความเร็วก๊าซทุดิถุมิซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิเบด (0.2 m) ลดต่ำลง มีสาเหตุมาจากการถ่ายเทความร้อนของเบดไปยังอากาศที่ไหลผ่านเบดเพิ่มมากขึ้น สำหรับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ระดับเหนือเบด (ระดับ 0.65 m) นั้นเกิดจากการเผาไหม้อย่างรุนแรง ของสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาขณะเคลื่อนตัวลงมาพร้อมกับอากาศปฐมภูมิซึ่งมีอัตราส่วนอากาศส่วนเกินปฐมภูมิ ($[A_1/F]_{act}/[A_{total}/F]_{th}$; λ_1) 0.99 หรือประมาณค่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี ซึ่งทำให้ไม่สามารถเผาไหม้สารระเหยได้อย่างสมบูรณ์ด้วยอากาศปฐมภูมิเพียงลำพังสำหรับแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิที่ระดับความสูง 0.65–2.4 m นั้น บ่งชี้ว่าอากาศส่วนเกินที่จ่ายเข้าไปในเตาได้เข้าไปผสมกับแก๊สเผาไหม้ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดต่ำลง นอกจากนี้ การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาเผาไหม้อาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้อง



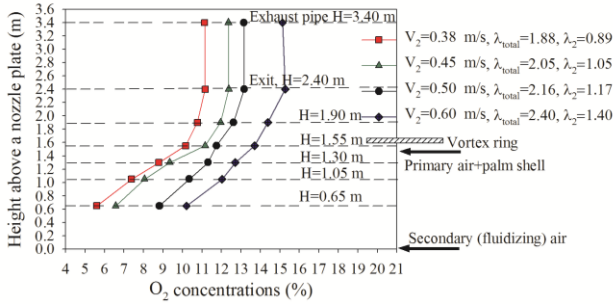
รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตา VFBC

3.2 การกระจายตัวของแก๊สภายในเตาตามระดับความสูง

การกระจายความเข้มข้นของแก๊สเผาไหม้ชนิดต่างๆ คือออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์และออกไซด์ของไนโตรเจน (O_2 , CO และ NO_x) ในแนวกึ่งกลางเตาในแต่ละระดับความสูงจากการเผาไหม้กะลาปาล์มภายใต้ความเร็วก๊าซทุดิถุมิต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-6 โดยพบว่าภายใต้การทดลองแต่ละเงื่อนไขการกระจายความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน

รูปที่ 4 แสดงการกระจายความเข้มข้นของ O_2 ภายในเตา โดยพบว่าความเข้มข้นของ O_2 มีค่าต่ำหลังจากไหลผ่านเบดที่ระดับความสูง 0.65 m ในช่วง 5.6–10.2% (ที่ระดับต่ำกว่า 0.65 m ไม่สามารถวัดค่าได้) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงระดับความสูง 0.65–1.90 m โดยมีความเข้มข้นที่ทางออกเตา (2.4 m) ในช่วง 11.2–15.2% ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณอากาศทุดิถุมิส่งผลให้อัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวม (λ_{total}) เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความเข้มข้น O_2 มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของ O_2 อย่างรวดเร็วในช่วงระดับความสูง 0.65–1.55 m นั้นมีสาเหตุมาจากการจ่ายอากาศปฐมภูมิที่ระดับความสูง 1.35 m อย่างไรก็ดี หลังจากระดับความสูง 1.35 m นั้นการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ O_2 ลดน้อยลงเนื่องจากเกิดการผสมกับอากาศปฐมภูมิบางส่วนที่หลุดลอยผ่านวงแหวนวอร์เท็กซ์ขึ้นมาพร้อมกับแก๊สเผาไหม้ อย่างไรก็ดี เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยเดิมที่ผ่านมาซึ่งทดลองเผาไหม้แกลบนั้น [13] พบว่าลักษณะการกระจาย O_2 มีความแตกต่างกัน คือ O_2 ที่ระดับเหนือเบด (0.65 m) มีค่าสูงกว่ากะลาปาล์มซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่ากะลาปาล์มเกิดการเผาไหม้ภายในเบด มากกว่าเชื้อเพลิงแกลบ

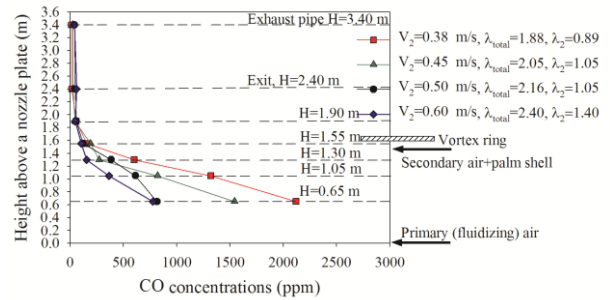
AEC-85



รูปที่ 4 การกระจายตัวของ O₂ แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูง

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ CO แสดงดังรูปที่ 5 โดยพบว่า CO มีความเข้มข้นสูงในช่วง 787–2120 ppm ที่บริเวณเหนือเบตระดับความสูง 0.65 m และมีค่าลดลงตามความสูงเตาที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงทางออกเตา (ที่ระดับ 2.4 m) ซึ่งเหลือเพียง 16–60 ppm โดยการลดลงของความเข้มข้นของ CO ตามความสูง แสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องของแก๊สเผาไหม้ขณะไหลจากเบตขึ้นสู่ทางออกเตา ทั้งนี้ เป็นที่น่าสังเกตว่าความเข้มข้นของ CO ลดต่ำลงอย่างรวดเร็วซึ่งมีค่าต่ำกว่า 200 ppm ที่ระดับความสูง 1.55 m โดยมีเหตุผลหลักอยู่ 2 ประการคือ 1) การจ่ายอากาศปฐมภูมิในลักษณะหมุนวนซึ่งจะสร้างให้เกิดลักษณะการไหลปั่นป่วนและเป็นผลให้เกิดการคลุกเคล้าของ O₂ และ CO ในการทำปฏิกิริยาที่ดีขึ้น และ 2) การติดตั้งวงแหวนวอร์เทคก็ช่วยทำให้เกิดการไหลวนของแก๊สเผาไหม้บริเวณด้านล่างของวงแหวนแล้วเป็นผลให้เกิดการผสมกันของ O₂ และ CO ที่ดียิ่งขึ้น [9-13] อย่างไรก็ตาม การลดลงของความเข้มข้น CO นั้นน่าจะเป็นผลมาจากการเจือจาง (Dilution) อันเนื่องมาจากการปรับเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้แบบกลบในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความเข้มข้นของ CO ภายในเตาที่ระดับ 0.65 m ของกรณีเผาไหม้กะลาปาล์มนั้นมีค่าสูงกว่ากลบอย่างเห็นได้ชัด [13] ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้กะลาปาล์มเกิดขึ้นในเบตมากกว่าเชื้อเพลิงกลบซึ่งมักจะลอยขึ้น

ไปเผาไหม้ในช่วงความสูงเหนือเบตจนถึงตำแหน่งการจ่ายเชื้อเพลิง (ระดับ 0.65–1.35 m)

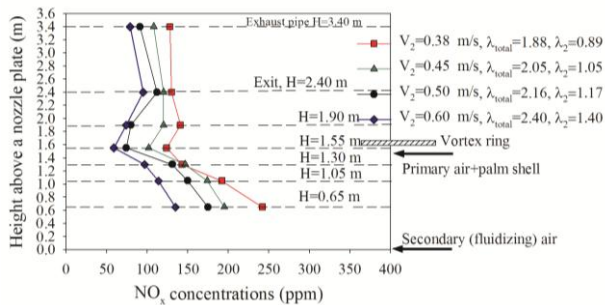


รูปที่ 5 การกระจายตัวของ CO แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูง

การกระจายความเข้มข้นของ NO_x แสดงดังรูป 6 โดยพบว่า NO_x มีค่าสูงสุดที่บริเวณเหนือเบต (ระดับ 0.65 m) ในช่วง 135-242 ppm และมีแนวโน้มต่ำลงตามระดับความสูงเตา โดยเฉพาะที่ระดับ 1.40 m ซึ่งมีการจ่ายปฐมภูมิเข้าสู่เตา ส่วนที่ระดับสูงกว่า 1.90 m ขึ้นไปความเข้มข้นของ NO_x ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปจนถึงทางออกเตาซึ่งมีค่าในช่วง 79-128 ppm โดยสาเหตุที่ทำให้ NO_x ที่ระดับ 0.65 m มีความเข้มข้นสูงคือการทำปฏิกิริยาเนื้อเดียวของสารระเหย ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากชีวมวลในรูป NH₃ กับ O₂ ภายใต้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง (900-1000°C) ตามปฏิกิริยาเคมีคือ $NH_3^{+O, +OH} \rightarrow NH_2^{+O_2, +OH, +O} \rightarrow NO$ รวมไปถึงการเกิดปฏิกิริยาเนื้อผสม (Heterogeneous reaction) ระหว่างไนโตรเจนในเชื้อเพลิงกับ O₂ [14-15] ส่วนความเข้มข้นของ NO_x ที่ลดลงตามความสูงและการเพิ่มความเร็วอากาศปฐมภูมิดังรูปนั้น น่าจะเป็นผลมาจากการเจือจางด้วยปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ มีประเด็นที่น่าสนใจคือ ในกรณีการเผาไหม้กะลาปาล์มนั้น ถึงแม้จะทำการจ่ายอากาศทุติยภูมิให้มีสัดส่วนที่ต่ำกว่าสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี ($\lambda_2 = 0.89$) เพื่อที่จะสร้างสภาวะรีดิวซ์ในเบตตามหลักการลด NO_x ด้วยวิธีการจ่ายอากาศแบบขั้น (Air staging) แล้วก็ตาม แต่ความเข้มข้นของ NO_x ยังคงมีค่าสูง ซึ่งคาดว่าเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารระเหยของกะลาปาล์มซึ่งมีสัดส่วนมากถึง

AEC-85

68% กับ O_2 บริเวณเหนือเบต จึงทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาการสลาย NO_x ด้วยอนุภาคถ่านในเบต



รูปที่ 6 การกระจายตัวของ NO_x แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูง

3.3 องค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่ทางออก

องค์ประกอบแก๊สไอเสียต่างๆ คือ O_2 , CO และ NO_x ที่ทางออกเตาเผาไหม้ภายใต้การปรับเปลี่ยนความเร็วอากาศชุดฤกษ์มิแสดงได้ดังรูปที่ 7 โดยพบว่าการเพิ่มความเร็วอากาศส่วนนี้ส่งผลให้ปริมาณ O_2 เพิ่มขึ้นจาก 11.17 เป็น 15.28 % ดังรูปที่ 7(ก) ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (λ_{total}) จาก 1.88 เป็น 2.40 ส่วนความเข้มข้นของแก๊ส CO ที่ระดับ O_2 ส่วนเกิน 6% นั้นพบว่ามีค่าในช่วง 90-157 ppm โดย CO จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศส่วนฤกษ์มิจาก 0.38 เป็น 0.45 m/s ซึ่งสอดคล้องอัตราส่วนอากาศส่วนเกินฤกษ์มิ (λ_2) ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.89 เป็น 1.05 ดังรูปที่ 7(ข) การเพิ่มขึ้นของความเร็วนี้ส่งผลให้ปริมาณอากาศเผาไหม้เพิ่มมากขึ้นและเกิดการคลุกเคล้าเชื้อเพลิงในเบตดีขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น แต่หากเพิ่มความเร็วจนสูงขึ้นจะส่งผลให้ CO มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วแก๊สเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นซึ่งให้ระยะเวลาการเผาไหม้ในเตาสั้นลง ทั้งนี้ ทุกเงื่อนไข

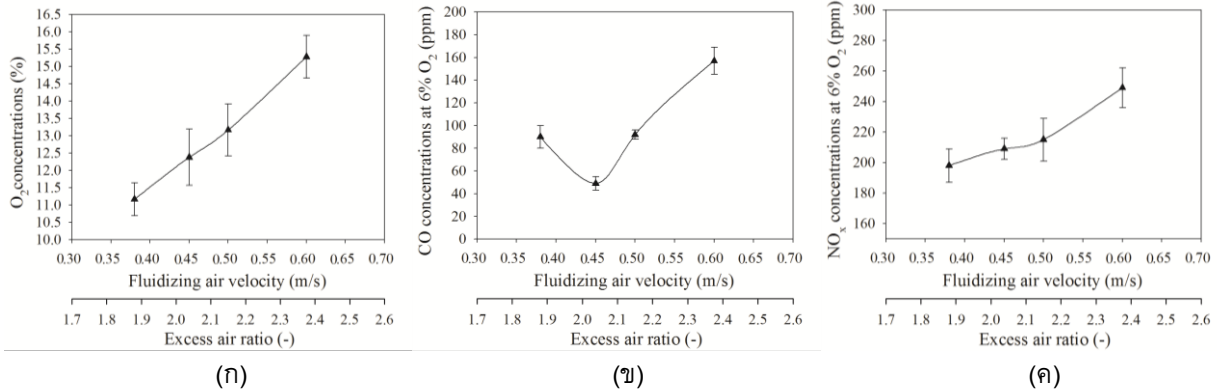
การทดลองมีค่า CO อยู่ในมาตรฐานการปลดปล่อยแก๊สมลพิษของประเทศไทย สำหรับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ตามความเร็วอากาศชุดฤกษ์มิดังรูปที่ 7(ค) นั้นพบว่าเมื่อเพิ่มสูงขึ้นตามการปรับเพิ่มความเร็วอากาศโดยมีค่าในช่วง 198 - 249 ppm (ที่ 6% O_2) โดยการเพิ่มขึ้นของ NO_x บ่งชี้ให้เห็นถึงการทำปฏิกิริยาของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงกับอากาศที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณอากาศชุดฤกษ์มิซึ่งแสดงให้เห็นผลกระทบที่เห็นได้ชัดเจนของอากาศส่วนเกินต่อการเกิด NO_x [14-15] อย่างไรก็ตาม ปริมาณ NO_x ที่วัดได้บางเงื่อนไขการทดลองนั้นยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่ 220 ppm (ที่ 6% O_2)

3.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

ในแง่ของสมรรถนะของการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้ VFBC ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอในเทอมของประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนซึ่งหมายถึงสัดส่วนของคาร์บอนที่เหลือในถ้ำลอยจากการเผาไหม้เทียบกับสัดส่วนของคาร์บอนที่มีในเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) นั้นพบว่าสัดส่วนคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ (Unburned carbon) จากการวิเคราะห์ถ้ำลอยมีค่าในช่วง 4.375–7.392% โดยจะมีค่าลดลงตามความเร็วอากาศชุดฤกษ์มิที่เพิ่มขึ้นตามและนำไปคำนวณเป็นประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน (η_c) พบว่าในทุกเงื่อนไขมีค่าสูงกว่า 99% และมีแนวโน้มลดต่ำลงเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศชุดฤกษ์มิจาก 99.72 เหลือ 99.52% ดังตารางที่ 3 ซึ่งคาดว่าเป็นผลของของความเร็วแก๊สที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิภายในเตาที่ต่ำลง

AEC-85

15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



รูปที่ 7 องค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ทางออกเตาภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศทุติยภูมิ

ตารางที่ 3 สัดส่วนคาร์บอนในเถ้าและประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

Run No.	V ₂ (m/s)	Unburned carbon in fly ash (%)	Carbon conversion efficiency; η_c (%)
1	0.38	4.38	99.72
2	0.45	4.12	99.74
3	0.50	5.12	99.67
4	0.60	7.39	99.52

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ตลอดจนสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (VFBC) ซึ่งใช้ทรายเป็นเบดและใช้หัวฉีดกระจายอากาศภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศทุติยภูมิซึ่งเป็นอากาศส่วนที่ก่อให้เกิดฟลูอิดซ์เซชัน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. อุณหภูมิที่สูงและความเข้มข้นของ O₂ ที่เล็กน้อยในช่วงระดับความสูง 0.20 – 0.65 m บ่งชี้ว่าการเผาไหม้หลักเกิดขึ้นในเบด โดยการเพิ่มความเร็วอากาศทุติยภูมิส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดต่ำลงแต่ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น

2. วงแหวนวอร์เทคช่วยจำกัดให้ CO ที่เกิดขึ้นในเบดถูกเผาไหม้ในบริเวณใต้วงแหวนอย่างรวดเร็ว

3. การทำปฏิกิริยาของสารระเหยจากเชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง NH₃ กับ O₂ ที่ตำแหน่ง 0.65 m ภายใต้อุณหภูมิสูงกว่า 900°C เป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของ NO_x มีค่าสูงสุด ส่วนการเพิ่มความเร็วอากาศทุติยภูมิทำให้เกิดการเจือจางของแก๊สเผาไหม้

4. ความเข้มข้น O₂ วัดที่ท่อทางออกมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศทุติยภูมิ ในขณะที่ความเข้มข้น CO ที่ระดับ O₂ ส่วนเกิน 6% มีค่าในช่วง 90-157 ppm ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานในทุกเงื่อนไขการทดลอง

5. ปริมาณ NO_x ที่ท่อทางออก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศทุติยภูมิซึ่งเป็นผลมาจากอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าในช่วง 198 - 249 (ที่ 6% O₂) ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ 220 ppm ในบางเงื่อนไข

6. ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน (η_c) ในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสูงกว่า 99% โดยการเพิ่มความเร็วอากาศส่วนทุติยภูมิมีแนวโน้มทำให้ η_c มีค่าต่ำลงเล็กน้อย

7. เงื่อนไขความเร็วอากาศทุติยภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองในกรณีศึกษาในการพิจารณาในแง่ของการปลดปล่อยมลพิษ (NO_x) ที่ต่ำสุด คือ ความเร็วอากาศที่ 0.38 m/s ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (λ_{total}) ที่ 1.88

AEC-85

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Thailand (2014). *Statistic Data*, URL: <http://www.dede.go.th>, access on 10/06/2014.
- [2] Natarajan, E., Nordin, A., Rao, N., (1998). Overview of Combustion and Gasification of Rice behaviour of rice huskin a bubbling fluidised bed, *Biomass Bioenergy*, 23, pp.171-179.
- [6] Fang, M., Yang, L., Chen, G., Shi, Z., Lou, Z., Cen, K., (2004). Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed, *Biomass Bioenergy*, 85, pp. 1273-82.
- [7] Okasha, F. (2007). Staged combustion of rice straw in a fluidized bed, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 52-59
- [8] Topal, H, Atimtay AT., Durmaz, A., (2003). Olive cake combustion in a circulating fluidized bed, *Fuel*, 82, pp. 132-138
- [9] Madhiyanon, T., Lapirattanakun, A., Sathitruangsak, P., Soponronnarit, S., (2006). A novel cyclonic fluidized-bed combustor (ψ -FBC): Combustion and thermal efficiency, temperature distribution, combustion intensity, and emission of pollutants, *Combustion and Flame*, Vol. 146, pp. 232-245.
- [10] Madhiyanon, M., Sathitruangsak, S., Soponronnarit, S. (2009). Co-combustion of rice husk with coal in a cyclonic fluidized-bed combustor (ψ -FBC), *Fuel*, 88, pp. 132-138

husk in Fluidized bed reactors. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 14, pp. 533-546

[3] Werther, J., Saenger, M., Hartge, U., Ogada, T. and Siagi, Z. (2000). Combustion of agricultural residues, *Energy and Combustion Science.*, Vol. 26, pp. 1-27.

[4] Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Soponronnarits. (2010). Combustion behavior of rice-husk in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC), *Applied Thermal Engineering*, 30, pp. 347-353.

[5] Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., Cabanillas, A., Otero, J. (2002). Combustion

[11] Madhiyanon, M., Sathitruangsak, S., Soponronnarit, S. (2009). Co-firing characteristics of rice husk and coal in a cyclonic fluidized-bed combustor (Ψ -FBC) under controlled bed temperatures, *Fuel*, 90, pp. 2103-112

[12] ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์, ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2011). คุณลักษณะการเผาไหม้แกลบในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดที่ใช้หัวฉีดกระจายอากาศ: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกระบี่

[13] ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์, ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2012). อิทธิพลของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่มีต่อคุณลักษณะการเผาไหม้แกลบในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดที่ใช้ทรายเป็นเบด: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จังหวัดเชียงใหม่

[14] Zevenhoven, R., Kilpinen, P. (2002). Control of pollutants in flue gases and fuel gases. 2nd ed. Finland: Espoo/Turku

[15] Lyngfelt, A. and Leckner, B. (1999) Combustion of wood-chip in circulating fluidized

AEC-85

bed boilers-NO and CO emissions as function of
temperature and air staging, Fuel, Vol. 78, PP.
1065-1072.