

เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธเบต : Part II ผลกระทบของ อากาศส่วนที่สองต่อสมรรถนะเตา

VORTEXING-FLUIDIZED BED COMBUSTOR (VFBC) : Part II EFFECTS OF SECONDARY AIR ON PERFORMANCE OF COMBUSTOR

ฐานิตย์ เมธิยานนท์¹ นิวัติ ปิริยารุ่งโรจน์² พีระวัตร ทองนอ³ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์⁴

^{1,2}อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 51 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

โทร 02-9883666 ext. 244 หรือ 09-8160456 E-mail: thanid_m@yahoo.com¹

³นักศึกษา ป.โท ⁴อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400 โทร 02-4708693-9 ext. 111 E-mail: somchart.sop@kmutt.ac.th⁴

Thanid madhiyanon¹ Niwat Piriyaungroj²

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University

51 Cheum-Sampan Road, Nong Chok, Bangkok 10530

Peerawat Thongnork³ Somchart Soponronnarit⁴

Faculty of Energy and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi

91 Prachautit Road, Bangmod, Thung Khru District, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

จากการศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนที่สองใน Part I พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) จะแปรผันตรงกับอากาศส่วนที่สอง แต่เมื่ออากาศส่วนที่สองมีค่ามากเกินไป η_{th} ก็จะลดลง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนที่สอง (ซึ่งเป็นอากาศส่วนที่ทำให้เกิดฟลูอิดไธเซชัน) ต่อสมรรถนะเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิดไธเบต โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองซึ่งทำให้ปริมาณอากาศส่วนที่สองเปลี่ยนแปลงไป แต่คงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบจำเพาะ (SFR) อัตราการไหลของอากาศส่วนที่สอง ซึ่งจ่ายมาพร้อมกับเชื้อเพลิงในแนวสัมผัสที่ด้านบนของเตา และอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทค โดยค่า SFR เท่ากับ 240 kg/h-m^3 จากการทดลองพบว่าปริมาณอากาศส่วนที่สองมีผลต่อสมรรถนะของเตาในลักษณะคล้ายคลึงกับการศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนที่สองใน Part I โดยพบว่า η_{th} จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สอง โดยการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สอง แต่หากปริมาณอากาศส่วนที่สองมีค่ามากเกินไปจะทำให้ค่า η_{th} ลดต่ำลง โดยที่ปริมาณอากาศส่วนที่สองเกิน 164% พบว่าเตามีสมรรถนะสูงที่สุด โดยทำให้ได้อุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาสูงสุดเท่ากับ $1,070^\circ\text{C}$ η_{th} เท่ากับ 93% ได้ค่าภาระความร้อนสูงสุดเท่ากับ $0.84 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ปริมาณก๊าซ CO_2 , CO และ NO_x ที่ได้จากการเผาไหม้เท่ากับ 13.8%, 298 และ 4.93 ppm ตามลำดับ (ค่าก๊าซ CO และ NO_x คัดที่ O_2 ส่วนเกินเท่ากับ 7%)

Abstract

In part I, a study which has been investigated the effect of primary air concluded that thermal efficiency was directly proportioned to amount of primary air but if primary air was provided too much, thermal efficiency would be dropped. In this part, the experiment were farther studied to investigate the influence of secondary air (fluidization air) on performance of VFBC by change amount of secondary air while keeping specific fuel rate (SFR), primary air and tertiary air unchanged. SFR was held constant at 240 kg/h-m^3 . The similar trends of experimental results as that of obtaining from part I were also observed in this study, that thermal efficiency increased as an increase of excess air by increasing amount of secondary air but if amount of secondary air was further increased beyond a proper value, Thermal efficiency would be dropped. At excess air of 164%, VFBC perform very well, with maximum exit gas temperature of $1,070^\circ\text{C}$, thermal efficiency of 93% and thermal load of combustor of $0.84 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$. The amount of emission gases, i.e. CO_2 , CO and NO_x were 13.8%, 298 ppm and 4.93 ppm, respectively. (CO and NO_x determined base on excess O_2 of 7%)

1. บทนำ

จากสภาวะในปัจจุบันน้ำมันมีราคาสูงขึ้นมากในสภาวะเศรษฐกิจของไทยในเวลานี้ อันมีสาเหตุมาจากความต้องการใช้น้ำมันมากขึ้น จึงทำให้ธุรกิจต่างๆ ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงต่างๆ เริ่มหาพลังงานชนิดอื่นมาทดแทนน้ำมัน โดยได้มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทชีวมวลที่เหลือใช้จากโรงงานต่างๆ มาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล แกลบเป็นเชื้อเพลิงประเภทชีวมวลอีกอย่างหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนแทนน้ำมันได้ โดยปัจจุบันเตาเผาไหม้ที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีประสิทธิภาพสูง คือ เตาเผาไหม้แบบไซโคลน และเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเบต ซึ่งเตาทั้งสองประเภทนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสียต่างกัน คือเตาไซโคลนจะอาศัยหลักการไหลวนของอากาศซึ่งทำให้อนุภาคภายในเตาไม่หลุดออกนอกเตาได้ ความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางจึงมีค่าน้อย ($H/D = 2.5$) แต่มีข้อเสียคือประสิทธิภาพการเผาไหม้ (65-80%) และค่าภาระความร้อนเตา (0.25 MW/m^3) ค่อนข้างต่ำ [1, 2, 3, 4] ส่วนเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเบต [5, 6, 7] จะออกแบบให้อนุภาคภายในเตาเผาไหม้เกิดฟลูอิดเซชัน ทำให้เกิดการเผาไหม้ทั่วทั้งบริเวณเตา ส่งผลให้ได้ค่าภาระทางความร้อนเตาเผาไหม้ (1 MW/m^3) และประสิทธิภาพการเผาไหม้ (80-95%) สูง แต่มีข้อเสียคือเมื่อนำหลักการนี้ไปใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความหนาแน่นต่ำและรูปร่างไม่กลม จะทำให้เกิดฟลูอิดไคเบตยาก ดังนั้นจำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยเช่น หิน ทราย ซิลิกา อลูมินา ลงไปในเตาเผาไหม้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม [5, 8] เพื่อช่วยให้เกิดฟลูอิดไคเบตได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามการผสมวัสดุเฉื่อยจะทำให้ความดันตกคร่อมในห้องเผาไหม้มีค่าสูง ทำให้การต้องสูญเสียพลังงานมากเพราะต้องใช้พัดลมที่มีขนาดใหญ่ ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ ความสูงของเตาเพราะเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเบตจำเป็นต้องออกแบบให้เตาสูงเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคภายในเตาหลุดลอยออกนอกเตาเผาไหม้ โดยสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาประมาณ 13 ทำให้ได้มีการพัฒนาเพื่อลดความสูงของเตาโดยการฉีดอากาศส่วนที่สองเข้าไปในแนวสัมผัสบริเวณ free board [9, 10, 11] เพื่อดักอนุภาคภายในเตาเผาไหม้ไม่ให้หลุดออกนอกเตา พบว่าสามารถลดความสูงของเตาเผาไหม้ลงได้ และมีการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอนุภาคและก๊าซ [12] เมื่อมีการฉีดอากาศส่วนที่สองในแนวสัมผัส พบว่า บริเวณใกล้ผนังเตาก๊าซและอนุภาคจะมีไหลลงด้านล่างเตาเผาไหม้ ทำให้เกิดการหมุนเวียนภายในเตาส่งผลถึงเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาไหม้นานขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้านำจุดเด่นของเตาเผาไหม้ ทั้งสองแบบมารวมกันจะทำให้มีค่าภาระความร้อน (MW/m^3) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง แต่ในขณะเดียวกันมีค่าสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำ ทำให้ติดตั้งในโรงงานได้สะดวกและ ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งได้ โดยเมื่อนำจุดเด่นของเตาทั้งสองมารวมกันจะได้เป็นเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคเบตขึ้นมา โดยผู้วิจัยได้ออกแบบสร้างเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคเบตจำลอง [13] เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศและแกลบ พบว่าเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคเบตจำลองสามารถรวมคุณลักษณะเด่นของการไหลแบบฟลูอิดไคเบตและแบบวอร์เทคเข้าไว้ด้วยกันได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้ข้อมูลดังกล่าวมาออกแบบเตาเผา VFBC โดย เตาเผา VFBC จะแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสามส่วนคืออากาศ

ส่วนที่หนึ่ง (Primary air) เป็นอากาศที่พาเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่เตาเผาไหม้โดยอากาศส่วนที่หนึ่งและแกลบนี้จะถูกจ่ายในแนวสัมผัสตั้งฉากกับรัศมีของเตาที่ตำแหน่งด้านบนของเตา เพื่อให้เกิดการเผาไหม้แบบวอร์เทค อากาศส่วนที่สอง (Secondary air) เป็นอากาศที่จ่ายที่ตำแหน่งด้านล่างของเตาเพื่อทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคเบต และอากาศส่วนที่สาม (Tertiary air) เป็นอากาศที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสตั้งฉากกับรัศมีของเตาที่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทคโดยวงแหวนวอร์เทคจะคั่นระหว่างห้องเผาไหม้ทั้งสอง เพื่อเพิ่มการหมุนวนของอากาศและเชื้อเพลิงเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่ยังไม่เผาไหม้ไม่หลุดออกนอกเตา ส่งผลให้เวลาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตามีมากขึ้น โดยสัดส่วนของเตาและอุปกรณ์ต่างๆ แสดงในรูปที่ 1(a) และ 2 และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคเบตสำหรับเชื้อเพลิงแกลบ [18] โดยศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่สามที่มีผลต่อการเผาไหม้ซึ่งจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา จะขึ้นกับปริมาณอากาศส่วนเกินเป็นหลัก โดยปริมาณอากาศส่วนที่สามจะไม่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา ตราบที่ปริมาณอากาศส่วนเกินรวมที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมดเหมาะสม แต่การจ่ายอากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 1000 องศาเซลเซียส โดยโครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่อง โดยจะทำการศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่สองที่มีผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของเตาเผา VFBC

2. วิธีการทดลอง

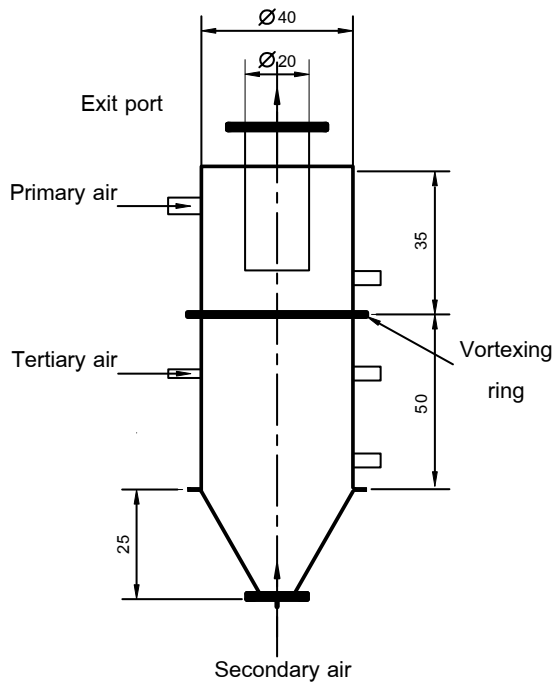
2.1 การศึกษาถึงการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สองที่มีผลต่อการเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคเบต

เตรียมอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการติดตั้งเตาเผาโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงและอุณหภูมิเตาอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ประมาณ 600°C จึงเริ่มทำการทดลอง

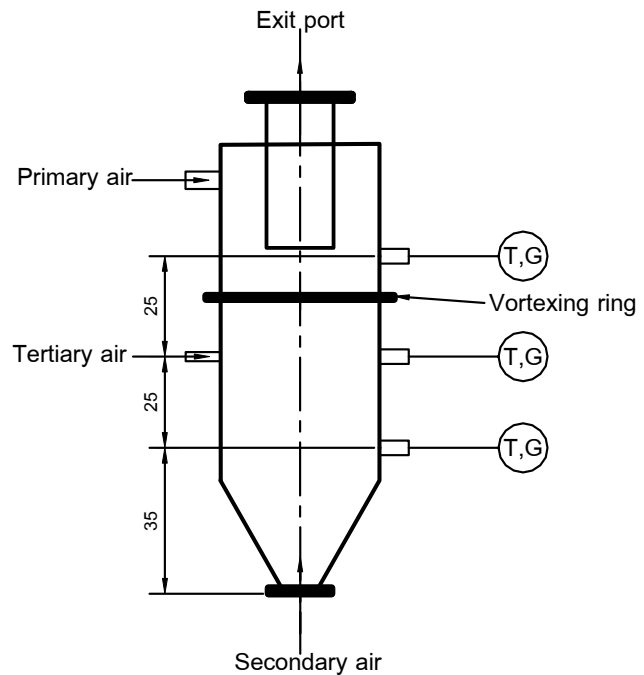
1. ปรับอัตราการไหลของอากาศและแกลบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ 1 ในตารางที่ 1 ซึ่งในการทดลองจะใช้พัดลมอัดอากาศ 2 ตัว ตัวละ 2.2 kW เป็นต้นกำลังในการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศ โดยใช้ฮีตเตอร์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วน ซึ่งฮีตเตอร์ทั้ง 3 ชุดได้ถูกปรับเทียบจาก Hot wire ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 3% ของค่าที่วัดได้และในการควบคุมอัตราการป้อนแกลบจะใช้ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนที่ใช้ในการป้อนแกลบ

2. บันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC ทุก 5 นาที จนครบ 120 นาที โดยใช้ Thermocouple type K และใช้ อุปกรณ์ชี้วัดซึ่งมีความละเอียดในหลักหน่วยในการแสดงผล

3. บันทึกองค์ประกอบของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Gas Analyzer รุ่น Testo 350 XL ทั้งหมด 4 ตำแหน่งคือ 1) ที่ $Y_1 = 0.35 \text{ m}$ 2) ที่ $Y_2 = 0.55 \text{ m}$, 3) ที่ $Y_3 = 0.85 \text{ m}$ และ 4) ที่ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC (เมื่อ Y คือ ความสูงของเตาเผา VFBC โดยความสูงของเตาจะเริ่มวัดจากตำแหน่งด้านล่างสุดของเตาที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยหงายดังแสดงในรูปที่ 1(b))

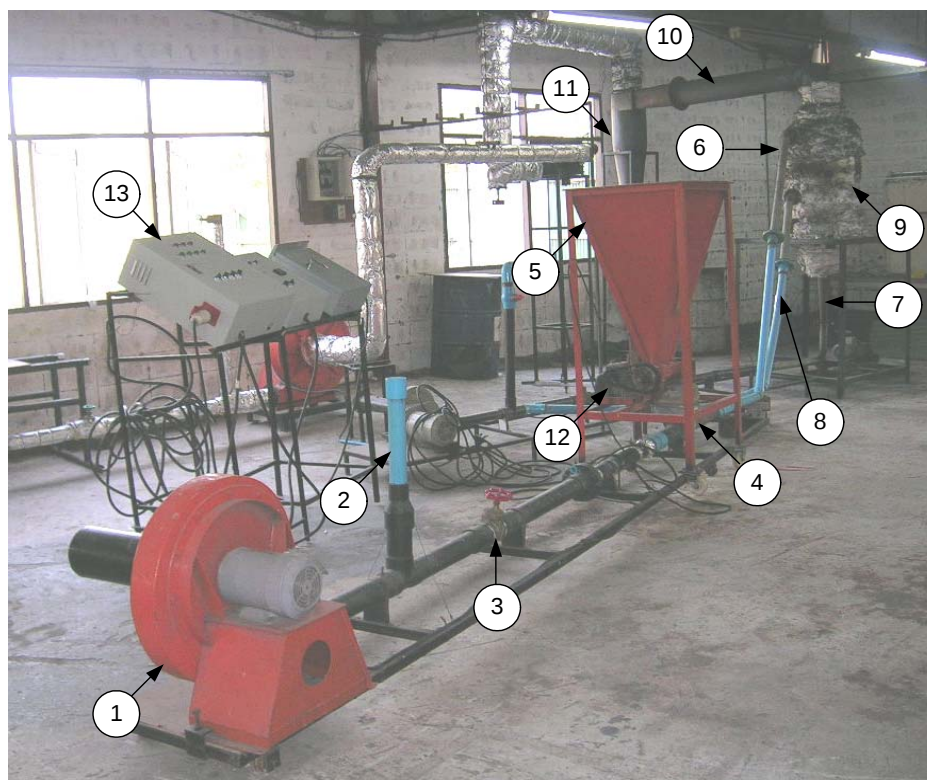


(a) ขนาดของเตาเวิร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด



(b) ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ (T) และก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ (G)

รูปที่ 1 ขนาดและตำแหน่งวัดอุณหภูมิของเตาเผาไหม้เวิร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด



รูปที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้เวิร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด

- | | | | |
|------------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| 1. Blowers | 2. Air drain port | 3. Valves | 4. Injector |
| 5. Hopper | 6. Primary air | 7. Secondary air | 8. Tertiary air |
| 9. VFBC | 10. Exit port | 11. Cyclone | 12. Feeding system |
| 13. Temporator Control | | | |

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองที่ศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่สองที่มีผลต่อสมรรถนะเตา VFBC

Run No.	Specific Rice husk feed rate (kg/h-m ³)	Primary air		Secondary air		Tertiary air		Excess air (%)
		Flow rate (m ³ /min)	Velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /min)	Velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /min)	Velocity (m/s)	
1	240	2.34	17	0.61	1.25	0.37	12.34	117
2	240	2.34	17	0.73	1.5	0.37	12.34	125
3	240	2.34	17	0.97	2	0.37	12.34	140
4	240	2.34	17	1.23	2.52	0.37	12.34	157
5	240	2.34	17	0.66	1.35	0.76	25	145
6	240	2.34	17	0.93	1.92	0.76	25	164
7	240	2.34	17	1.22	2.5	0.76	25	182

4.ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-3 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของแกลบและอากาศให้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ 2-7 ในตารางที่ 1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของเตานิยามได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_a (c_{p,g} T_e - c_{p,a} T_i)}{\dot{m}_f HHV}$$

เมื่อ

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลของอากาศ, kg/s

$\dot{m}_f$ = อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ, kg/s

$c_{p,g}, c_{p,a}$ = ค่าความจุความร้อนของแก๊สเสียและอากาศที่เข้าเผาไหม้

HHV = ค่าความร้อนสูงของแกลบ = 14.5 MJ/kg

e = ที่ตำแหน่งทางออกของ VFBC

i = ที่ตำแหน่งทางเข้าของ VFBC

โดยกำหนดให้ $c_{p,g}$ ที่ตำแหน่งทางออก เท่ากับ $c_{p,a}$ ที่มีอุณหภูมิก๊าซร้อน

สมการที่ (1) อยู่บนสมมติฐานที่ว่า $\dot{m}_a \gg \dot{m}_f$ ดังนั้น มวลของก๊าซจึงประมาณเท่ากับมวลของอากาศที่เข้าเผาไหม้

3.ผลการทดลอง

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนที่ 2 ต่อสมรรถนะเตาเผาไหม้ โดยเงื่อนไขการทดลองจะปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สอง (m_2) โดยแสดงเงื่อนไขต่างๆ ในตารางที่ 1 ซึ่งจะแบ่งเงื่อนไขการทดลองเป็น 2 ช่วงหลักๆ คือ 1) คงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะเท่ากับ (SFR) 240 kg/h-m³ คงที่อัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่งและสามเท่ากับ 2.34 และ 0.37 m³/min ตามลำดับ และปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองให้ได้อากาศส่วนเกิน

ทั้งหมดเท่ากับ 117% 125% 140% และ 157% ตามลำดับ 2) กำหนดให้คงที่ SFR และ m_1 เท่ากับเงื่อนไขที่ 1 แต่คงที่อัตราการไหลส่วนที่สาม (m_3) เท่ากับ 0.76 m³/min ($V_3 = 25$ m/s) และปรับอัตราการไหลส่วนที่สองให้ได้อากาศส่วนเกินดังนี้ คือ 145%, 164% และ 182% ตามลำดับ

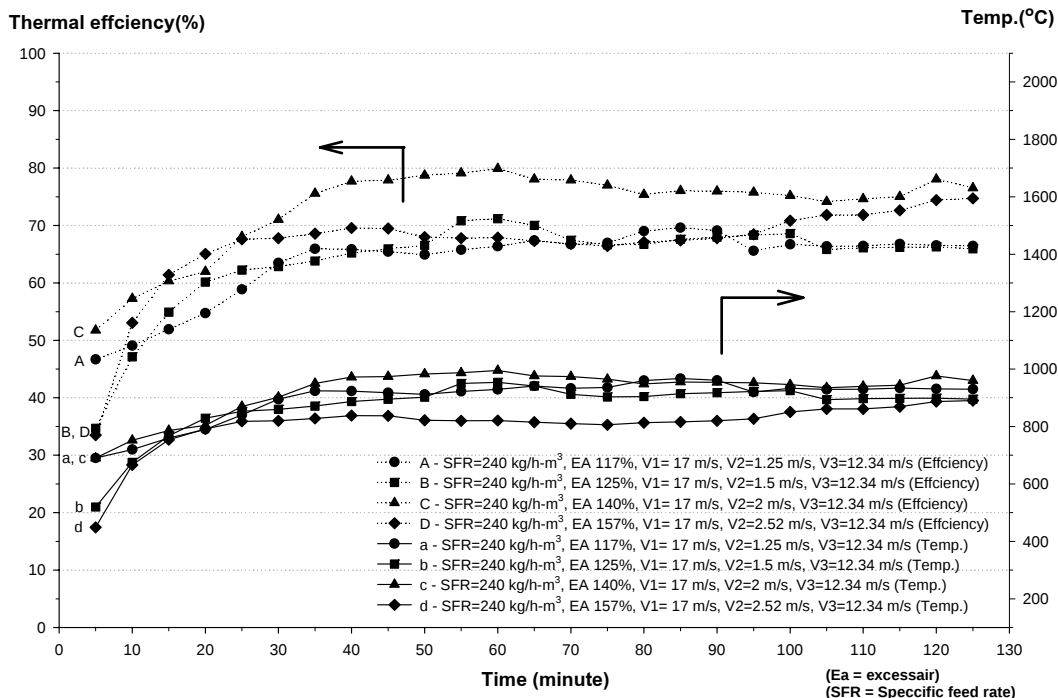
3.1 สมรรถนะเตาเผาไหม้ VFBC เมื่อคงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบจำเพาะ อัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง และ อัตราการไหลของอากาศส่วนที่สาม ($m_3 = 0.37$ m³/min)

3.1.1 อุณหภูมิการเผาไหม้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และค่าภาวะความร้อนเตา

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าสามารถแบ่งช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกเป็น 2 ช่วง คือ 1) ช่วงอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ (ช่วงเวลา 5 ถึง 60 นาที) พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ทั้ง 4 เงื่อนไข (ดังแสดงในตารางที่ 1) จะแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 3 เส้นกราฟ a-d 2) ช่วงอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาเข้าสู่สภาวะคงที่ (ช่วงเวลา 65 ถึง 125 นาที) เมื่ออัตราการไหลอากาศส่วนที่สอง (m_2) เท่ากับ 0.61 m³/min ($V_2=1.25$ m/s, 117%EA) จากการทดลองพบว่าอากาศส่วนที่สองซึ่งเป็นอากาศที่ถูกจ่ายที่ตำแหน่งด้านล่างของเตาที่มีลักษณะเป็นรูปกรวยหงาย ทำให้เชื้อเพลิงแกลบเกิดพฤติกรรมการเผาไหม้แบบฟลูอิดไชเบตซึ่งสังเกตได้จากการมองเห็นช่องมอง (ซึ่งคล้ายคลึงกับกรณีการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ-แกลบภายในเตาเผาจำลอง [13] ซึ่งมีการจ่ายอากาศส่วนที่สองด้านล่างเตาเผาไหม้จำลอง ทำให้แกลบเกิดโพรงอากาศบริเวณตรงกลางเบดส่งผลให้อนุภาคที่อยู่ล่างสุดจะลอยไปกับอากาศ โดยอนุภาคที่อยู่รอบๆโพรงอากาศจะเคลื่อนตัวลงสู่ด้านล่างของเบดแทนที่แกลบที่ถูกพาไปกับอากาศ ทำให้แกลบจะเคลื่อนที่เป็นอิสระ) ที่ m_2 เท่ากับ 0.61 m³/min นี้ ไม่สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของแกลบไม่มากพอ ที่ทำให้การแพร่ของออกซิเจนเพื่อไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้ดี จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ได้อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำซึ่งเท่ากับ 941 °C ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) เท่ากับ 67 % และ ภาวะความร้อน

เท่ากับ $0.6 \text{ MW}_{\text{th}}/\text{m}^3$ (คำนวณโดยใช้ค่า HHV ที่ 14.5 MJ/kg) เมื่อเพิ่ม m_2 เท่ากับ $0.73 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_2 = 1.5 \text{ m/s}$, $125\% \text{EA}$) ความเร็วของอากาศส่วนที่สอง (V_2) เพิ่มขึ้นทำให้การกระจายตัวของแก๊สภายในเตาเผาไหม้มากขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ได้อุณหภูมิการเผาไหม้เท่ากับ 950°C ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจึงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 70% โดยให้ค่าภาระความร้อนเท่ากับ $0.63 \text{ MW}_{\text{th}}/\text{m}^3$ และเมื่อเพิ่ม m_2 เท่ากับ $0.97 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_2 = 2.0 \text{ m/s}$, $140\% \text{EA}$) ความเร็วของอากาศส่วนที่สอง (V_2) เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้ ส่งผลให้ชั้นฟิล์มของเถ้าที่ปกคลุมเชื้อเพลิงอยู่นั้นบางลง ออกซิเจนจึงแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้อย่างเต็มที่ส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็น 995°C ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 80% และค่าภาระความร้อนเท่ากับ $0.71 \text{ MW}_{\text{th}}/\text{m}^3$ แต่เมื่อเพิ่ม m_2 เท่ากับ $1.23 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_2 = 2.52 \text{ m/s}$, $157\% \text{EA}$) ความเร็วส่วนที่สอง (V_2) ที่จ่ายอากาศด้านล่างเดามากเกินไป และมาอากาศบริเวณเหนือและใต้

วงแหวนวอร์เทคที่เกิดขึ้นจากการจ่ายอากาศส่วนที่หนึ่งและสามไม่เพียงพอทำให้เกิดแรงเหวี่ยงที่ตักกลับที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไว้ได้ ทำให้เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงกลับที่อยู่บนเตาเผาไหม้ลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดลงเหลือ 890°C ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 75% และค่าภาระความร้อนเท่ากับ $0.67 \text{ MW}_{\text{th}}/\text{m}^3$ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเงื่อนไขที่กล่าวมาข้างต้นทั้ง 4 เงื่อนไขมีค่าต่ำ เนื่องจากปริมาณอากาศส่วนเกินทั้งหมดที่ใช้ในการเผาไหม้มีค่าน้อยเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการศึกษาพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไรเซชันสำหรับเชื้อเพลิงแกลบ[18] โดยพบว่าที่ $\text{EA } 167\%$ จะทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 85% ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาต่อเนื่องโดยการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สาม (m_3) ให้เท่ากับ $0.76 \text{ m}^3/\text{min}$ ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางออกและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา

3.2 สมรรถนะเตาเผาไหม้ VFBC เมื่อคงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบจำเพาะ อัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง และ อัตราการไหลของอากาศส่วนที่สาม ($m_3 = 0.76 \text{ m}^3/\text{min}$)

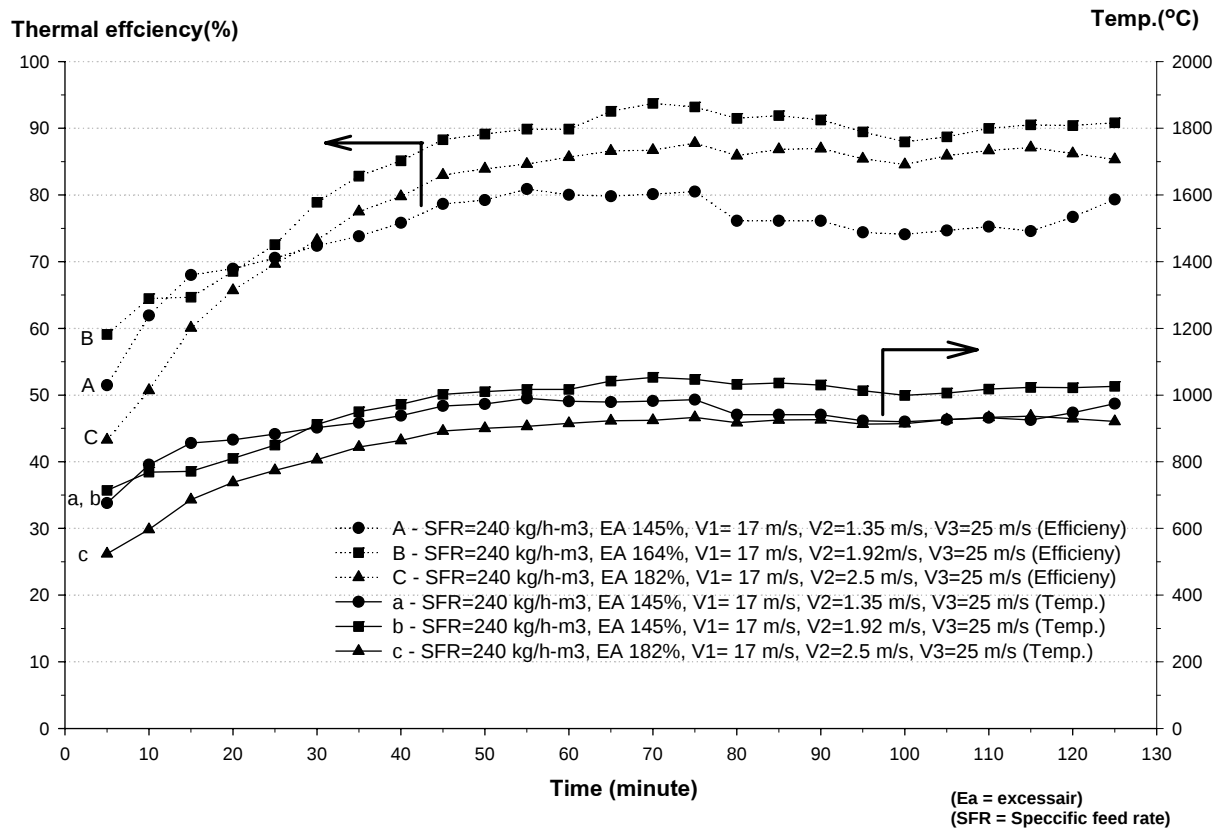
3.2.1 อุณหภูมิการเผาไหม้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และค่าภาระความร้อนเตา

จากรูปที่ 4 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สาม (m_3) ทำให้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น (เงื่อนไขการทดลองที่ 5-7) พบว่าผลการทดลองมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับผลการทดลองที่ได้จากเงื่อนไขการทดลองที่ 1-4 ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น (หัวข้อ 3.1) แต่จะให้อุณหภูมิการเผาไหม้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และภาระทางความร้อนสูงกว่า โดยที่อัตราการไหลของอากาศส่วนที่สอง (m_2) เท่ากับ $0.66 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_2 = 1.35 \text{ m/s}$, $145\% \text{EA}$) ความเร็ว

ของอากาศส่วนที่สองมีค่าน้อย ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคภายในเตาจึงไม่ดีพอ (ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.1.1 ที่เงื่อนไข $117\% \text{EA}$) ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้อุณหภูมิการเผาไหม้จึงมีค่าเท่ากับ 974°C ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 80% และ ภาระความร้อนเท่ากับ $0.6 \text{ MW}_{\text{th}}/\text{m}^3$ เมื่อเพิ่ม m_2 เท่ากับ $0.93 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_2 = 1.92 \text{ m/s}$, $164\% \text{EA}$) ความเร็วอากาศส่วนที่สอง (V_2) เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนของอากาศและแก๊สภายในห้องเผาไหม้ ออกซิเจนจึงเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้ดีขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้อุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็น $1,070^\circ\text{C}$ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 93% และค่าภาระความร้อนเท่ากับ $0.84 \text{ MW}_{\text{th}}/\text{m}^3$ แต่เมื่อเพิ่ม m_2 เท่ากับ $1.22 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_2 = 2.5 \text{ m/s}$, $182\% \text{EA}$) ความเร็วอากาศส่วนที่สอง (V_2) มีค่ามากขึ้นทำให้แก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่หมด

สามารถหลุดออกจากเตาได้ (ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.1.1 ที่เงื่อนไข 157%EA) และการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เกินความจำเป็นนี้ ทำให้ต้องเสียความร้อนที่ได้จากเผาไหม้ส่วนหนึ่งให้กับไนโตรเจนในอากาศ

ส่วนเกินที่จ่ายเข้ามาเกินความจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ ส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดลงเหลือ 937°C และประสิทธิภาพเชิงความร้อน 86 % ทำให้ได้ค่าภาระความร้อนเท่ากับ $0.78 \text{ MW}_\text{th}/\text{m}^3$



รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางออกและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา

3.2.2 องค์ประกอบก๊าซเสีย

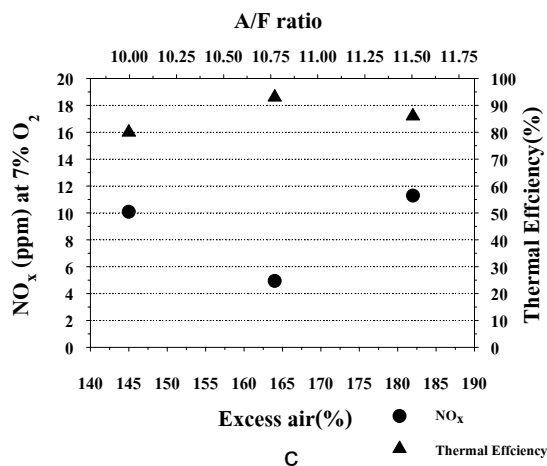
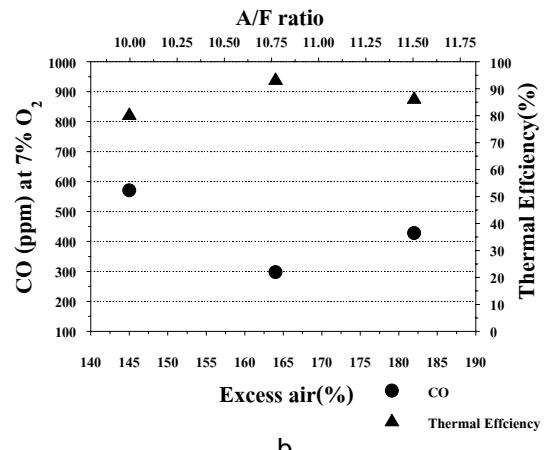
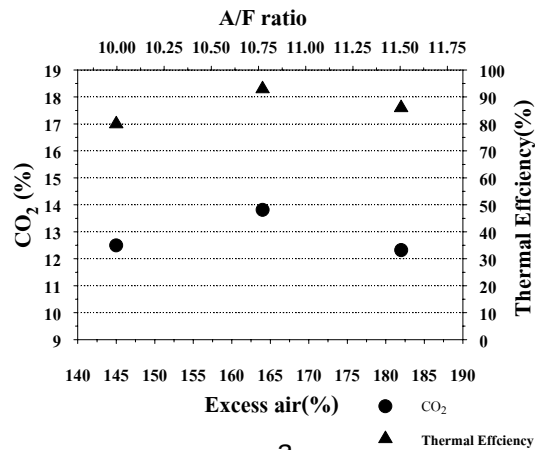
จากผลการทดลองในรูปที่ 5 พบว่า ปริมาณ CO₂ และ CO ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้จะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกิน (%EA) โดยถ้าใช้อากาศส่วนเกินที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ได้ปริมาณ CO₂ สูง และมีปริมาณ CO ต่ำ โดยที่เงื่อนไข (m₂) เท่ากับ 0.66 m³/min (V₂ = 1.35 m/s, 145%EA) อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำซึ่งเท่ากับ 974 °C ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 80 % ซึ่งสอดคล้องกับ CO₂ ที่ออกมาน้อยซึ่งเท่ากับ 12.5 % โดยปริมาตร แสดงในรูปที่ 5(a) และสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่ออกมาสูงซึ่งเท่ากับ 570 ppm แสดงในรูปที่ 5(b) (โดยปริมาณ CO และ NO_x ที่นำเสนอทั้งหมดคิดเทียบที่ปริมาณ O₂ ส่วนเกิน 7%) เมื่อปรับเงื่อนไขให้ (m₂) เท่ากับ 0.93 m³/min (V₂ = 1.92 m/s, 164%EA) จะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ 182%EA) ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงเท่ากับ 1,070 °C ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 93 % ซึ่งสอดคล้องกับ CO₂ ที่ออกมาสูงซึ่งเท่ากับ 13.8 % โดยปริมาตร แสดงในรูปที่ 5(a) และสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่ออกมาน้อยซึ่งเท่ากับ 298 ppm แสดงในรูปที่ 5(b) แต่เมื่อปรับให้อากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นที่เงื่อนไข (m₂) เท่ากับ 1.22 m³/min (V₂ = 2.5 m/s, 182%EA) จะทำให้เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อยู่ในเตาเผาไหม้

น้อยลง (ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1 ที่ 182%EA) ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดต่ำลงเหลือ 937 °C และประสิทธิภาพเชิงความร้อน 86 % ซึ่งสอดคล้องกับ CO₂ เช่นกันคือ CO₂ จะออกมาน้อยลงเท่ากับ 12.3 % โดยปริมาตร แสดงในรูปที่ 5(a) และสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่ออกมาเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 428 ppm แสดงในรูปที่ 5(b) ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซ CO₂, CO และ NO_x ตามระดับความสูงของเตาที่แสดงในรูปที่ 6 พบว่าปริมาณ CO₂ และ NO_x ยังไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์กับความสูงเตาเผาไหม้อย่างไร

4.สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนที่ 2 ต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิดเบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเผาไหม้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ 1) ช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่โดยอุณหภูมิและประสิทธิภาพเชิงความร้อนแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ 2) ช่วงเข้าสู่สภาวะคงตัว พบว่าที่ 164%EA มีอุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุดที่ 1,070 °C, η_th เท่ากับ 93% ได้ค่าภาระความร้อนสูงสุดเท่ากับ $0.84 \text{ MW}_\text{th}/\text{m}^3$



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบก๊าซเสียและประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับปริมาณอากาศส่วนเกิน

2.อากาศส่วนที่สองต้องมีความเร็วมากเพียงพอ ที่จะทำให้แก๊สเกิดการกระจายตัว และได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แต่ความเร็วต้องไม่มากเกินไปเพราะจะทำให้แก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่หมดสามารถหลุดออกจากเตาได้

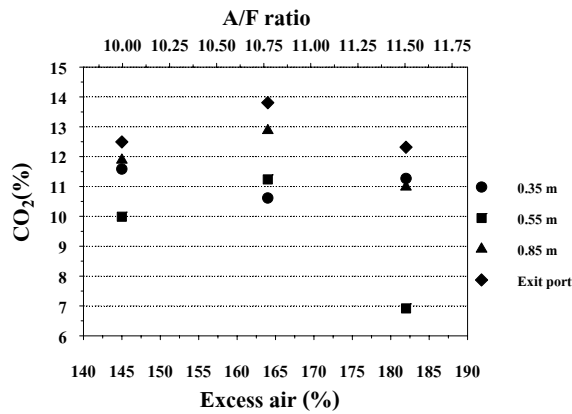
3.ปริมาณอากาศส่วนที่สองมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนและสมรรถนะของเตาโดยตรง ซึ่งพบว่าที่อัตราการไหลของอากาศส่วนที่สอง (m_2) น้อย (145%EA) ความเร็วของอากาศส่วนที่สอง (V_2) น้อย ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคภายในเตาไม่ดีพอ η_{th} จึงต่ำ ซึ่งเท่ากับ 80% เมื่อปริมาณอากาศส่วนที่สอง (m_2) เพิ่มขึ้น (164%EA) ความเร็วของอากาศส่วนที่สอง (V_2) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนของอากาศและอนุภาคภายในเตา ทำให้ชั้นของเถ้าที่ปกคลุมเชื้อเพลิงจึงถูกทำลาย การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศจึงดีขึ้น η_{th} สูงขึ้นซึ่งเท่ากับ 93% แต่ถ้าจ่ายปริมาณอากาศส่วนที่สอง (m_2) เพิ่มมากขึ้นอีก (182%EA) ความเร็วส่วนที่สอง (V_2) ที่จ่ายอากาศด้านล่างเตามากเกินไป ทำให้แก๊สที่ยัง

เผาไหม้ไม่หมดหลุดออกไปจากเตา ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สที่อยู่ในเตาเผาไหม้น้อยลง และต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งให้กับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการเผาไหม้ ทำให้ η_{th} ลดลงเท่ากับ 86%

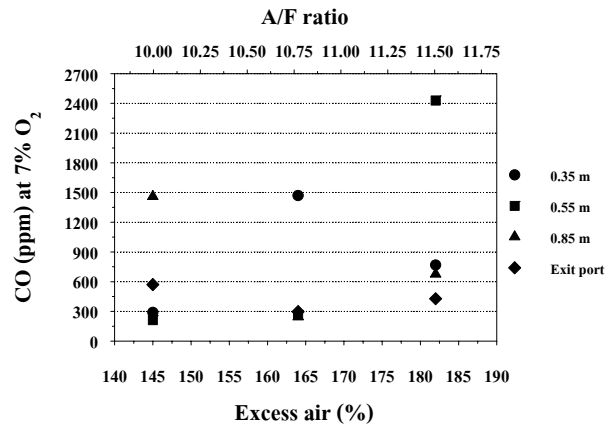
4. ปริมาณ CO₂ และ CO จะสอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกิน อุณหภูมิการเผาไหม้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและภาระทางความร้อนของเตาเผาไหม้ โดยที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ 93 % ที่ให้ค่าภาระความร้อน 0.84 MW_{th}/m³ และมีปริมาณ CO = 298 ppm และ NO_x = 4.9 ppm

5. กิตติกรรมประกาศ

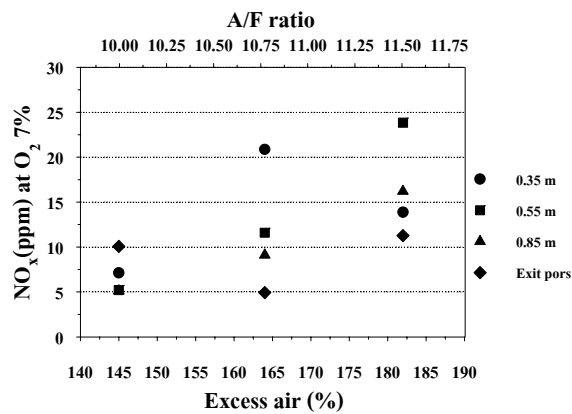
ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและคุณวิบูรณ์ เทเพนทร์ สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวที่กรุณาให้คำแนะนำต่องานวิจัยนี้



a



b



c

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบก๊าซเสียกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ระดับความสูงต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.k. Gupta, Lilley D.G and Syred N. "Swirl Flows. Abacus Press", Tunbridge Wells, England, 1984
- [2] R. Singh, Maheshwari R.C and Ojha T.P. "Development of a Husk Fired Furnace", Journal of Agricultural Engineering Research, 1980, Vol,25, pp.119-120.
- [3] J.A. Tumambig. "Testing and Evaluation of Rice Hull-Fed Furnace for Grain Drying", National Post Harvest Institute for Research and Extension, 1984, pp.197-214
- [4] S. Soponronnarit, Swasdisevi T, Wetchacama S, Shujinda A and Srisawat B. "Cyclone Rice Husk Furnace and Its Application on Paddy Drying", International Energy Journal, 2000, Vol 1, No 2, pp.67-75
- [5] E. Natarajan, Nordin A and Rao A.N. "Overview of Combustion and Gasification of Rice Husk in Fluidized Bed Reactor", Biomass and Bioenergy, Vol 14, No 5/6, pp.533-546
- [6] J. Werther, Saenger M, Hartge E.U, Ogada T and Siagi Z. "Combustion of Agricultural residues", Progress in Energy and Combustion Science, 2000, Vol 26, No1, pp.1-27

- [7] L. Armesto, Bahillo A, Veijonen k, Cabanillas A and Otero J. "Combustion Behavior of Rice Husk in a Bubbling Fluidized Bed", Biomass and Bioenergy, 2002, Vol 23, No 3, pp 171-179
- [8] T.R. Rao and Bheemarasetti J.V. Ram. "Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Sands", Energy, 2000, Vol 26, No 6, pp.633-644
- [9] G. Yang and Nieh S. "Particle Flow Pattern in the Freeboard of a Vortexing Fluidized Bed", Powder Technology, 1987, Vol 50, pp.121-131
- [10] G. Yang and Nieh S. "On the Suspension Layers in the Freeboard of Vortexing Fluidized Beds", Powder Technology, 1989, Vol 57, pp.171-179
- [11] S. Nigh, Yang G, Zhu A.Q and Zhao C.S. "Measurements of Gas-Particle Flows and Elutriation of an 18 i.d. Cold Vortexing Fluidized-Bed Combustor Model", Powder Technology, 1992, Vol 69, pp. 139-146
- [12] S. Nieh and Zhang J. "Swirling, Reacting, Turbulent Gas-Particle Flow in a Vortex Combustor", Powder Technology, 2000, Vol 122, pp.70-78

[13] T. Madhiyanon, Piriyaungroj N, Nathakarannakule A and Soponronnarit S. "A Study on Air-Rice Husk Flow Behavior Cold Model. In Proc", the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 13th-14th March 2003, pp.332-343

[14] Patent Number: 4,881,476. "Cyclone Reactor with Internal Separation and Axial Recirculation"

[15] Patent Number: 4,867,079. "Combustor with Multistage Internal Vortices"

[16] Becker et al, Patent Number: 4,881,476. "Cyclone Reactor with Internal Separation and Axial Recirculation"

[17] Shang et al, Patent Number: 4,867,079. "Combustor with Multistage Internal Vortices"

[18] T. Madhiyanon, Piriyaungroj N, Nathakarannakule A and Soponronnarit S. "Development of a Vortexing-Fluidized bed Combustor for Rice Husk Fuel, The 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, 15th-17th October 2003, 113(IC033)