

อิทธิพลของการจ่ายอากาศส่วนที่สองแบบหมุนวนที่มีต่อการเผาไหม้เกลบในเตาเผาไหม้
ฟลูอิดซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้นที่ใช้หัวฉีดกระจายอากาศ
Effect of Swirl Secondary Air Injection on Rice Husk combustion in a Short-
Combustion-Chamber Fluidized Bed Combustor Using Nozzle-Type Air Distributor

ฐานิตย์ เหมียนานท์^{1*} ประสาน สติชัยเรืองศักดิ์² และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 51 เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

³ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10400

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของความเร็วอากาศส่วนที่สองได้วงแหวนวอร์เทก ($V_{2,low}$) ที่มีต่อสมรรถนะการเผาไหม้เกลบของเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้นที่ใช้ทรายเป็นเบดและใช้หัวฉีดกระจายอากาศ ในแง่ของแก๊สมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ (E_c) ตลอดจนศึกษาถึงลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเตา ในการทดลองได้ปรับเปลี่ยน $V_{2,low}$ ที่ 10, 15 และ 20 m/s ซึ่งคิดเป็นอากาศส่วนเกิน (EA) 66, 85 และ 102% ตามลำดับ ผลการวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาบ่งชี้ว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเบดมีการคลุกเคล้ากันได้ดี ในขณะที่การเพิ่ม $V_{2,low}$ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดลง ในแง่ขององค์ประกอบแก๊สไอเสียพบว่า CO มีค่าลดลงตาม $V_{2,low}$ ที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าในช่วง 2353-8470 ppm (ที่ 6% O_2) ในขณะที่ NO_x ที่ระดับ O_2 ส่วนเกิน 6% มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่ม $V_{2,low}$ ซึ่งมีค่าในช่วง 358-457 ppm นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่ม $V_{2,low}$ ส่งผลให้ E_c เพิ่มขึ้นจาก 92.7 เป็น 97.71% ตลอดจนพบว่า $V_{2,low}$ ที่ดีสุดในการศึกษานี้คือ 20 m/s

คำหลัก: เกลบ/ แก๊สไอเสีย/ ฟลูอิดซ์เบด/ วอร์เทก

Abstract

This research presents the effect of the lower secondary air velocity ($V_{2,low}$) on combustion performance for firing rice husk, in terms of gas emissions and combustion efficiency (E_c), in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC) using sand as an inert material in the bed, and using a nozzle-type air distributor. The combustion behavior inside the SFBC was also presented. In this study, $V_{2,low}$ varied at 10, 15 and 20 m/s, corresponding to the excess air (EA) of 66, 85, and 102%, respectively. The temperature profiles along the combustor indicated that the well-mixed combustion occurred in the bed, while an increase of the $V_{2,low}$ caused a drop in temperature. In view of gas emissions at 6% O_2 , CO emissions, ranging 2353-8470 ppm, were reduced as the $V_{2,low}$ increased; conversely, more NO_x emissions ranging 358-457 ppm were formed. Moreover, the increase in $V_{2,low}$ was capable of E_c enhancement, rising from 92.7% to 97.7%. The results concluded that the optimum $V_{2,low}$ was 20 m/s.

Keywords: emissions/ fluidized-bed/ rice husk/ vortex

1. บทนำ

เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพในการนำมาใช้ อย่างยั่งยืนในอนาคต เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลไม่ส่งผล ให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น (CO_2 -Neutral) ซึ่งเป็นการ ช่วยลดสภาวะโลกร้อนได้ ปัจจุบันได้มีกรนำชีวมวลชนิดต่างๆ เช่น เกลบ ทะลายปาล์มเปล่า ขี้เลื่อย ช้าง-ข้าวโพด และเศษไม้มาใช้เป็น เชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม

สำหรับวิธีการแปรรูปพลังงานจากชีวมวลนั้นสามารถทำได้ หลายกระบวนการเช่น การเผาไหม้โดยตรง ไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชัน ทั้งนี้ การเผาไหม้โดยตรงเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมสูงสุด เพราะมีประสิทธิภาพสูงและไม่ซับซ้อน โดยเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่

ได้รับการยอมรับในปัจจุบันว่ามีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงและ ปลอดภัยมลพิษน้อยคือการเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์ เบดเนื่องจาก ก่อนข้างสูง [1-3] อย่างไรก็ตาม สิ่งหนึ่งที่สำคัญในการเผาไหม้ เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาไหม้ทุกรูปแบบคือ การจ่ายอากาศเหนือเบด เชื้อเพลิงเพื่อช่วยเผาไหม้สารระเหยที่ปลดปล่อยมาจากเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งอาจมีสัดส่วนมากถึง 60% โดยน้ำหนัก [4] โดยมีงานวิจัย จำนวนหนึ่งได้ศึกษาถึงผลกระทบของการจ่ายอากาศส่วนที่สองเหนือเบดในการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดซึ่งพบว่าการ จ่ายอากาศส่วนที่สองเหนือเบดสามารถจะช่วยเผาไหม้สารระเหยและ แก๊สที่ยังเผาไหม้ได้ (CO , C_xH_y) ได้ดีขึ้น [5-6] นอกจากนี้ ลักษณะการ จ่ายอากาศส่วนที่สองแบบหมุนวนยังส่งผลดีต่อการคลุกเคล้าของแก๊ส

*ผู้ติดต่อ: E-Mail: thanid_m@yahoo.com , เบอร์โทรศัพท์: (662) 9883655 ext. 3107

และอนุภาคเชื้อเพลิงภายในเตาซึ่งจะส่งผลต่อการเผาไหม้ที่ดีขึ้นอีกด้วย

งานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัยที่ได้ศึกษาการเผาไหม้แบบในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธเซดแบบห้องเผาไหม้สั้น (SFBC) ซึ่งไม่ใช่วัสดุเชื้อเพลิงเป็นเบดและติดตั้งใบกวภายในเบดเพื่อป้องกันการเกาะตัวของเชื้อเพลิง [7] ซึ่งผลการศึกษายพบว่าสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบได้ อย่างมีประสิทธิภาพและปลดปล่อยแก๊สมลพิษอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่ทั้งนี้ การไม่ผสมวัสดุเชื้อเพลิงในเบดของเตา SFBC ส่งผลให้เกิด จิตจำกัดในการนำเตาเผาไหม้ตัวนี้ไปประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ที่ไม่สามารถทำให้เกิดสภาวะฟลูอิดไธเซชันหากปราศจากอนุภาคเบด จึงได้ปรับเปลี่ยนการศึกษามาเป็นการใช้ทรายเป็นเบดปริมาณ 6 kg ซึ่ง จำเป็นต้องทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ SFBC

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาผลกระทบความเร็วอากาศส่วนที่สองที่จ่ายได้วงแหวนแบบหมุนวนที่มีต่อสมรรถนะการเผาไหม้แบบของเตาเผาไหม้ SFBC ที่ใช้ทรายเป็นเบด ซึ่งจะพิจารณาถึงลักษณะการเผาไหม้ องค์ประกอบของแก๊สไอเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยในทุกเงื่อนไขการทดลองจะปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและความเร็วอากาศในส่วนอื่นๆ ไว้คงที่แต่จะปรับเปลี่ยนเพียงความเร็วของอากาศส่วนที่สองได้วงแหวนวอร์เทกเท่านั้น

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เตาเผาไหม้ฟลูอิดไธเซดแบบห้องเผาไหม้สั้น

เตาเผาไหม้ฟลูอิดไธเซดแบบห้องเผาไหม้สั้นที่ใช้ในการทดลอง นั้นมีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 1 ลักษณะของเตาเผาไหม้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนดังรูปที่ 2 คือ 1) เตาเผาไหม้ที่เป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเท่ากับ 500 mm และสูง 1525 mm และ 2) ส่วนกรวยซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยอดตัดกรวย 300 mm สูง 500 mm ซึ่งถูกออกแบบสำหรับรองรับอนุภาคเบดและเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมด ผ่นเตาด้านในก่อด้วยอิฐและฉาบด้วยซีเมนต์ทนไฟหนา 125 mm ในส่วนของตัวเตาเผาที่เป็นทรงกระบอกได้มีการติดตั้งแหวนวอร์เทกที่ระดับความสูง 1380 mm (เหนือแผ่นกระจายอากาศ) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูวงแหวนเท่ากับ 300 mm เพื่อดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดที่อาจหลุดลอยขึ้นเมื่อเกิดการฟุ้งกระจายของเชื้อเพลิง

การจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้มีด้วยกันสามส่วนดังนี้คือ 1) อากาศ

ส่วนที่หนึ่งซึ่งเป็นอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไธเซชัน 2) อากาศส่วนที่สองเป็นอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้และช่วยในการดับจับอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดซึ่งมีการจ่ายที่สองระดับความสูงคือระดับเหนือวงแหวนวอร์เทก (vortex ring) ที่ระดับ 1490 mm ซึ่งถูกจ่ายในลักษณะสัมผัสกับผ่นเตาเผาไหม้จำนวน 1 ท่อ และระดับใต้วงแหวนวอร์เทกซึ่งจ่ายในลักษณะทำมุมกับเส้นสัมผัสผ่นเตาที่ 65 องศา จำนวน 4 ท่อ (ระดับ 1030 mm) ซึ่งจะก่อให้เกิดวงแหวนอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm และ 3) อากาศส่วนที่สามเป็นอากาศซึ่งจ่ายเพื่อใช้เผาไหม้และป้องกันการถูกกลืนของไฟที่จะเข้าไปยังถังพักป้อนแบบ

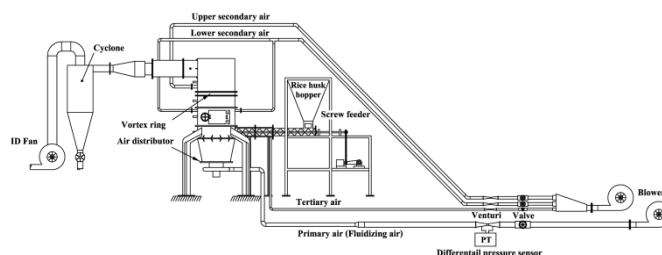
นอกจากนี้ ในการทดลองจะใช้ทรายขนาด 300 ไมครอนเป็นเบดปริมาณ 6 kg และใช้ตัวกระจายอากาศแบบหัวฉีดซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 37 mm สูง 55 mm จำนวน 8 หัวที่ถูกติดตั้งบนแผ่นกระจายอากาศ ในการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาไหม้จะใช้ระบบสกรูป้อน (Screw feeder) เข้าในเบดโดยตรงที่ระดับความสูง 650 mm เหนือแผ่นกระจายอากาศ

2.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

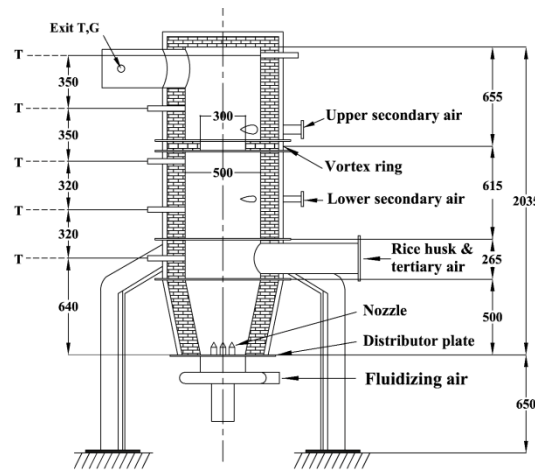
เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือแกลบซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ (as received)

Proximate analysis (wt.%)	
Fixed carbon	20.1
Volatile matter	55.6
Moisture	10.3
Ash	14.0
Ultimate analysis (wt.%)	
Carbon	38.0
Hydrogen	4.55
Oxygen	32.4
Nitrogen	0.69
Sulphur	0.06
Moisture	10.3
Ash	14.0
Higher heating value (MJ/kg)	14.98



รูปที่ 1 โครงสร้างเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธเซดแบบห้องเผาไหม้สั้นที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2 ขนาดเตาและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและแก๊สไอเสียของเตาเผาไหม้ฟลูอิดไสบดแบบห้องเผาไหม้สั้น

2.3 การวัดและขั้นตอนการทดลอง

การวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้เวนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ ของย่านการวัด เป็นอุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศ การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจะใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ขับสกรูป้อนเชื้อเพลิง ส่วนการวัดอุณหภูมิในการทดลองที่ระดับความสูงต่างๆ เหนือแผ่นกระจายอากาศคือ 640, 960, 1280 และ 1630 mm ตลอดจนถึงท่อทางออกเตาจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลซึ่งมีความละเอียด $\pm 1^\circ\text{C}$ ส่วนการวัดองค์ประกอบแก๊สเผาไหม้ที่ท่อทางออกเตานั้นได้ใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สเสีย Testo 350XL ซึ่งสามารถวัดแก๊ส O_2 , CO , และ NO_x ส่วน CO_2 ที่แสดงนั้นได้มาจากการคำนวณย้อนกลับจากปริมาณ O_2 ของเครื่องวัด ส่วนประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตานั้นหาได้จากการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ภายในเตาที่วัดได้จากไซโคลอน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ LECO CHNS 932 ร่วมกับปริมาณ CO ที่วัดได้

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการปรับความเร็วอากาศส่วนต่างๆ ของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ดังตารางที่ 2 จากนั้นทำการจุดเตาเผาไหม้ โดยจะเริ่มใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่ออุ่นให้เตาอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ $700 - 800^\circ\text{C}$ แล้วจึงเริ่มป้อนทรายเข้าสู่เตาเผาไหม้ให้ได้ปริมาณ 6 kg หลังจากนั้นจึงทำการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงด้วยอินเวอร์เตอร์ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลอง เมื่อสภาวะการทำงานของเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60-90 นาทีแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าต่างๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิภายในเตาที่ระดับความสูงต่างๆ (ดังรูปที่ 2) องค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ท่อทางออกเตา และปริมาณเถ้าที่วัดได้จากไซโคลอน (เก็บทุก 30 นาที เป็นเวลา 10 นาที) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ โดยข้อมูลที่ได้อาจจะนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ (E_c) ได้ตามสมการที่ (1) [2, 7-9]

$$E_c = \left[\frac{(E_F - E_a - E_{fg})}{E_F} \right] \times 100\% \quad (1)$$

โดย

E_F = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้ (MJ/kg)

E_a = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในเถ้า (MJ/kg)

E_{fg} = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในแก๊สไอเสียซึ่งคำนวณได้จากปริมาณ CO ค่าความร้อนของ CO (MJ/kg)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลองผลกระทบของความเร็วอากาศส่วนที่สองไว้ตัวแหวนวอร์เทก

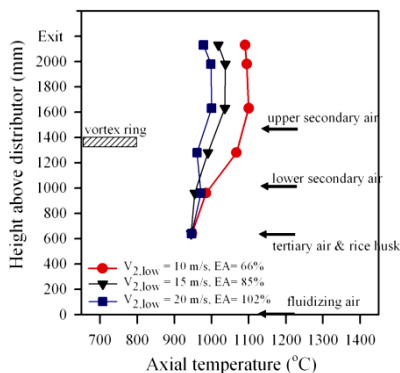
Testing conditions	Run number		
	1	2	3
Fluidizing air velocity (m/s)	1	1	1
Mass fraction (-)	0.570	0.521	0.494
Lower 2 nd air velocity (m/s)	10	15	20
Mass fraction (-)	0.207	0.276	0.314
Upper 2 nd air velocity (m/s)	15	15	15
Mass fraction (-)	0.076	0.069	0.065
Tertiary air velocity (m/s)	4	4	4
Mass fraction (-)	0.147	0.134	0.127
Excess air (%)	66	85	102
Rice husk feed rate (kg/h)	65	65	65

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดลองศึกษาผลกระทบของความเร็วอากาศส่วนที่สองได้วงแหวนวอร์เทค ($V_{2,low}$) ที่จ่ายแบบหมุนวนเพื่อช่วยในการเผาไหม้แกลบในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเซดแบบห้องเผาไหม้สั้น (SFBC) ซึ่งใช้ทรายเป็นเบดปริมาณ 6 kg และใช้ตัวกระจายอากาศแบบหัวฉีด โดยพิจารณาถึงลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเตาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละระดับความสูง ตลอดจนพิจารณาถึงสมรรถนะของการเผาไหม้ในแง่ของประสิทธิภาพการเผาไหม้และองค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ทางออกเตาซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังนี้

3.1 การกระจายอุณหภูมิภายในเตา

รูปที่ 4 แสดงการกระจายอุณหภูมิแนวตั้งกลางเตาที่ระดับต่างๆ ในแต่ละเงื่อนไขการจ่ายอากาศส่วนที่สองแบบหมุนวนเพื่อช่วยเผาไหม้แกลบที่ตำแหน่งใต้วงแหวนวอร์เทคด้วยความเร็ว 10, 15 และ 20 m/s โดยพบว่าอุณหภูมิเบดที่ระดับ 640 mm และ 960 mm เหนือแผ่นกระจายอากาศ ในทุกเงื่อนไขมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงประมาณ 945°C (ที่ระดับ 640 mm) และ 955-971°C (ที่ระดับ 960 mm) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการคลุกเคล้าที่ดี (well mixing) ภายในเบด นอกจากนี้ยังพบว่าการเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงท่อทางออกของเตาเผาไหม้ ทั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่าในกรณีการจ่ายอากาศส่วนที่สองได้วงแหวนวอร์เทคด้วยความเร็ว 10 m/s ส่งผลให้อุณหภูมิที่ระดับ 1280 mm มีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากกรณีนี้ใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ต่ำสุด (EA=66%) จึงทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เกิดขึ้นขณะเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเบดมีปริมาณมาก ซึ่ง CO นี้จะลอยขึ้นมาเผาไหม้กับอากาศส่วนที่สองใต้วงแหวนวอร์เทค (สัดส่วนมวล 0.20) อย่างรุนแรง ในขณะที่เงื่อนไข $V_{2,low}$ เท่ากับ 15 และ 20 m/s (EA=85 และ 102% ตามลำดับ) นั้นอุณหภูมิที่ระดับความสูงเดียวกันเพิ่มขึ้นไม่มากนัก เนื่องจากมวลอากาศส่วนที่สองใต้วงแหวนวอร์เทคซึ่งถูกจ่ายเข้าไปในเตาของทั้งสองเงื่อนไขมีสัดส่วนมวลอากาศที่สูง (0.28-0.31) โดยอุณหภูมิที่ระดับความสูง 1280 mm นี้มีค่าลดลงตามปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นคือ 1067, 990 และ 960°C ตามลำดับ

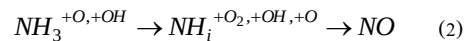


รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิแนวตั้งกลางเตาเผาไหม้

สำหรับระดับเหนือวงแหวนวอร์เทค (1630 mm) พบว่าอุณหภูมิในทุกเงื่อนไขมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระดับใต้วงแหวนวอร์เทค (1000-1100°C) ซึ่งบ่งบอกได้ถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องของ CO ที่หลุดลอยขึ้นมาเผาไหม้กับอากาศส่วนที่สองเหนือวงแหวนวอร์เทค ส่วนที่ระดับความสูงตั้งแต่ 1630 mm จนถึงท่อทางออกเตา อุณหภูมิในทุกเงื่อนไขมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นน้อยลงในช่วงระดับความสูงดังกล่าว โดยอุณหภูมิทางออกที่เงื่อนไขความเร็วอากาศส่วนที่สองได้วงแหวนวอร์เทคที่ 10, 15 และ 20 m/s คือ 1090, 1018 และ 978°C ตามลำดับ

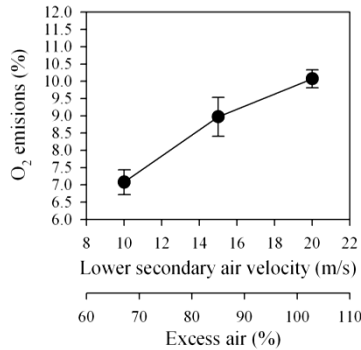
3.2 องค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ทางออกเตา

ผลกระทบของความเร็วอากาศส่วนที่สองได้วงแหวนวอร์เทค ($V_{2,low}$) ที่มีต่อแก๊สไอเสียที่ทางออกเตาคือ ออกซิเจน (O_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 โดยรูปที่ 4(ก) แสดงให้เห็นว่าปริมาณ O_2 มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศส่วนที่สอง (อากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้น) จาก 7.08% เป็น 10.07% ส่วน CO ที่ทางออกเตาภายใต้ O_2 ส่วนเกิน 6% พบว่ามีค่าลดลงตาม $V_{2,low}$ ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังรูปที่ 4(ข) โดยมีค่าลดลงจาก 8470 ppm เหลือ 2353 ppm เนื่องจากอากาศส่วนที่สองนี้มีการจ่ายแบบหมุนวนที่ทำให้เกิดเป็นวงแหวนอากาศซึ่งสามารถช่วยให้ CO ที่เกิดขึ้นอย่างมากในเบดถูกทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น โดยความปั่นป่วนของอากาศในตำแหน่งนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศซึ่งเป็นเหตุผลให้ปริมาณ CO มีค่าลดลง [6] อย่างไรก็ตามปริมาณ CO ที่วัดได้ในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานซึ่งมีค่าเพียง 740 ppm (ที่ 6% O_2) ทั้งนี้ อาจเป็นผลของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ใช้ในการศึกษามีค่าสูงเกินไป (1 m/s) จึงทำให้ความเร็วแก๊สภายในเตามีค่าสูงซึ่งเป็นผลให้ระยะเวลาการเผาไหม้ในเตาสั้นเกินไป ในแง่ของ NO_x พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศส่วนที่สองใต้วงแหวนวอร์เทค โดยเฉพาะกรณีการเพิ่มความเร็วจนจาก 10 m/s เป็น 15 m/s (EA จาก 66% เป็น 85%) ซึ่งเพิ่มจาก 358 เป็น 457 ppm ที่ 6% O_2 ดังรูปที่ 4(ค) ผลที่เกิดขึ้นนี้อธิบายได้จากสารระเหยของแกลบซึ่งมักอยู่ในรูป NH_3 [4, 8-9] ที่ปลดปล่อยมาจากเชื้อเพลิงมาเผาไหม้บริเวณที่มีการจ่ายอากาศส่วนที่สองใต้วงแหวนวอร์เทคตามสมการ (2) และ (3) [8-10]

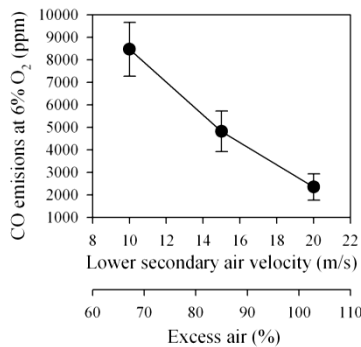


จากสมการทั้งสองแสดงให้เห็นว่าปริมาณ O_2 ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวของ NO_x ดังนั้นการเพิ่ม $V_{2,low}$ จึงเปรียบเสมือนการเพิ่ม O_2 ในการเข้าทำปฏิกิริยาการเกิด NO_x มากขึ้น ส่วนกรณีการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 102% ($V_{2,low} = 20$ m/s) ซึ่งพบว่า NO_x มีการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเงื่อนไขก่อนหน้านี้ ซึ่งอาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากในเงื่อนไขนี้ใช้ปริมาณอากาศมากจนส่งผลให้อุณหภูมิ

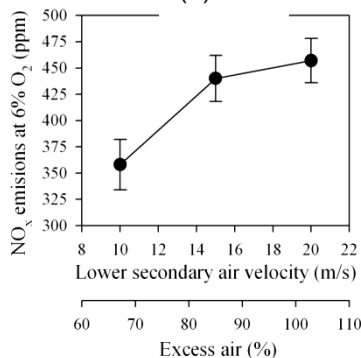
ภายในเตาที่ลดต่ำลง (ดังรูปที่ 4) จนทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ NO_x ลดลง อย่างไรก็ตาม ในทุกเงื่อนไขการทดลองในการศึกษานี้มีค่า NO_x ที่สูงกว่าค่ามาตรฐานสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (215 ppm ที่ 6% O_2) ก่อนข้างมาก ซึ่งต้องหาวิธีการลดปริมาณ NO_x ต่อไป



(ก) O_2



(ข) CO



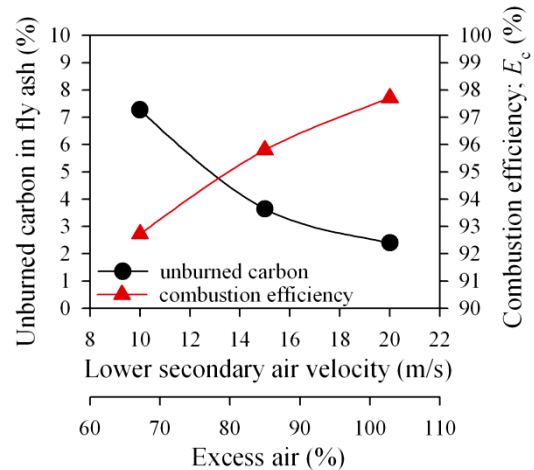
(ค) NO_x

รูปที่ 4 องค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ทางออกเตา
ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

3.3 คาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้

ในแง่ของประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้ SFBC ในการเผาไหม้แกลบที่ใช้ทรายเป็นเบดและใช้หัวฉีดกระจายอากาศในแต่ละเงื่อนไขพบว่า การเพิ่ม $V_{2,low}$ ผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น จาก 92.7% เป็น 97.71% ดังรูปที่ 5 เนื่องจาก $V_{2,low}$ เพิ่มขึ้นนี้ ส่งผลให้แรงเหวี่ยงของวงแหวนอากาศซึ่งช่วยในการดักอนุภาคเชื้อเพลิงที่ยัง

เผาไหม้ไม่หมดให้ตกกลับลงไปที่เผาไหม้ภายในเบดได้เพิ่มมากขึ้น โดยสังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ในเถ้าลอยที่ตกได้จากไซโคลนมีค่าลดลงตามความเร็วอากาศที่เพิ่มขึ้น (จาก 7.27% เป็น 2.40%) นอกจากนี้ การลดลงของปริมาณ CO ที่ทางออกเตา (จาก 8470 เหลือ 2353 ppm) ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ก็เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการเผาไหม้และคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ในเถ้า

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองผลกระทบของความเร็วอากาศส่วนสองได้วงแหวนวอร์เทก ($V_{2,low}$) ที่ใช้ในการเผาไหม้แกลบในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้น โดยใช้ $V_{2,low}$ ในช่วง 10, 15 และ 20 m/s ซึ่งคิดเป็นปริมาณอากาศส่วนเกินได้ 66, 85 และ 102% ตามลำดับ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบมีการคลุกเคล้ากันอย่างดีภายในเบดและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดความสูงเตาเผาไหม้ โดยอุณหภูมิภายในเตามีค่าลดลงตามความเร็วอากาศส่วนสองได้วงแหวนวอร์เทก ($V_{2,low}$) ที่เพิ่มขึ้น

2. การเพิ่ม $V_{2,low}$ ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณ O_2 ในแก๊สไอเสียเพิ่มขึ้นโดยมีค่าในช่วง 7.08-10.07%

3. การเพิ่ม $V_{2,low}$ ส่งผลให้ปริมาณ CO มีค่าลดลง ซึ่งบ่งชี้ว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหนือเบดดีขึ้น โดยปริมาณ CO ลดลงจาก 8470 ppm เหลือ 2353 ppm (ที่ 6% O_2)

4. การเพิ่มความเร็วอากาศส่วนสองได้วงแหวนวอร์เทก ส่งผลให้ NO_x มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะช่วงการเพิ่ม $V_{2,low}$ จาก 10 เป็น 15 m/s ซึ่งเป็นผลจากปริมาณ O_2 ที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารระเหยของแกลบ (จำพวก NH_3) เพิ่มมากขึ้น ขณะที่การเพิ่มขึ้นของ NO_x น้อยลงที่กรณี $V_{2,low}$ เท่ากับ 20 m/s ซึ่งอาจได้รับผลข้างเคียงจากอุณหภูมิภายในเตาที่ลดลง โดย NO_x ในทุกกรณี (358-457 ppm ที่ 6% O_2) มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ 220 ppm ซึ่งต้องหาแนวทางการลดต่อไป

5. การเพิ่ม $V_{2,low}$ ส่งผลให้การคลุกเคล้าของอากาศและอนุภาคเชื้อเพลิงตลอดจนแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้ดีขึ้น ซึ่งดูได้จากปริมาณ CO และคาร์บอนที่ไหม้เผาไหม้ที่ลดลง เป็นผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 92.7 เป็น 97.75% โดยเงื่อนไขความเร็ว $V_{2,low}$ ที่ดีสุดในการศึกษา คือ 20 m/s

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Natarajan, E., Nordin, A., Rao, A.N., 1998. Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors. *Biomass Bioenergy*, Vol. 14, pp. 533-546.
- [2] Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., Cabanillas, A., Otero, J., 2002. Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed. *Biomass Bioenergy*, Vol. 23, pp.171-179.
- [3] Fang, M., Yang, L., Chen, G., Shi, Z., Luo, Z., Cen, K., 2004. Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed. *Fuel Process Technol.*, Vol. 85, pp. 1273-1282.
- [4] Werther, J., Saenger, M., Hartge, EU., Ogada, T., Siagi, Z., 2000. Combustion of agricultural residues. *Prog Energy Combust Sci*, Vol. 26, pp. 1-27.
- [5] Armesto, L., Bahillo, A., Cabanillas, A., Veijonen, K., Otero, J., Plumed, A., Salvador, L., 2003. Co-combustion of coal and olive oil industry residues in fluidised bed. *Fuel*, Vol. 82, pp. 993-1000.
- [6] Varol, M., Atimtay, AT., 2007. Combustion of olive cake and coal in a bubbling fluidized bed with secondary air injection. *Fuel*, Vol. 86, pp. 1430-1438.
- [7] Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Soponronnarit, S., 2010. Combustion behavior of rice-husk in a short-combustion-chamber fluidized -bed combustor (SFBC). *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 347-353.
- [8] Sathitruangsak, S., Madhiyanon, M., Soponronnarit, S., 2009. Rice husk co-firing with coal in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC). *Fuel*, Vol. 88, pp.1394-1402.
- [9] Madhiyanon, M., Sathitruangsak, S., Soponronnarit, S., 2009. Co-combustion of rice husk with coal in a cyclonic fluidized-bed combustor (ψ -FBC). *Fuel*, Vol. 88, pp. 132-138.
- [10] Zevenhoven, R., Kilpinen, P., 2002. Control of pollutants in flue gases and fuel gases. 2nd edition, Finland, Espoo/Turku.