

**เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด : Part I ผลกระทบของ
อากาศส่วนที่หนึ่งต่อสมรรถนะเตา
VORTEXING-FLUIDIZED BED COMBUSTOR (VFBC) : Part I EFFECTS OF
PRIMARY AIR ON PERFORMANCE OF COMBUSTOR**

ฐานิตย์ เมธิยานนท์¹ นิวัต พิริยารุงโรจน์² พีระวัตร ทองนอก³ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์⁴

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

โทร 02-9883666 ext. 244 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 Prachauthit Road, Bangmod, Thung Kharu District, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด (Vortex-Fluidized Bed Combustor, VFBC) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยรวมลักษณะเด่นของเตาเผาไหม้ไซโคลนและเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบด เพื่อต้องการเตาเผาไหม้แบบใหม่ที่ให้ค่าภาระความร้อน (MW_{th}/m^3) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) สูง แต่มีค่าสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำ โดยวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษถึงปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่ง ซึ่งจ่ายมาพร้อมกับเชื้อเพลิงในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งด้านบนของเตาที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเตาเผา VFBC โดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง ในขณะที่คงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอุณหภูมิ (SFR) อัตราการไหลของอากาศส่วนที่สอง (เป็นอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน) และอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สามที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสตั้งที่ตำแหน่งต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทคในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง จากการทดลองพบว่าเมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่งให้มีปริมาณอากาศส่วนเกินทั้งหมดที่ใช้ในการเผาไหม้เท่ากับ 164% เตาเผา VFBC มีสมรรถนะของเตาสูงสุด แต่ถ้าใช้ปริมาณส่วนที่หนึ่งมากกว่าหรือน้อยกว่านั้น จะทำให้ η_{th} ลดลง พบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 164% ทำให้ได้อุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาสูงสุดเท่ากับ 1,030 องศาเซลเซียส η_{th} เท่ากับ 90% ได้ค่าภาระความร้อนสูงสุดเท่ากับ $0.82 MW_{th}/m^3$ ได้ปริมาณก๊าซ CO_2 , CO และ NO_x เท่ากับ 12.4%, 335 และ 300 ppm ตามลำดับ (ค่าก๊าซ CO และ NO_x คัดที่ O_2 ส่วนเกินเท่ากับ 7%)

Abstract

A novel vortexing-fluidized bed combustor (VFBC) which has been combined a main feature of cyclone and fluidized bed combustors has been developed in order to achieve high thermal load and high efficiency of combustor whereas ratio of diameter to height of combustor is low. To investigate the influence of primary air, which carries rice husk to the top of VFBC in tangential direction, Which is a purpose of this study, the amount of primary air was varied from one experiment to the other while specific fuel rate, secondary air (fluidization air) and tertiary air (air tangentially distributed under a vortex-ring) were kept unchanged in each experiment. The results showed that when primary air was distributed with a corresponding excess air of 164%, VFBC perform very well but if amount of primary air was further either increased or decreased, thermal efficiency would be dropped. Under proper operating condition, the maximum exit gas temperature obtained at $1030^\circ C$, thermal efficiency a about 90% and thermal load of combustor is $0.82 MW_{th}/m^3$ while amount of emission gases, i.e. CO_2 , CO and NO_x were 12.4%, 335 ppm and 300 ppm, respectively. (CO and NO_x determined base on excess O_2 of 7%)

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานความร้อนในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องผลิตสินค้าอุปโภคบริโภค ให้เหมาะสมกับความต้องการของประชากรที่เพิ่มสูงขึ้นทุกวัน โดยพลังงานความร้อนที่ใช้ส่วนใหญ่ที่ใช้จะเป็นพลังงานที่ได้จากน้ำมันซึ่งมีราคาสูงเพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงได้มีผู้ประกอบการหลายรายได้นำเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมาผลิตเป็นพลังงานความร้อนเพื่อทดแทนพลังงานความร้อนจากน้ำมันทำให้ลดต้นทุนการผลิตลง โดยเตาเผาไหม้ชีวมวลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้แก่ เตาเผาไหม้แบบไซโคลน [1] การเผาไหม้ภายในเตาจะอาศัยหลักการของการไหลวนหรือการไหลแบบวอร์เทค ทำให้สามารถดักเก็บไม่ให้หลุดลอยออกไปพร้อมกับก๊าซเผาไหม้ ต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ [2, 3, 4] เป็นต้น ข้อเสียของเตาเผาไหม้ประเภทนี้คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าภาระความร้อนต่ำ สำหรับเตาฟลูอิดไรเซชันที่ใช้หลักการกระจายอนุภาคน้ำมันทั่วถึงตลอดทั้งความสูงของเตา เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบและซีลี้อย [5, 6, 7] ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีน้ำหนักเบาทำให้ยากต่อการเกิดฟลูอิดไรเซชัน ดังนั้นจำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อย เช่น ทรายซิลิกา อลูมินา ลงในเบด [5, 8] ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำให้ความดันตกคร่อมภายในเตาค่อนข้างสูงจำเป็นต้องใช้พัดลมที่มีขนาดใหญ่ และในการออกแบบเตาเผาไหม้ฟลูอิดไรเซชันต้องออกแบบให้เตาเผาไหม้มีความสูงพอที่จะทำให้อนุภาคภายในไม่หลุดออกนอกเตา ส่งผลให้ค่าสัดส่วนความสูงของเส้นผ่านศูนย์กลางเตาค่อนข้างสูง จึงได้มีการพัฒนาให้มีการฉีดอากาศเข้าบริเวณ free board เพื่อดักเก็บไม่ให้หลุดลอยออกไปพร้อมกับก๊าซเผาไหม้ และลดความสูงของเตาเผาไหม้ลง [9, 10, 11] ซึ่งคล้ายกับ U.S. Patent no. 4,867,079 [17] และได้มีการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของก๊าซและอนุภาคแบบวอร์เทค [12] พบอากาศบริเวณผนังจะมีทิศทางไหลลงด้านล่างเตา ดังนั้นเมื่อมีการฉีดอากาศเข้าบริเวณ free board ก็จะทำให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคภายในเตา ส่งผลถึง residence time นานขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าตามด้านจุดเด่นของเตาเผาไหม้ทั้งสองแบบมารวมกันจะทำให้มีค่าภาระความร้อน (MW_{th}/m^3) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง แต่ในขณะเดียวกันมีค่าสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำ ทำให้ติดตั้งในโรงงานได้สะดวก ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งได้ โดยเมื่อนำจุดเด่นของเตาทั้งสองมารวมกันจะได้เป็นเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไรเซชันมา โดยผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไรเซชันจำลอง [13] เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศและแกลบ พบว่าเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไรเซชันจำลองสามารถรวมคุณลักษณะเด่นของการไหลแบบฟลูอิดไรเซชันและแบบวอร์เทคเข้าไว้ด้วยกันได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้ข้อมูลดังกล่าวมาออกแบบเตาเผา VFBC โดย เตาเผา VFBC จะแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสามส่วนคืออากาศส่วนที่หนึ่ง (Primary air) เป็นอากาศที่พาเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่เตาเผาไหม้โดยอากาศส่วนที่หนึ่งและแกลบนี้จะถูกจ่ายในแนวสัมผัสตั้งฉากกับรัศมีของเตาที่ตำแหน่งด้านบนของเตาที่เหนือแผ่นวงแหวนวอร์เทค ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบวอร์เทคของ

อากาศและเชื้อเพลิงซึ่งจะป้องกันไม่ให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่ยังไม่เผาไหม้ไม่ให้หลุดออกนอกเตาทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตามีมากขึ้น อากาศส่วนที่สอง (Secondary air) เป็นอากาศที่จ่ายที่ตำแหน่งด้านล่างของเตาเพื่อให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้แบบฟลูอิดไรเซชันและอากาศส่วนที่สาม (Tertiary air) เป็นอากาศที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสตั้งฉากกับรัศมีของเตาที่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทค ขนาดของเตาและอุปกรณ์ต่างๆ ของเตา VFBC ได้แสดงในรูปที่ 1(a) และ 2 โดยไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไรเซชันสำหรับเชื้อเพลิงแกลบ [18] โดยศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่มีผลต่อการเผาไหม้ซึ่งจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา จะขึ้นกับปริมาณอากาศส่วนเกินเป็นหลัก โดยปริมาณอากาศส่วนที่สามจะไม่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่ปริมาณอากาศส่วนเกินรวมทั้งหมดเหมาะสม แต่การจ่ายอากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 1,000 องศาเซลเซียส โดยโครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่อง โดยจะทำการศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของเตาเผา VFBC

2. วิธีการทดลอง

2.1 การศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาเผา VFBC

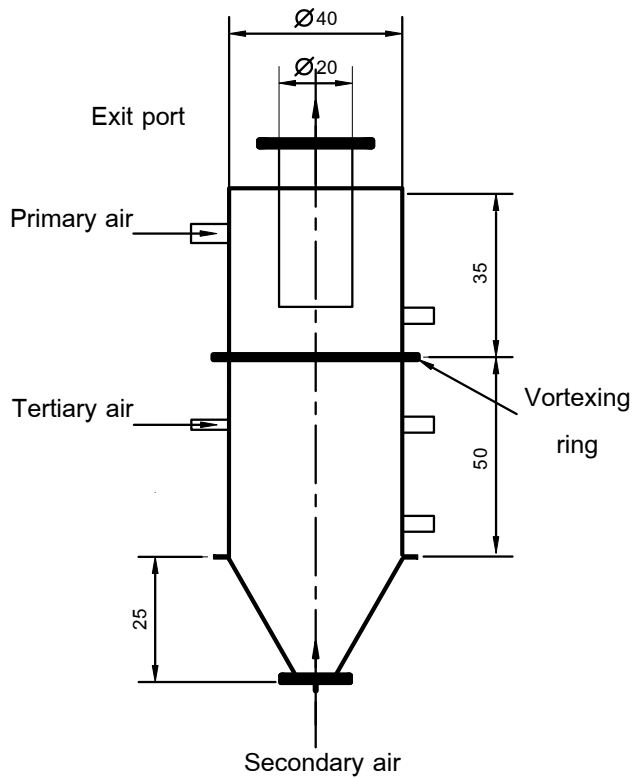
เตรียมอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการติดตั้งเตาเผาโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงและอุณหภูมิของเตาอยู่ในห้องเผาไหม้ประมาณ 600 °C จึงเริ่มทำการทดลอง

1. ปรับอัตราการไหลของอากาศและแกลบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลองที่ 1 ในตารางที่ 1 ซึ่งในการทดลองจะใช้พัดลมอัดอากาศ 2 ตัว ตัวละ 2.2 kW เป็นต้นกำลังในการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศ โดยใช้ออริฟิสมิเตอร์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วน ซึ่งออริฟิสมิเตอร์ทั้ง 3 ชุดได้ถูกปรับเทียบจาก Hot wire ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 3% ของค่าที่วัดได้และในการควบคุมอัตราการป้อนแกลบจะใช้ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนปั๊มที่ใช้ในการป้อนแกลบ

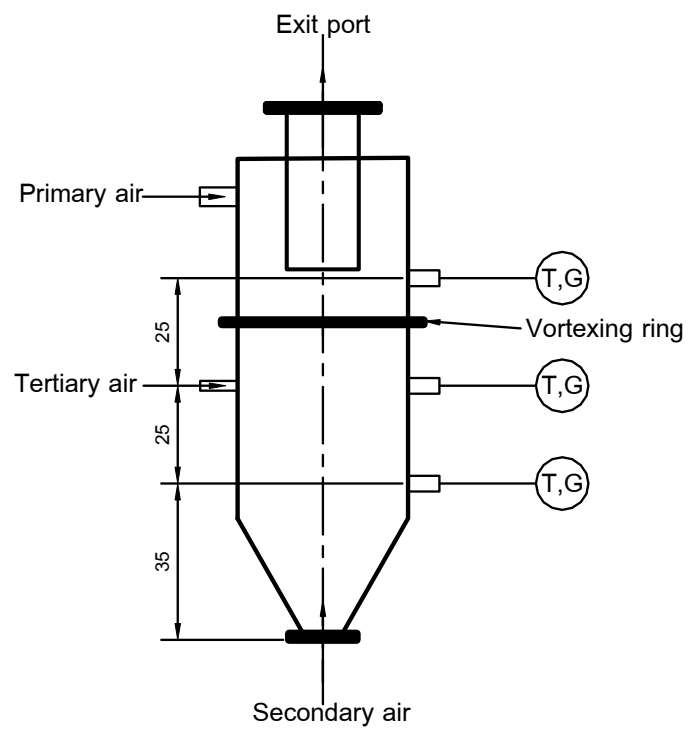
2. บันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC ทุก 5 นาทีจนครบ 120 นาที โดยใช้ Thermocouple type K และใช้ อุปกรณ์ซีวิตซ์ที่มีความละเอียดในหลักหน่วยในการแสดงผล

3. บันทึกองค์ประกอบของก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Gas Analyzer รุ่น Testo 350 XL ทั้งหมด 4 ตำแหน่งคือ 1) ตำแหน่ง $Y_1 = 0.35$ m, 2) ตำแหน่ง $Y_2 = 0.60$ m, 3) ตำแหน่ง $Y_3 = 0.85$ m และ 4) ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC (เมื่อ Y คือ ความสูงของเตาเผา VFBC โดยความสูงของเตาจะเริ่มวัดจากตำแหน่งด้านล่างสุดของเตาที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยหงาย) ดังแสดงในรูปที่ 1(b)

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-3 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของแกลบและอากาศให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลองที่ 2-4 ในตารางที่ 1

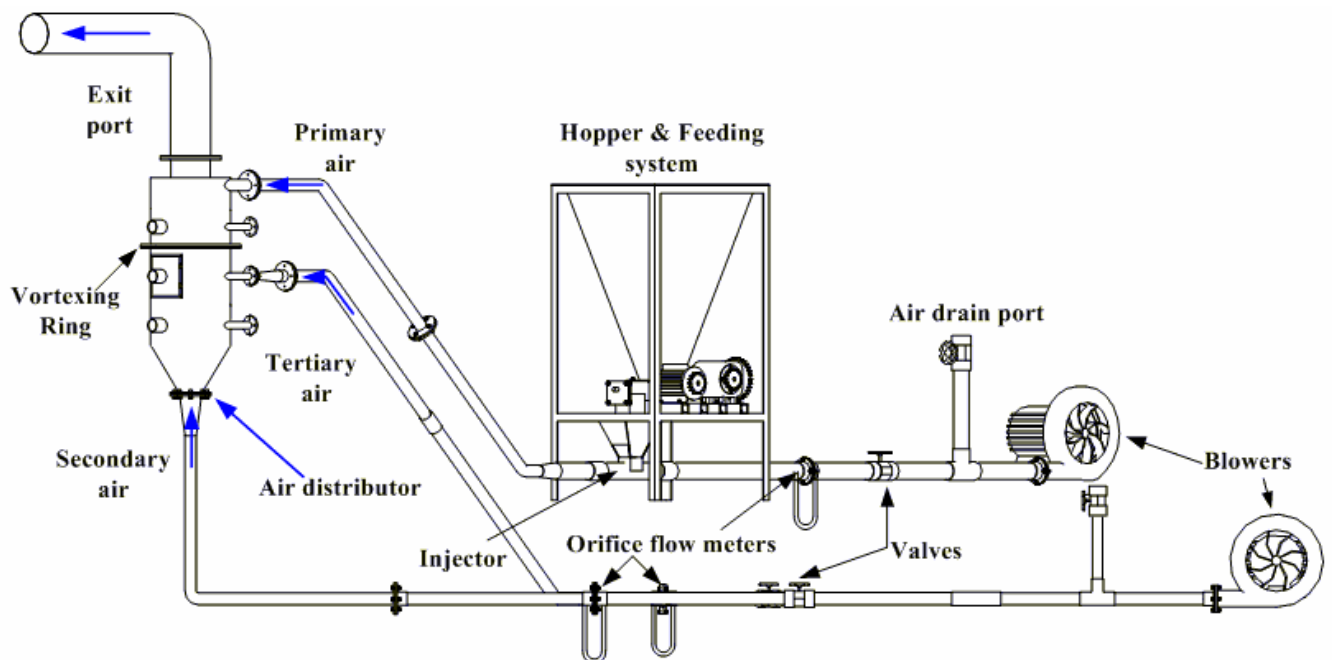


(a) ขนาดของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบด (VFBC)



(b) ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ (T) และองค์ประกอบก๊าซร้อน (G)

รูปที่ 1 ขนาดและตำแหน่งวัดอุณหภูมิของเตาเผาไหม้ VFBC



รูปที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผา VFBC

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองที่ศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะของ 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	16	0.85	1.75	0.76	25	149
2	240	2.19	18	0.85	1.75	0.76	25	167
3	240	2.31	19	0.85	1.75	0.76	25	176
4	240	2.43	20	0.85	1.75	0.76	25	186

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของเตาเผาไหม้ได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_a (c_{p,g} T_e - c_{p,a} T_i)}{\dot{m}_i HHV} \quad (1)$$

เมื่อ

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

$\dot{m}_i$ = 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 $\dot{m}_a \gg \dot{m}_i$ ดังนั้น มวลของก๊าซจึงประมาณเท่ากับมวลของอากาศที่เข้าเผาไหม้

3. ผลการทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนที่หนึ่งต่อสมรรถนะเตาเผา VFBC ซึ่งในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยคงที่อัตราการป้อนแกลบจำเพาะ (SRF) เท่ากับ 240 kg/h-m³, อัตราการไหลของอากาศส่วนที่สอง (m_2) และสาม (m_3) เท่ากับ 0.85 m³/min และ 0.76 m³/min ตามลำดับ ซึ่งสามารถแบ่งผลการทดลองเป็น 2 ข้อดังต่อไปนี้

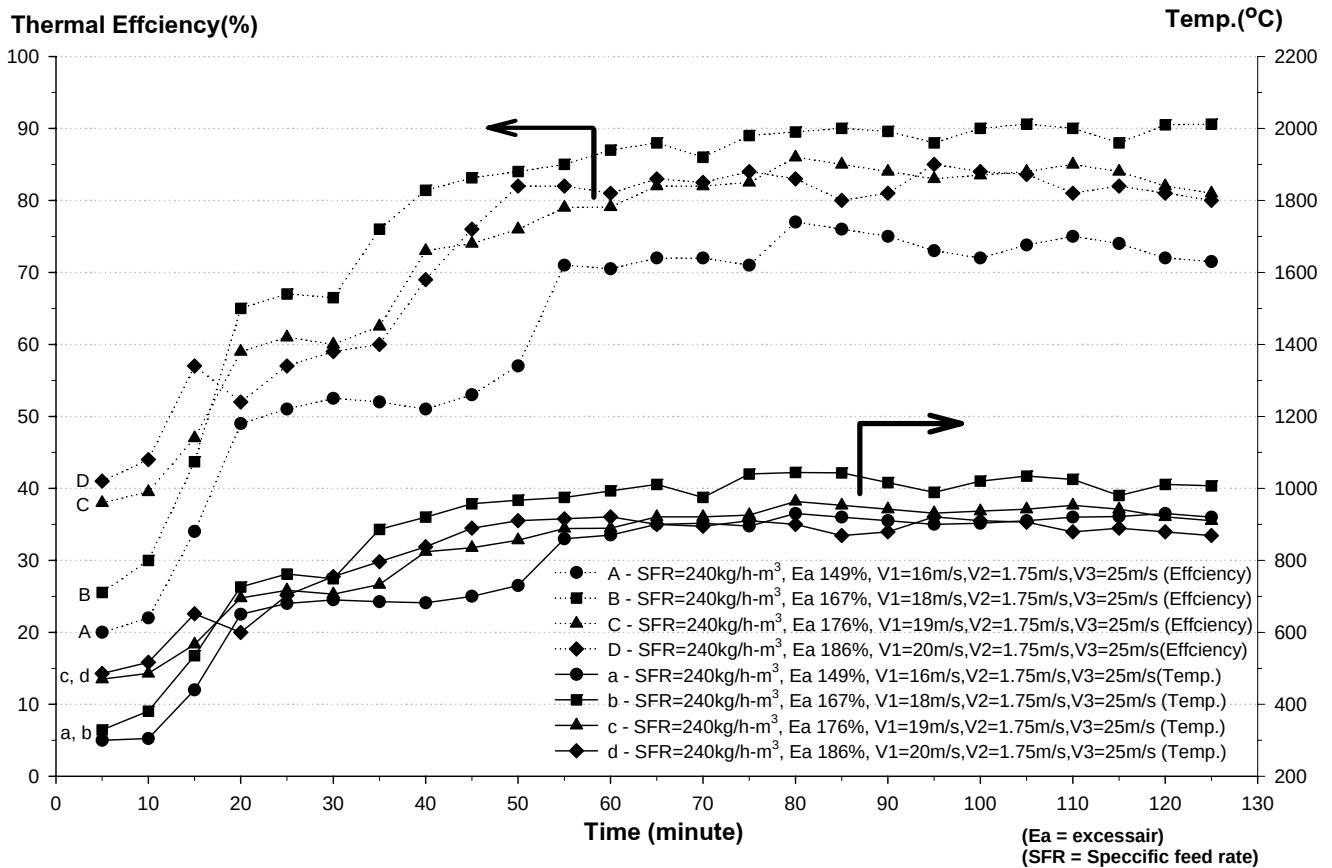
3.1 สมรรถนะของเตา VFBC

ในการพิจารณาถึงสมรรถนะของเตาเผาจะพิจารณาจากประสิทธิภาพเชิงความร้อน, อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และภาระความร้อนของเตา โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นดัชนีที่ใช้บอกความคุ้มค่าของการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง ส่วนภาระความร้อน

ของเตาเผาไหม้เป็นตัวบ่งบอกถึงความคุ้มค่าในการใช้พื้นที่ภายในเตาเผาไหม้ ในการศึกษาถึงผลกระทบของอากาศส่วนที่หนึ่งต่อสมรรถนะของเตา VFBC นี้พบว่าสามารถแบ่งข้อสังเกตที่ได้จากการทดลองออกเป็น 2 ช่วงหลักๆ คือ

ช่วงอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ (ช่วงเวลา 5 ถึง 60 นาที) จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ทั้ง 4 เงื่อนไข (ดังแสดงในตารางที่ 1) จะแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 3 เส้นกราฟ a-d โดยเฉพาะที่เงื่อนไขปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) เท่ากับ 167 (เส้นกราฟ b) อุณหภูมิที่ทางออกสามารถเพิ่มจาก 310 °C ถึง 1,000 °C ภายในเวลา 55 นาที ซึ่งเป็นการเพิ่มอุณหภูมิที่เร็วที่สุดในการทดลอง

ช่วงอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาเข้าสู่สภาวะคงที่ (ช่วงเวลา 65 ถึง 125 นาที) เมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง(m_1) เท่ากับ 2.0 m³/min ($V_1 = 16$ m/s, 149%EA) โดยคงที่ SRF = 240 kg/h-m³, $m_2 = 0.85$ m³/min, $m_3 = 0.76$ m³/min จากการทดลองพบว่าโดยอากาศส่วนที่หนึ่งจะถูกจ่ายในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งด้านบนของเตา เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวนที่เหนือวงแหวนวอร์เทค (ซึ่งคล้ายคลึงกับการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของอากาศ-แกลบภายในเตาเผาจำลอง [13] ซึ่งมีการจ่ายอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของเตาเผาเช่นกัน ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงของอากาศที่เหนือและใต้แผ่นวงแหวนวอร์เทค ซึ่งบริเวณนี้จะทำหน้าที่ดักอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ไม่ให้ออกจากเตาได้) จากการทดลองพบว่า m_1 เท่ากับ 2.0 m³/min นี้สามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ของแกลบและอากาศภายในเตาเผาไหม้ VFBC ได้ แต่ไม่สามารถดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดได้ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ดังสังเกตได้จากซีเถ้าที่มีสีดำแดงและอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำซึ่งเท่ากับ 930 °C ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) เท่ากับ 76% และมีค่าภาระความร้อนเตาเท่ากับ 0.69 MW_{th}/m³ (คำนวณโดยใช้ค่า HHV ที่ 14.5 MJ/kg) เมื่อเพิ่ม m_1 เท่ากับ 2.19 m³/min ($V_1 = 19$ m/s, 176%EA) พบว่าทำให้ได้อุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาสูงสุดเท่ากับ 1,030 องศาเซลเซียส η_{th} เท่ากับ 90% และมีค่าภาระความร้อนเตาเท่ากับ 0.82 MW_{th}/m³ เนื่องจากการเพิ่ม m_1 1) เป็นการเพิ่มความปั่นป่วนภายในเตาทำให้ชั้นของเถ้าที่ปกคลุมเชื้อเพลิงถูกทำลายทำให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีขึ้น 2) ทำให้ความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่แบบหมุนวนเหนือและใต้วงแหวนวอร์เทคมากขึ้น ส่งผลให้อนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่สามารถออกจากเตาได้ ซึ่งสังเกตได้จากซีเถ้าที่ออกมา มีขนาดเล็กละเอียดสีเทาปนดำ ซึ่งเท่ากับเป็นการเพิ่ม



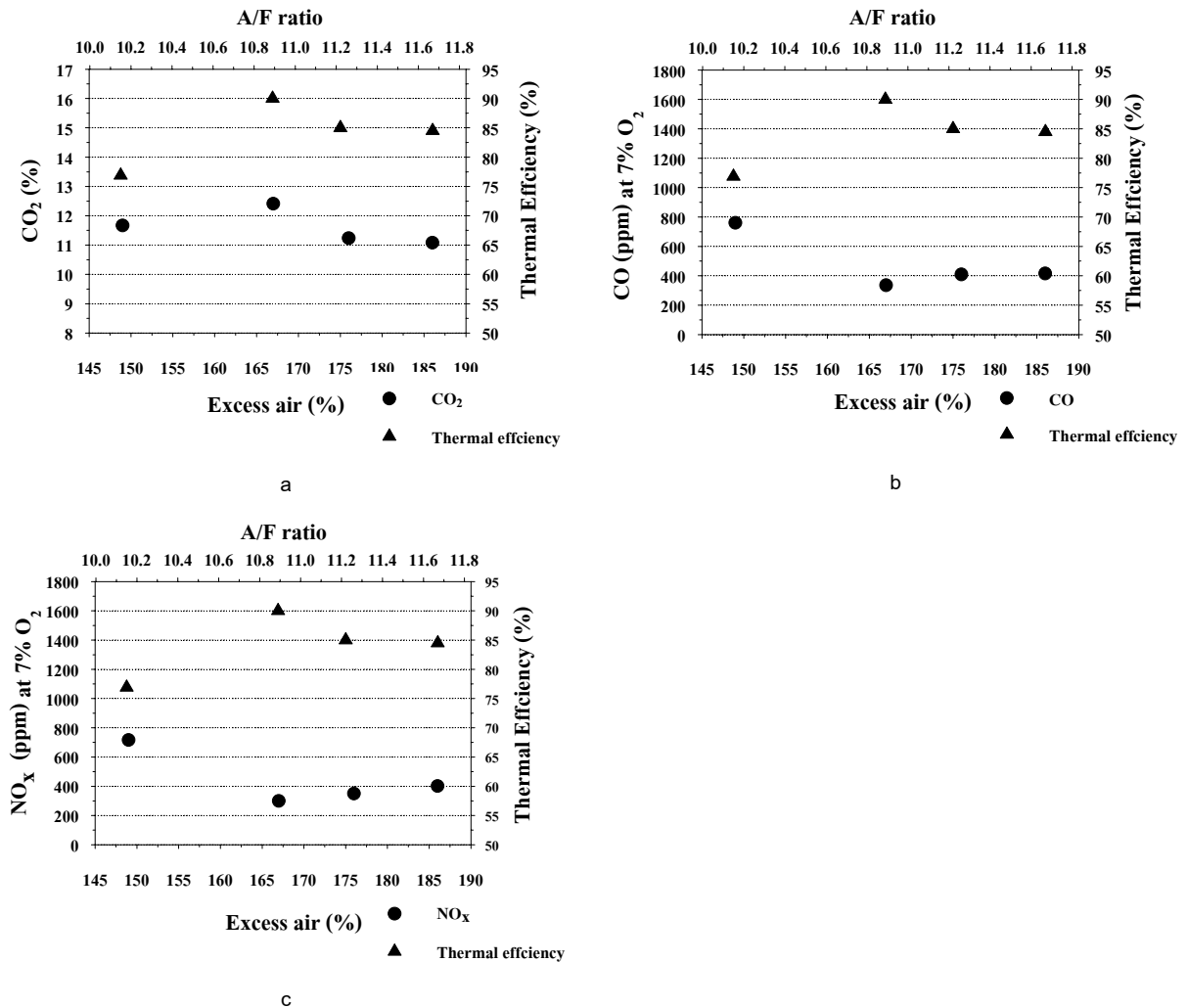
รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางออกและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา

ระยะเวลาการเผาไหม้ของอนุภาคให้อยู่ภายในเตามากขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์, เมื่อเพิ่ม m_1 ซึ่งเท่ากับ $2.31 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_1 = 19 \text{ m/s}$, 176%EA) พบว่า m_1 ดังกล่าวยังคงสามารถดักอนุภาคเชื้อเพลิงแกลบที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไว้ได้ ซึ่งสังเกตได้จากซีเถ้าที่ออก มามีขนาดเล็กและเย็นดี แต่การใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เกินความจำเป็นทำให้ต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งไปกับไนโตรเจนในอากาศส่วนเกินนั้น มีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย จึงทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ลดลงเหลือเท่ากับ 960°C ทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่ดีระหว่างแกลบและอากาศเกิดได้ไม่ดีทำให้ η_{th} ลดลงเหลือเท่ากับ 85% และมีค่าภาระความร้อนเตาเท่ากับ $0.75 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ เมื่อเพิ่ม m_1 ซึ่งเท่ากับ $2.43 \text{ m}^3/\text{min}$ ขึ้นอีก ($V_1 = 20 \text{ m/s}$, 186%EA) พบว่าเตา VFBC ต้องสูญเสียความร้อนให้กับไนโตรเจนในอากาศส่วนเกินที่เพิ่มมากขึ้นทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ยิ่งต่ำลงซึ่งเท่ากับ 906°C และทำให้ η_{th} ลดลงเหลือเท่ากับ 84% และได้ค่าภาระความร้อนเตาเท่ากับ $0.72 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ (คล้ายคลึงกับกรณี 176%EA)

3.2 องค์ประกอบก๊าซเสีย

จากการทดลองพบว่าปริมาณ CO_2 และ CO ที่ได้จากการเผาไหม้ (ดังในรูปที่ 5a, b) สอดคล้องกับอุณหภูมิก๊าซร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนทั้ง 4 เงื่อนไข จากผลการทดลองพบว่า

เมื่อ m_1 เท่ากับ $2.0 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_1 = 16 \text{ m/s}$, 149%EA) ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวนที่เหนือวงแหวนวอร์เทกนั้นไม่สามารถดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดได้ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.1) อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำซึ่งเท่ากับ 930°C และได้ η_{th} เท่ากับ 76% ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO_2 ที่ออกมาน้อยซึ่งเท่ากับ 11.6% ดังแสดงในรูป 4a และสอดคล้องกับการที่ได้ปริมาณ CO ออกมามากซึ่งเท่ากับ 760 ppm ดังแสดงในรูป 4b (โดยปริมาณ CO และ NO_x ที่นำเสนอทั้งหมดคิดเทียบกับปริมาณ O_2 ส่วนเกิน 7%) เมื่อเพิ่ม m_1 ซึ่งเท่ากับ $2.19 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_1 = 19 \text{ m/s}$, 176%EA) ทำให้ความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่แบบหมุนวนมากขึ้น เป็นการเพิ่มระยะเวลาการเผาไหม้ของอนุภาคให้มากขึ้น ทำให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้นได้อุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาส่งสูงเท่ากับ $1,030^\circ\text{C}$ ได้ η_{th} เท่ากับ 90% ทำให้ได้ปริมาณ CO_2 ออกมามากขึ้นซึ่งเท่ากับ 12.4% และสอดคล้องกับการที่ได้ปริมาณ CO ลดลงซึ่งเท่ากับ 335 ppm ดังแสดงในรูป 4a,b ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่ม m_1 ซึ่งเท่ากับ $2.31 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_1 = 19 \text{ m/s}$, 176%EA) พบว่าเป็นการใช้อากาศส่วนเกินที่เกินความจำเป็นทำให้เตาเผาต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งให้กับอากาศส่วนเกินที่เกินความจำเป็นให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ลดลงเหลือเท่ากับ 960°C และ η_{th} ลดลงเหลือเท่ากับ 85% ซึ่งพบว่า



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบก๊าซเสียและประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับปริมาณอากาศส่วนเกิน

สอดคล้องกับปริมาณ CO₂ ที่ลดลงซึ่งเหลือเท่ากับ 11.2% และสอดคล้องกับการที่ได้อัตราส่วน CO เพิ่มขึ้นซึ่งเท่ากับ 410 ppm ดังแสดงในรูป 4a,b ตามลำดับ และเมื่อเพิ่ม m₁ ซึ่งเท่ากับ 2.43 m³/min (V₁ = 20 m/s, 186%EA) พบว่าเตาเผา VFBC ต้องสูญเสียความร้อนให้กับอากาศส่วนเกินที่เกินความจำเป็นเพิ่มมากขึ้นทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำลงซึ่งเท่ากับ 906 °C และทำให้ η_{th} ลดลงเหลือเท่ากับ 84% และปริมาณ CO₂ ลดลงเหลือเท่ากับ 11.07% และได้ปริมาณ CO เพิ่มขึ้นซึ่งเท่ากับ 415 ppm ดังแสดงในรูป 4a,b ตามลำดับ

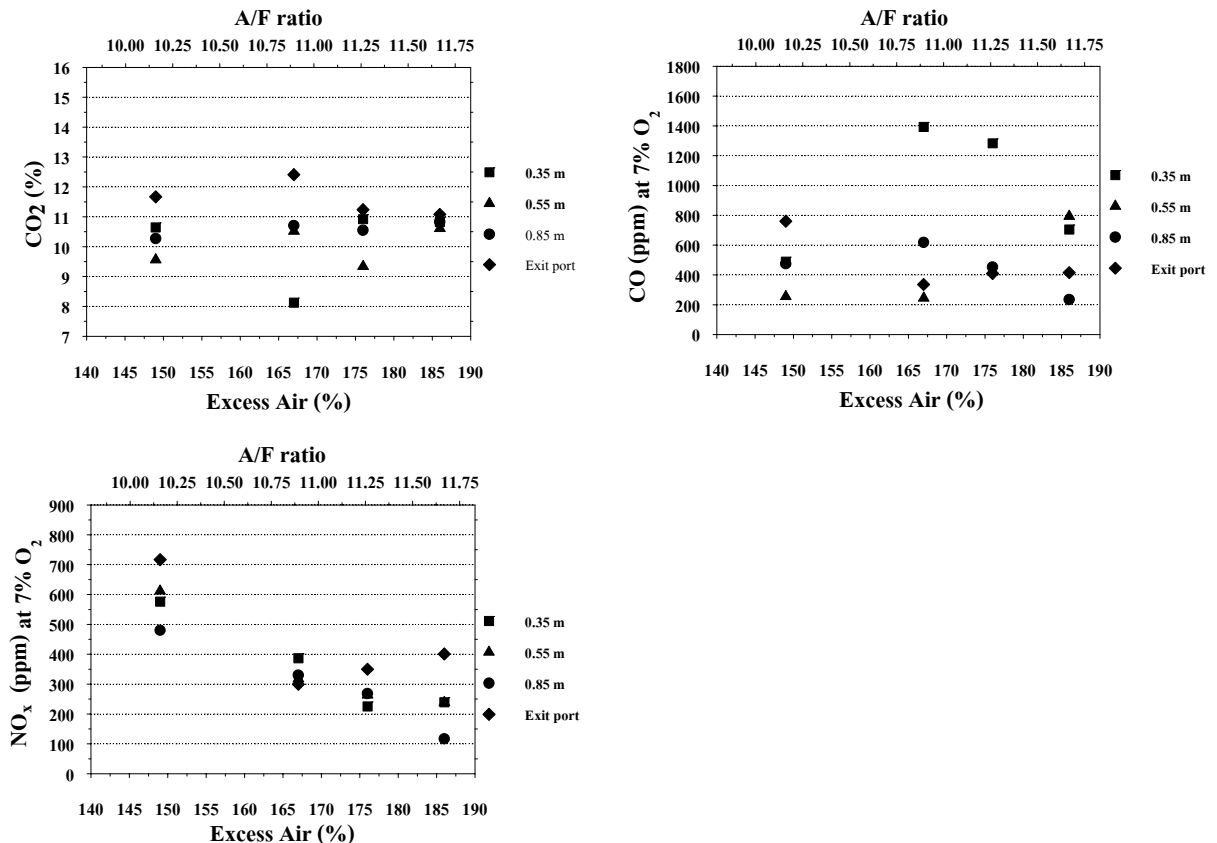
ในการศึกษาถึงปริมาณ CO₂ และ CO ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความสูง (Y) เท่ากับ 0.35 m, 0.55 m, 0.85 m และ ที่ตำแหน่งทางออกของเตาแสดงในรูปที่ 5a-d พบว่าไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO₂, CO และ NO_x ที่ได้จากการเผาไหม้ในแต่ละระดับความสูงของเตา VFBC กับปริมาณอากาศส่วนเกินได้ แต่มีข้อสังเกตว่าที่ 165% EA และ 175% EA มีปริมาณ CO มากที่ตำแหน่งความสูง (Y) เท่ากับ 0.35 m เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ใกล้กับห้องเผาไหม้รูปกรวยหางซึ่งเป็นที่ยอมรับของอากาศเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดและเชื้อเพลิงส่วนนี้จะถูกอากาศส่วนที่ส่งที่จ่ายมาด้านล่างกรวยดังแสดงในรูป (2b) ทำให้

เกิดการเผาไหม้ แต่เนื่องจากสัดส่วนเชื้อเพลิงมากกว่าปริมาณอากาศส่วนที่สอง (m₂) ที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จึงทำให้การได้ปริมาณ CO ออกมามาก

4.สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดังผลกระทบบของอากาศส่วนที่หนึ่งต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคเซเบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ โดยคงที่ SFR เท่ากับ 240 kg/h-m³, m₂ เท่ากับ 0.85 m³/min, m₃ เท่ากับ 0.76 m³/min

1. การเผาไหม้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ 1) ช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่โดยอุณหภูมิและประสิทธิภาพเชิงความร้อนแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้โดยเฉพาะที่ 167% EA สามารถเพิ่มอุณหภูมิ 310 °C เป็น 1,000 °C ในเวลา 55 นาที 2) ช่วงเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าที่ 167%EA เซ็นกัณมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่ 1,015 °C และมีการเปลี่ยนแปลงที่ ± 50 °C
2. ปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนและสมรรถนะของเตาโดยตรงโดยพบว่าที่อัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่งเท่ากับ 2 m³/min (149%EA) ไม่สามารถดักกอนุภาคที่ยังเผาไหม้



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบก๊าซเสียกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ระดับความสูงต่างๆ

ไม่หมดไม่ให้ออกจากเตาเผาได้ทำได้ η_{th} ต่ำ ซึ่งเท่ากับ 76% เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งเท่ากับ 2.19 m³/min (167%EA) ทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในเตาทำให้ชั้นของเถ้าที่ปกคลุมเชื้อเพลิงถูกทำลายทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีขึ้น และสามารถดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่ให้ออกจากเตาเผาได้ทำได้ η_{th} สูงขึ้นซึ่งเท่ากับ 90% ได้ค่าการะความร้อนเตาเท่ากับ 0.82 MW_{th}/m³ แต่ถ้าจ่ายปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งเพิ่มมากขึ้นอีก (176, 186 %EA) จะทำให้เตาต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งให้กับปริมาณอากาศส่วนเกินที่เกินความจำเป็นในการเผาไหม้ อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และ η_{th} ลดลงซึ่งเท่ากับ 85% และ 84% ตามลำดับ

3. ปริมาณ CO₂ และ CO สอดคล้องกับ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ และภาระทางความร้อน โดยพบว่าปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งเท่ากับ 2.19 m³/min (167%EA) ซึ่งจะทำให้ได้ปริมาณ CO₂ สูงสุดเท่ากับ 12.4%, CO ออกมาต่ำสุดเท่ากับ 335 ppm และ NO_x เท่ากับ 300 ppm ที่อุณหภูมิทางออกเท่ากับ 1,030 °C

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและคุณวิบูรณ์ เทเพนท์ สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวที่กรุณาให้คำแนะนำต่องานวิจัยนี้

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)