

เตาเผาไหม้วอร์เทก-ฟลูอิดิซ์แบบสองห้องเผาไหม้ สำหรับเชื้อเพลิงแกลบ

ฐานิตย์ เมธิยานนท์¹ นวัตกรรม พิริยะรุ่งโรจน์² และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์³

Abstract

Madhiyanon, T.¹, Piriyaarungroj, N.¹ and Soponronnarit, S.²

**A novel vortex-fluidized bed combustor with two combustion chambers
for rice-husk fuel**

Songklanakar J. Sci. Technol., 2004, 26(6) : 875-893

A novel vortexing-fluidized bed combustor (VFBC) using rice-husk as fuel was developed and presented. The combined characteristics of vortex combustion and fluidized bed combustion are the main features of the VFBC, which was designed to achieve high thermal capacity ($MW_{th} m^{-3}$), high thermal efficiency and low diameter to height ratio. The VFBC comprises a vertical cylinder chamber and a conical base, which provides a bed for incompletely combusted fuel. The overall dimensions are 1.10 m in height and 0.40 m in diameter. To evaluate combustor performance, the specific feed rate of fuel and mass flow rates of the primary, secondary, and tertiary air were varied independently of one another. The combustion appeared into two zones characterized by different combustion behaviors, i.e. 1) vortex combustion above the vortex ring and 2) fluidized bed combustion below the vortex ring. The fluidized bed zone has uniform

¹Department of Mechanical Engineering, Mahanakorn University, 51 Cheum-Sampan Road, Nong Chok, Bangkok 10530 Thailand. ²School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 91 Prachauthit Road (Suksawad 48), Bangmod Thung Kharu District, Bangkok 10140 Thailand.

¹Ph.D.(Energy Technology), ²M.Sc.(Mechanical Engineering), ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 51 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 ³Ph.D.(Production and Processing of Vegetable Raw Materials), ศาสตราจารย์, คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400

Corresponding e-mail: thanid_m@yahoo.com

รับต้นฉบับ 6 กุมภาพันธ์ 2547 รับลงพิมพ์ 27 มิถุนายน 2547

temperature distributions across the cross-section of the combustor. The swirling of air above the vortex ring and the vortex ring itself played important roles in preventing the escape of combustion particulates. Bottom ash appeared as fine black and grey particles of ash, which ranged in size from 200 to 600 μm . Fluidization could be initiated without the assistance of any inert material mixed into the bed. The experimental results indicated that thermal efficiency did not depend on the secondary or tertiary airflows, but was significantly influenced by the excess air resulting from the combined total of the three airflows. The introduction of the tertiary airflow helped maintaining the temperature inside the combustor within acceptable levels. According to experimental conditions, i.e. a specific feed rate of 240 $\text{kg h}^{-1}\text{m}^{-3}$ and excess air (157%), it was found that the VFBC could achieve an exit gas temperature of 1060°C, thermal efficiency of 95%, and thermal capacity of 0.91 $\text{MW}_{\text{th}} \text{m}^{-3}$. The amounts of CO_2 , CO, and O_2 gases emitted were directly related to thermal efficiency, and the amounts of CO and NO_x were 50 and 380 ppm, respectively.

Key words : biomass, combustor, cyclone, fluidization, solid fuel, vortex ring

บทคัดย่อ

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ นวัตกรรม พิริยะรุ่งโรจน์ และ สมชาติ โสภณธรณฤทธิ
เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดแบบสองห้องเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแกลบ
ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2547 26(6) : 875-893

ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (Vortexing-Fluidized bed Combustor, VFBC) ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงโดยออกแบบให้มีการร่วมลักษณะเด่นของการเผาไหม้แบบวอร์เทคและฟลูอิดซ์เบดไว้ด้วยกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อต้องการเตาเผาไหม้แบบใหม่ที่ให้ค่าพิกัดความร้อน ($\text{MW}_{\text{th}} \text{m}^{-3}$) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง แต่ในขณะเดียวกันมีค่าสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำ เตาเผาที่ใช้ในการทดลองมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความสูงเท่ากับ 0.4 และ 1.10 เมตร ตามลำดับ และมีฐานเป็นรูปกรวยสำหรับรองรับอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมด ในการทดสอบสมรรถนะของเตาได้มีการแปรเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะและอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง สอง และสาม ในแต่ละการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าภายในเตาเผาไหม้จะถูกแบ่งออกเป็นห้องเผาไหม้สองส่วนตามลักษณะการเผาไหม้คือ 1) บริเวณที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทคขึ้นไปซึ่งมีลักษณะการเผาไหม้แบบวอร์เทค และ 2) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ด้านล่างวงแหวนวอร์เทคลงมาเกิดการเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบด ซึ่งสอดคล้องกับผลของการกระจายอุณหภูมิภายในเตาที่มีการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดเตาในส่วนนี้นอกจากนี้การหมุนวนของอากาศเหนือวงแหวนและตัววงแหวนเองมีส่วนสำคัญในการดักจับอนุภาคขนาดใหญ่ที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่ให้หนีออกไปจากเตาทำให้เถ้าที่ออกมามีลักษณะละเอียดสีดำนเทาโดยมีขนาดอยู่ในช่วง 200 ถึง 600 μm . การเกิดฟลูอิดซ์เบดในเตาไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยลงในเบด ประสิทธิภาพเชิงความร้อนไม่ขึ้นกับปริมาณอากาศส่วนที่สองหรือสาม แต่จะขึ้นกับปริมาณอากาศส่วนเกินทั้งหมดซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอากาศทั้งสามส่วน ผลของการจ่ายอากาศส่วนที่สามจะช่วยควบคุมอุณหภูมิภายในเตาไม่ให้สูงเกินไป จากการทดลองพบว่าที่อัตราการป้อนแกลบ 240 $\text{kg h}^{-1}\text{m}^{-3}$ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% จะได้แก๊สร้อนตรงทางออกเตามีอุณหภูมิ 1,060°C ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 95% และพิกัดความร้อนเตาที่ทำได้เท่ากับ 0.91 $\text{MW}_{\text{th}} \text{m}^{-3}$ โดยปริมาณ CO_2 , CO และ O_2 เป็นไปในแนวทางที่สอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยปริมาณ CO และ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากเตามีค่า 50 และ 380 ppm ตามลำดับ

เนื่องจากในแต่ละปี อุตสาหกรรมโรงสีข้าว
อุตสาหกรรมแปรรูปอาหารสัตว์ มีความต้องการพลังงาน
ความร้อนไปใช้ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก เช่น

ใช้ในการอบแห้ง ผลิตไอน้ำ เป็นต้น ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่าย
ในการดำเนินการสูงและประเทศต้องนำเข้าน้ำมันจากต่าง
ประเทศเข้ามาปีละจำนวนมาก จึงได้มีผู้ประกอบการหลาย

รายภายในประเทศผลิตเตาเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวล เช่น แกลบ ชังข้าวโพด เป็นต้น เพื่อใช้กับอุตสาหกรรมดังกล่าวโดยเตาที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ ได้แก่ เตาเผาไหม้แบบปล่องควันและตะแกรงเอียง และเตาเผาไหม้ไซโคลน ซึ่งในกรณีเตาเผาไหม้ไซโคลน (Gupta *et al.*, 1984) มีการเผาไหม้จะใช้หลักการของการไหลวนหรือการไหลแบบวอร์เทคได้เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายมาหลายทศวรรษแล้ว ซึ่งนอกจากทำหน้าที่ผลิตความร้อนแล้วยังทำหน้าที่ดักเก้าไม่ให้หลุดลอยออกไปพร้อมกับแก๊สเผาไหม้ด้วย ต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ (Singh *et al.*, 1980; Soponronnarit *et al.*, 2000 and Tumambig, 1984) สำหรับเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดก็ได้มีการพัฒนามานานแล้วเช่นกัน ส่วนใหญ่จะใช้กับเชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแต่ก็มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลเช่นกัน (Armesto *et al.*, 2002; Natarajan *et al.*, 1998 and Werther *et al.*, 2000) แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่เป็นทรงกลมและมีความหนาแน่นต่ำ เช่น แกลบ ชี้อย่าง เป็นต้น ทำให้ยากต่อการทำให้เกิดฟลูอิดซ์เซชัน จึงมีความจำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจำพวกทรายซิลิกา อลูมินา ผสมลงในเบดในอัตราส่วนที่เหมาะสม (Natarajan *et al.*, 1998 and Rao *et al.*, 2000) อย่างไรก็ตาม การผสมวัสดุเฉื่อยเหล่านี้ลงไปจะทำให้ความดันตกคร่อมห้องเผาไหม้มีค่าสูงมากจำเป็นต้องใช้พัดลมที่มีขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในส่วนนี้สูง และเมื่อประมาณ 10 กว่าปีมานี้ได้มีการพัฒนาเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดซึ่งใช้กับถ่านหินบดและเป็นเตาชนิดที่บ่อนเชื้อเพลิงเข้าทางด้านล่างของเบด (Nieh *et al.*, 1992;

Yang *et al.*, 1987 and Yang *et al.*, 1989) และได้มีการพัฒนาขึ้นโดยมีการเพิ่มอากาศส่วนที่สอง ซึ่งถูกฉีดเข้าไปในแนวสัมผัสในบริเวณ free board โดยจะทำให้เกิดการหมุนวนของแก๊สเผาไหม้และอนุภาคขึ้นในบริเวณ free board การฉีดอากาศส่วนที่สองสามารถทำได้ที่ระดับความสูงต่างๆ ของตัวเตา ผลของการเกิดวอร์เทคจากการฉีดอากาศเข้าไปในแนวสัมผัสนี้จะทำให้สามารถดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่ให้หลุดลอยออกไปจากเตาและยังทำให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคเชื้อเพลิง ระหว่างบริเวณเบดด้านล่างกับบริเวณที่เกิดวอร์เทคใน free board ส่งผลให้สามารถลดความสูงของเตาฟลูอิดซ์เบดลงได้ งานวิจัยเหล่านี้ (Nieh *et al.*, 1992; Yang *et al.*, 1987 and Yang *et al.*, 1989) คล้ายคลึงกับ U.S. Patent no. 4,867,079 (Sang *et al.*) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทย ยังไม่มีการผลิตขายแต่ในต่างประเทศได้มีการทำวิจัยในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีจุดเด่นที่น่าสนใจอยู่หลายประการ ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับเตาเผาไหม้ไซโคลน ได้ดังแสดงใน Table 1 และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของแก๊ส-อนุภาค ภายในเตาเผาไหม้วอร์เทคพบว่าบริเวณใกล้ผนังเตาอากาศที่จะมีการไหลในทิศทางลง (สู่ด้านล่างเตา) ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคภายในเตา และมีส่วนสำคัญให้ residence time นานขึ้น (Nieh *et al.*, 2000)

ขั้นตอนการออกแบบเตาเผาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (Vortex-Fluidized Bed Combustor, VFBC)

จากผลการศึกษาพฤติกรรมของอากาศ-แกลบภายใน

Table 1. Comparative characteristic of cyclone and the fluidized bed combustor (Natarajan, *et al.*, 1998 and Soponronnarit *et al.*, 2000)

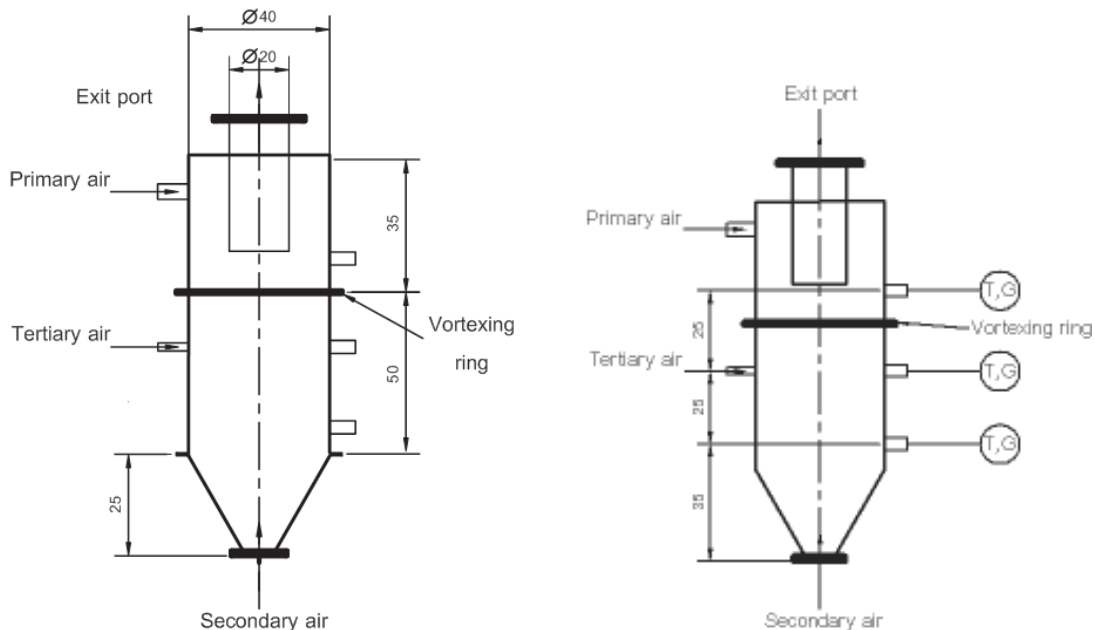
Fluidized bed Combustor	Cyclone Combustor
1. Thermal capacity approximately 1 MW/m ³	1. Thermal capacity approximately 0.34 MW/m ³
2. Height to inside diameter (H/D) approximately 13	2. Height to inside diameter (H/D) approximately 2.5
3. Thermal efficiency 80-95%	3. Thermal efficiency 60-80%
4. Need insert materials such as silica or alumina mixed into the bed	4. No need inert materials
5. Ash is conveyed from combustor through exhaust pipe	5. Require mechanical transportation for ash conveying

เตาเผาไหม้จำลอง (Madhiyanon *et al.*, 2003(a) and Madhiyanon *et al.*, 2003(b)) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่สามารถจะนำหลักการดังกล่าวไปใช้กับเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (Vortexing-fluidized bed combustion, VFBC) จริงได้จึงได้นำข้อมูลจากการศึกษาในข้างต้นมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเตาเผา VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเตาเผา VFBC เป็นเตาเผาที่ถูกออกแบบมาเพื่อรวมเอาลักษณะเด่นของเตาเผาแบบไซโคลนและเตาเผาแบบฟลูอิดซ์เบดเข้าด้วยกันโดยเตาเผา VFBC มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาเท่ากับ 40 ซม. สูง 110 ซม. ดังแสดงใน Figure 1a และสามารถแบ่งเตาเผาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกระบอก และส่วนที่สองรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกรวยหงายโดยบริเวณปลายกรวยถูกตัดเพื่อติดตั้งแผ่นกระจายอากาศ (Air Distributor) สำหรับอากาศส่วนที่สอง ซึ่งอากาศที่ถูกใช้ในการเผาไหม้กลบภายในเตาเผา VFBC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังแสดงใน Figure 1b คือ อากาศส่วนที่หนึ่ง (primary air) คือ

อากาศที่นำกลบเข้าสู่เตาเผาซึ่งจะถูกป้อนในแนวสัมผัสทางด้านบนของห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอก เพื่อทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศและกลบแบบวอร์เทค อากาศส่วนที่สอง (secondary air) จะถูกจ่ายผ่านแผ่นกระจายลมเข้าสู่เตาเผา VFBC ที่บริเวณด้านล่างของห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยหงายทำให้เกิดพฤติกรรมแบบฟลูอิดซ์เบดทั่วในบริเวณของห้องเผาไหม้ที่อยู่ถัดจากวงแหวนวอร์เทคลงมา โดยรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกรวยหงายจะช่วยทำให้กลบลอยตัวได้ง่ายและอนุภาคในเบดมีการหมุนเวียนทั่วถึงโดยไม่ต้องใช้วัสดุเฉื่อยมาผสมลงในเบด และอากาศส่วนที่สาม (tertiary air) จะเป็นอากาศที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งด้านข้างเตาเผาแบบทรงกระบอกในระดับความสูงเท่ากับ 60 ซม. เพื่อลดอุณหภูมิในห้องเตาเผา

วิธีการทดลอง

แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ



(a) Dimensions of VFBC

(b) Temperature (T) and combustion gas component (G) measure positions

Figure1. Dimensions and Temperature measure positions of VFBC. (unit : cm.)

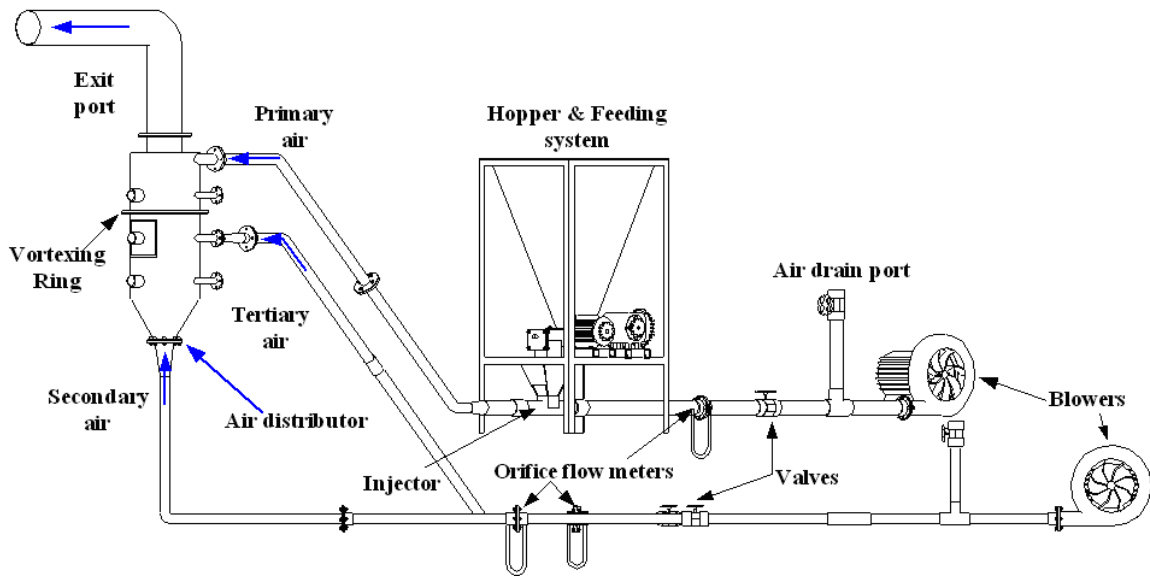


Figure 2. Schematic diagram of the overall experimental set-up of VFBC.

1. การทดลองเบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC

เตรียมอุปกรณ์การทดลองดังแสดงใน Figure 2 ทำการติดเตาเผาโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงและอุ่นเตาจน

อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ประมาณ 600°C จึงเริ่มทำการทดลอง

1. ปรับอัตราการไหลของอากาศและแกลบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลองที่ 1-6 ใน Table 2 ในการทดลอง

Table 2. The operating conditions of 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)	
The preliminary study of VFBC operation condition	1	160	2.75	22.7	0.97	2	-	-	288
	2	187	2.75	22.7	0.97	2	-	-	233
	3	213	2.75	22.7	0.97	2	-	-	192
	4	240	2.2	18.2	0.97	2	-	-	117
	5	240	2.33	19.2	0.97	2	-	-	125
	6	240	2.75	22.7	0.97	2	-	-	157
The study of the effects of tertiary airflow on performance of VFBC	7	240	2.06	17	0.85	1.75	-	-	108
	8	240	2.06	17	0.85	1.75	0.37	12.3	133
	9	240	2.06	17	0.85	1.75	0.76	25.0	157
	10	240	2.06	17	0.85	1.75	1.12	37.0	182
The study of the effects of secondary airflow on performance of VFBC	11	240	2.06	17	0.66	1.35	0.75	25.0	145
	12	240	2.06	17	0.93	1.92	0.75	25.0	163
	13	240	2.06	17	1.22	2.5	0.75	25.0	182

จะใช้พัดลมอัดอากาศ 2 ตัว ตัวละ 2.2 kW ในการวัดอัตราการไหลของอากาศใช้ออร์ทิสมิเตอร์ซึ่งถูกปรับเทียบจาก Hot wire anemometer ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 3% ของค่าที่วัดได้ และสามารถควบคุมอัตราการป้อนของแกลบโดยใช้อินเวอเตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ป้อนแกลบ

2. เริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC ทุก 5 นาที จนครบ 120 นาที โดยใช้ Thermocouple type K และใช้ตัวชั่งบอ ซึ่งมีความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$

2. การศึกษาผลของอากาศส่วนที่สองและสามต่อสมรรถนะของ VFBC

(อุปกรณ์การทดลองเป็นชุดเดียวกับชุดศึกษาการทดลองเบื้องต้น เพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC)

1. การปรับอัตราการไหลของแกลบและอากาศให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลองที่ 7-13 ใน Table 2

2. เริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $Y = 0.35$ เมตร โดยอ้างอิงตำแหน่งความสูงจากแผ่นกระจายลม (Air distributor) ที่ตำแหน่ง $r/R = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95$ และ 1.0 หลังจากนั้นทำการเก็บซีเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ (เมื่อ r คือ ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในแนวรัศมีของเตาเผาไหม้ VFBC และ R คือรัศมีของเตาเผาไหม้ VFBC ซึ่งเท่ากับ 20 ซม.)

3. บันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกและตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Gas analyzer รุ่น Testo 350 XL

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-3 โดยบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $Y = 0.60$ เมตร และ 0.85 เมตร ตามลำดับ

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของเตานิยามได้ด้วยสมการดังนี้

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

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

T_c = อุณหภูมิแก๊สเสียที่ตำแหน่งทางออกของ VFBC

T_i = อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าของ VFBC

โดยกำหนดให้ $c_{p,g}$ ที่ตำแหน่งทางออกเท่ากับ $c_{p,a}$ ที่มีอุณหภูมิแก๊สเสีย

สมการที่ (1) อยู่บนสมมติฐานที่ว่า $\dot{m}_f \ll \dot{m}_a$ ดังนั้นมวลของแก๊สเสียจึงประมาณเท่ากับมวลของอากาศที่เข้าเผาไหม้

ผลการทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเบื้องต้น ดังนั้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของเตาเผา VFBC จึงได้กำหนดเงื่อนไขทดลองออกเป็น 6 เงื่อนไขโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของแกลบและอากาศต่างๆ กันดังแสดงใน Table 2 เงื่อนไขการทดลองที่ 1-6

1. การทดลองเบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC

จากผลการทดลองสามารถสรุปในประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1.1 จากการสังเกตการเผาไหม้ผ่านช่องมองของเตาเผา VFBC พบว่าการเกิดฟลูอิดเซชันจะครอบคลุมบริเวณตั้งแต่ด้านล่างของเตาเผา VFBC จนถึงบริเวณที่เป็นที่ตั้งของวงแหวนวอร์เทค (Vortexing ring) ทุกเงื่อนไขการทดลองดังแสดงใน Table 2 ซึ่งการเกิดฟลูอิดเซชันของแก๊สเผาไหม้กับอนุภาคภายในของเตาเผาจะสอดคล้องกับการเกิดฟลูอิดเซชันของอากาศ-แกลบในกรณีเตาเผาไหม้จำลอง (Madhiyanon *et al.*, 2003(a) and Madhiyanon *et al.*, 2003(b))

1.2 การเกิดฟลูอิดเซชันภายในเตาเผา VFBC ไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยจำพวกทรายซิลิกาหรืออลูมินาลงในเบดเหมือนเช่นในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเซชันโดยทั่วไป

1.3 เตาเผา VFBC สามารถทำอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific rice husk feed rate = SFR) ได้ 240 kg/h/m^3 ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% เมื่อคำนวณเป็นค่าพิกัดความร้อนของเตา (โดยกำหนดให้ HHV ของแกลบ = 14.5 MJ/kg) ที่ η_{th} เท่ากับ 95% จะมีพิกัดความร้อนเท่ากับ $0.91 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ซึ่งความจริงอาจสามารถป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตราที่มากกว่านี้ได้ ถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินให้มากขึ้นโดยการจ่ายอากาศส่วนที่สามเข้าไปในเตา จากการทดลองจะเห็นว่า SFR ที่เตาเผา VFBC ทำได้มีค่าใกล้เคียงกับของเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่ง SFR มีค่าประมาณ 265 kg/h/m^3 (Natarajan *et al.*, 1998) และสูงกว่าที่เตาเผาไหม้

ไซโคลนที่ผลิตขายอยู่ภายในประเทศทำได้ ซึ่ง SFR มีค่าสูงสุดประมาณ 110 kg/h/m^3 สำหรับในงานวิจัยนี้เนื่องจากมีข้อจำกัดของพัดลมอัดอากาศที่ใช้ในการทดลองจึงได้กำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไว้สูงสุดเท่ากับ 240 kg/h/m^3

1.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา (η_{th}) ในกรณีที่ค่า SFR เท่ากับ 240 kg/h/m^3 เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 157% ดังแสดงใน Figure 3 (เส้นกราฟ F) พบว่าค่า η_{th} จะเพิ่มขึ้นไปตามเวลาที่เตาทำงาน โดยจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 90 นาที (และเป็นจริงสำหรับในกรณีอื่นๆ ด้วย) โดย η_{th} จะมีค่าประมาณ 95% ซึ่งเท่ากับในกรณีของเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดซึ่ง η_{th}

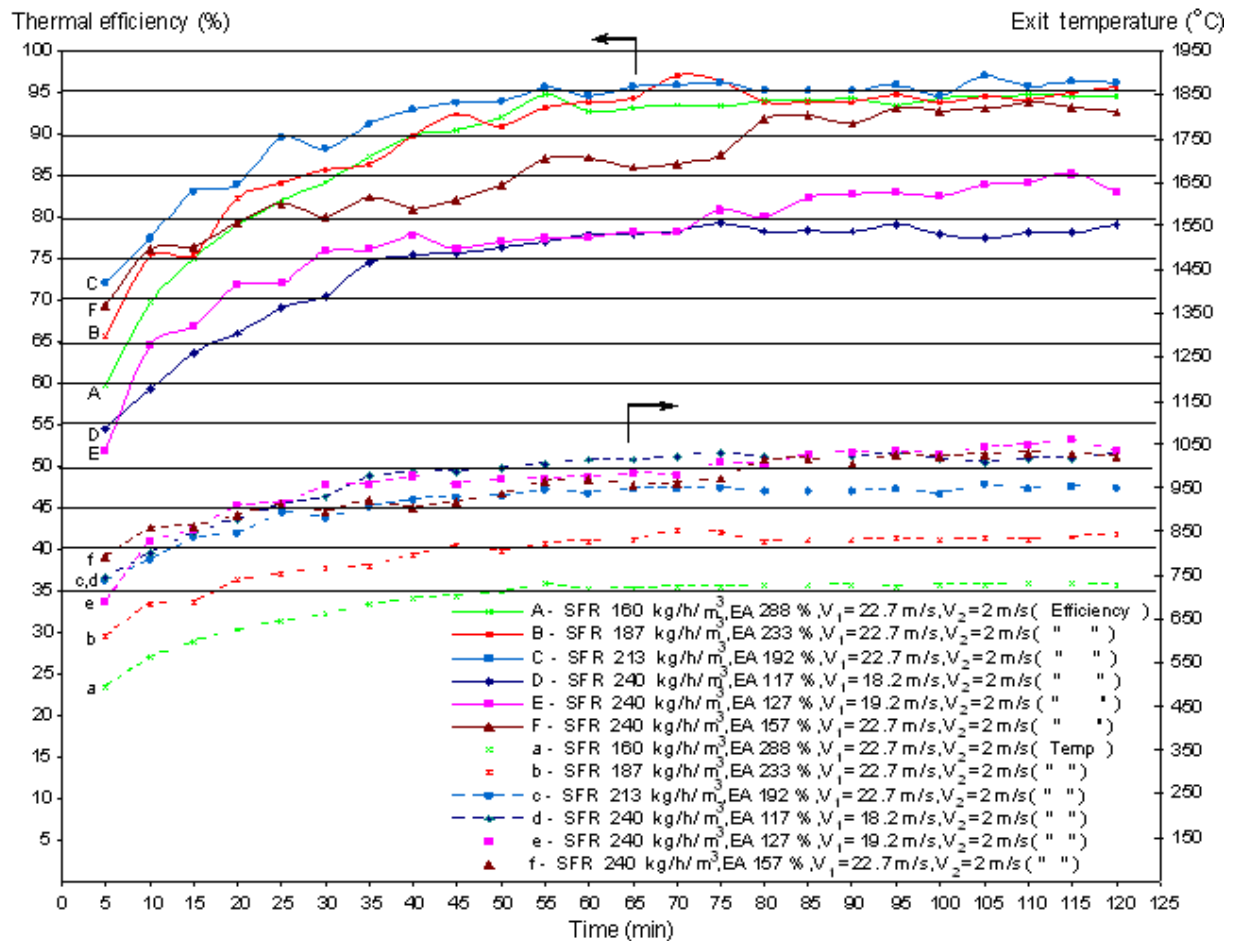


Figure 3. The variation of thermal efficiency of VFBC and exhaust gas temperature with a variety of specific rice husk feed rate(SFR) and primary air velocities (v_1). (Secondary air velocity (v_2)= 2 m/s; EA = Excess air)

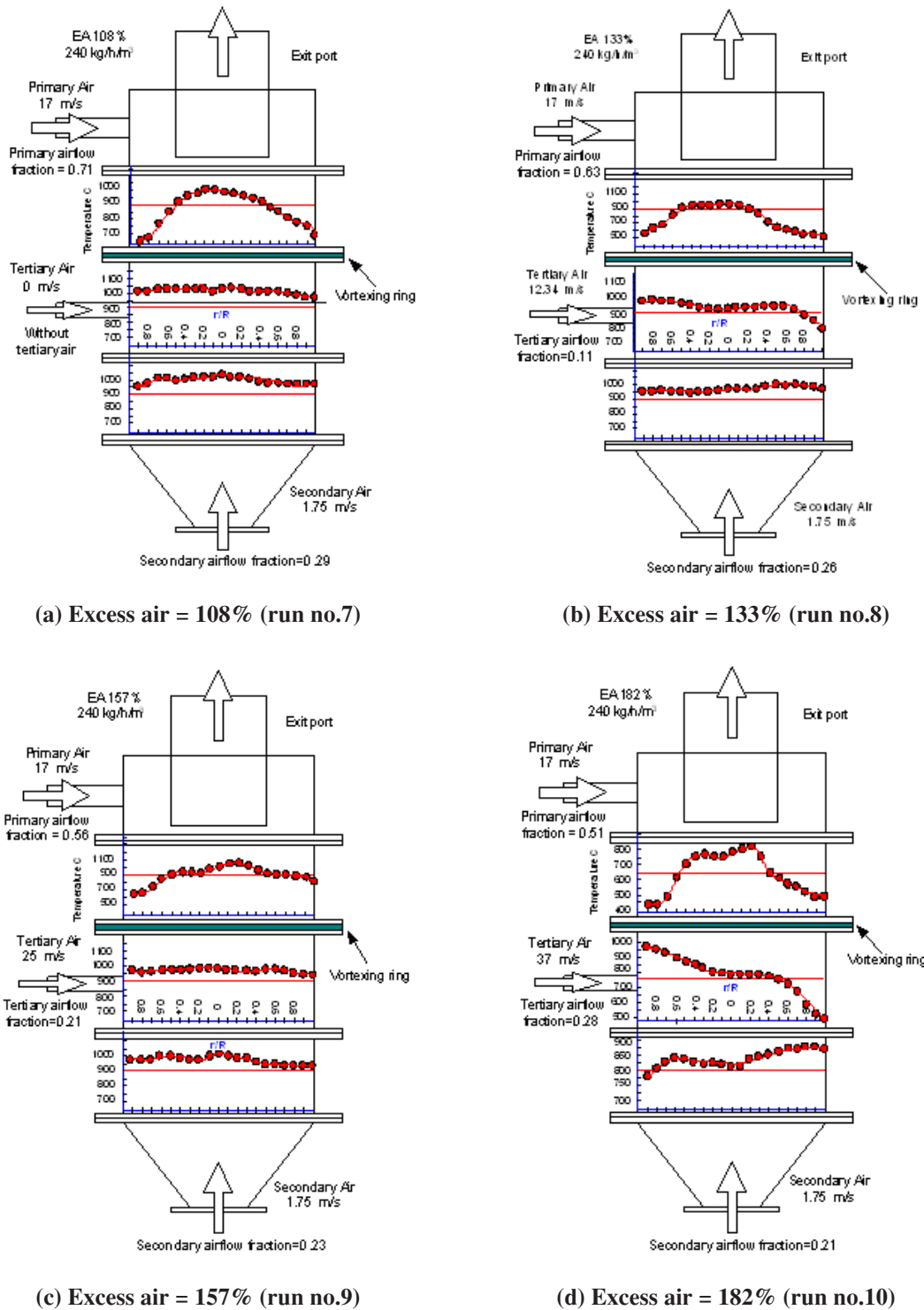


Figure 4. Temperature distributions inside VFBC at distance of 0.35, 0.6 and 0.8 M. above air distributor according to run nos. 7-10

มีค่าในช่วง 90-95% และสูงกว่าของเตาไซโคลนมาก ซึ่ง η_{th} มีค่าประมาณ 65-80%

1.5 อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ทางออกของเตาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาทีแรกของการทดลอง และจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็จะเริ่มลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้จะมีอุณหภูมิประมาณ 900°C ในเวลาเพียง 20 นาที และถึง 1,000°C ในเวลาประมาณ 80 นาที ดังแสดงใน Figure 3 (เส้นกราฟ f)

1.6 ในกรณีที่ค่า SFR 240 kg/h/m³ ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% ซึ่งถ้าที่ออกจากเตาเผาจะมีลักษณะเป็นเถ้าปนขนาดประมาณ 200-600 μm . มีสีดำปนเทา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนคาร์บอนในเชื้อเพลิงไปเป็นแก๊สเผาไหม้ (carbon conversion efficiency) ได้ดี ซึ่งมีสาเหตุจากการหมุนวนแบบวอร์เทคที่รุนแรงในบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนและตัววงแหวนเองทำหน้าที่ดักอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้ไม่หลุดออกจากเตาเผา VFBC ได้ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมที่การเกิดมานอากาศที่ใช้ดักอนุภาคภายในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดแบบจำลอง (Madhiyanon *et al.*, 2003(a) and Madhiyanon *et al.*, 2003(b))

จากผลการทดลองข้างต้นจึงได้เลือกเงื่อนไขที่ทำให้เตาเผา VFBC ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาสูงสุดคือที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุด (SFR) เท่ากับ 240 kg/h/m³ ดังแสดงใน Figure 3 (เส้นกราฟ F) โดยใช้เป็นเงื่อนไขที่มีการใช้อากาศส่วนที่สาม

2. การศึกษาผลของปริมาณอากาศส่วนที่สามต่อสมรรถนะของ VFBC

2.1 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา VFBC

ในการทดลองนี้กำหนดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจำเพาะ 240 kg/h/m³ และทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สามดังแสดงในเงื่อนไขการทดลองที่ 7-10 ใน Table 2 การกระจายอุณหภูมิภายใน VFBC สามารถแบ่งออกเป็นสองบริเวณคือ 1) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทค พบว่าการกระจายอุณหภูมิของทั้งสี่การทดลองดังแสดงใน Figure 4(a-d) กระจายอุณหภูมิที่คล้ายคลึงกันเป็นรูปพาราโบลาคว่า โดยบริเวณ

ขอบผนังจะมีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากใกล้ตำแหน่งที่จ่ายอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนบริเวณแกนกลางของเตาเผาจะมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่แก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไหลผ่านเพื่อเข้าสู่ท่อที่เถ้าที่อยู่ด้านบนของเตาเผา 2) คือบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทค พบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 108, 133 และ 157% มีการกระจายอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดเตาที่ความสูงเท่ากับ 0.35 เมตร และ 0.60 เมตร ดังแสดงใน Figure 4(a-c) ซึ่งสะท้อนให้เห็นการเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบดขึ้นภายในเตาที่ระดับความสูงดังกล่าวโดยทั้งอากาศและอนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางแน่นอน (Random movement) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมที่การเคลื่อนที่ของอากาศภายในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดในแบบจำลอง (Madhiyanon *et al.*, 2003(a) and Madhiyanon *et al.*, 2003(b)) ส่งผลให้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะ (SFR) 240 kg/h/m³ สำหรับที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 182% ดังแสดงใน Figure 4(d) อุณหภูมิบริเวณผนังจะต่ำกว่าที่บริเวณอื่นภายในเตาเผาค่อนข้างมากสาเหตุมาจากการจ่ายอากาศส่วนที่สามในบริเวณนี้มากเกินไปทำให้มีการสูญเสียความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปกับการทำให้ไนโตรเจนในอากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นสำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตานับจากบริเวณที่ถัดจากวงแหวนวอร์เทคลงมา พบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 108% จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในช่วง 990-1,025°C และเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 133 และ 157% จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า 1,000°C โดยมีค่าในช่วง 930-975°C โดยที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% จะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) สูงสุดเท่ากับ 95% (กรณี C Figure 5) และพบว่าอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ตรงทางออกของเตามีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 1,060°C

2.2 สมรรถนะของเตา VFBC

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและพิกัดความร้อนของเตาเป็นค่าดัชนีที่ใช้บอกสมรรถนะของเตา โดยค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นดัชนีที่ใช้บอกความคุ้มค่าของการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง ส่วนพิกัดความร้อนของเตาซึ่งมีหน่วยเป็น MW_{th}/m³ เป็นตัวบ่งบอกถึงความคุ้มค่าในการใช้พื้นที่ภายในเตาโดยในทางเศรษฐศาสตร์แล้ว

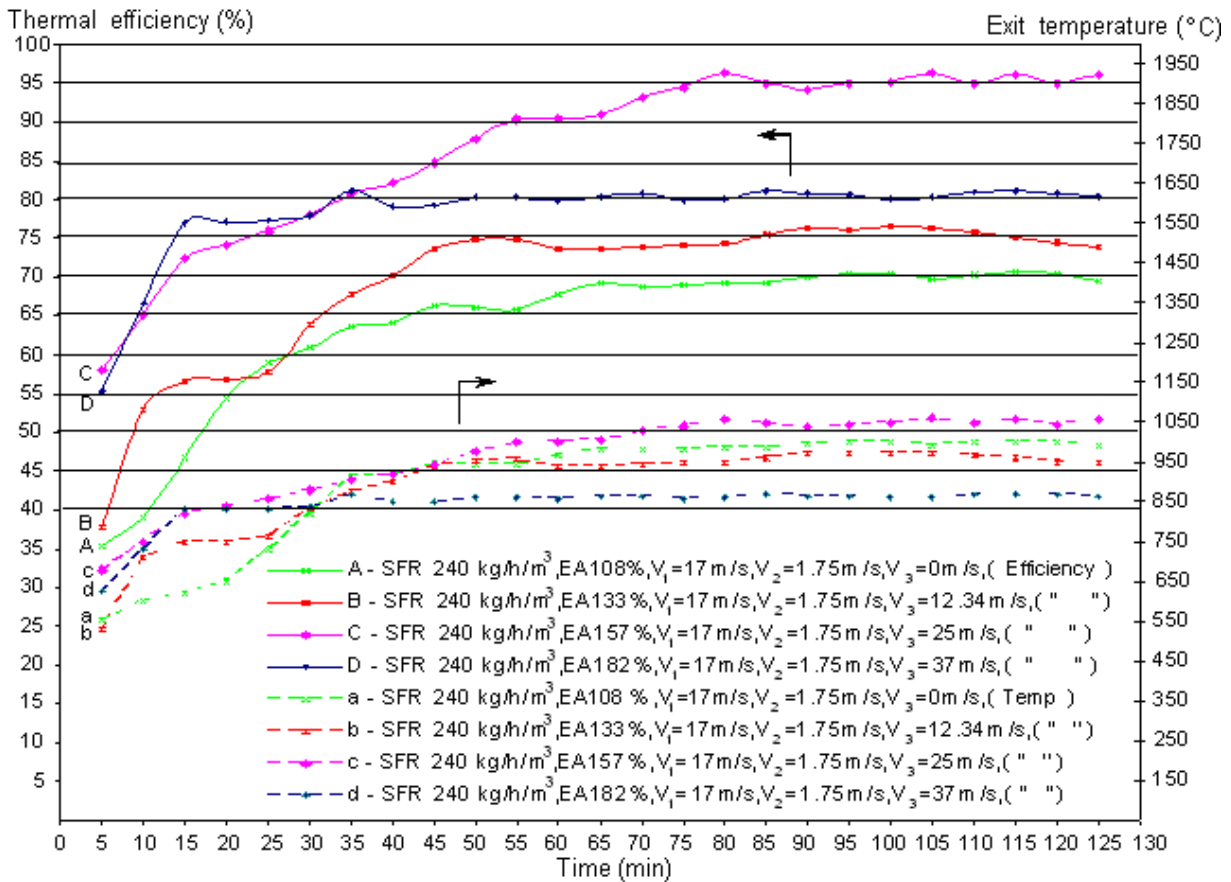


Figure 5. The variation of thermal efficiency of VFBC and exhaust gas temperature with a variety of tertiary air velocity (v_3). (Specific rice husk feed rate(SFR) = 240 kg/h/m³; Primary air velocities (v_1) = 17 m/s; Secondary air velocity (v_2) = 1.75 m/s; EA = Excess air)

ค่าพิกัดความร้อนของเตาจะแปรผกผันกับเงินทุนในการก่อสร้าง ดังนั้นในการประเมินสมรรถนะของเตาต้องพิจารณาจากดัชนีทั้งสองตัวไปพร้อมๆ กัน จาก Figure 3 และ 5 พบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% η_{th} จะมีค่าสูงสุดประมาณ 95% โดยมีค่าพิกัดความร้อนเตาเท่ากับ 0.91 MW_{th}/m³ (คำนวณโดยใช้ค่า HHV ของแกลบเท่ากับ 14.5 MJ/kg) ซึ่งทั้งค่า η_{th} และพิกัดความร้อนของเตาเผา VFBC ใกล้เคียงกับของเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธซ์เบด (Natarajan et al., 1998) แต่สูงกว่าเตาเผาไฮโคลน (Soponronnarit et al., 2000) จากการทดลองเบื้องต้นที่ไม่มีการใช้อากาศส่วนที่สาม (เงื่อนไขการทดลองที่ 1-6 ใน Table 2) และการทดลองที่มีการเพิ่มอากาศส่วนที่สาม

เข้าไป (เงื่อนไขการทดลองที่ 7-10) พบว่า η_{th} จะแปรผันตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกิน ซึ่งจากการทดลองพบว่าการใช้หรือไม่ใช้อากาศส่วนที่สามจะไม่มีผลต่อค่า η_{th} ซึ่งดูได้จากกราฟ Figure 6 แต่การใช้อากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในเตาไม่ให้เกิดเกิน 1,000°C ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินและ η_{th} ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะเท่ากับ 240 kg/h/m³ แสดงใน Figure 6 ซึ่งจะพบว่าในช่วงแรก η_{th} จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศส่วนเกินและหลังจากปริมาณอากาศส่วนเกินมากกว่า 157% ค่า η_{th} จะลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่าในช่วงแรกที่มีการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินน้อย ความปั่นป่วน (Turbulent) ที่เกิดจากความเร็วนៃของอากาศ

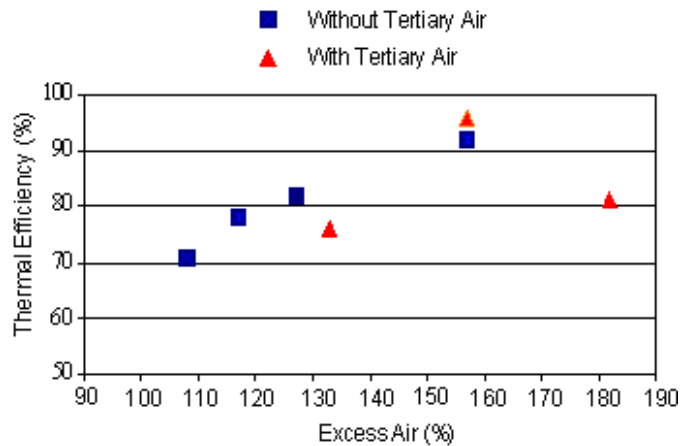


Figure 6. The effect of excess air on thermal efficiency.(run nos. 4-10; SFR = 240 kg/h-m³)

ภายในเตาไม่มากพอที่จะทำลายชั้นฟิล์มของเถ้าที่ปกคลุมพื้นผิวอนุภาคของแข็งที่ยังเผาไหม้ไม่หมดทำให้ O₂ แพร่ไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่พื้นผิวอนุภาคได้น้อยการเผาไหม้จึงไม่ค่อยสมบูรณ์และเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มมากขึ้นการเผาไหม้ก็จะสมบูรณ์ขึ้นจนกระทั่งได้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 95% ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% และจากนั้นถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นไปอีกจะทำให้ต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งกับการทำให้อากาศส่วนเกินมีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิในเตาเผา ผลก็คืออุณหภูมิในเตาจะต่ำลงดังแสดงใน Figure 5 (เส้นกราฟ d) ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่ดีพอจึงทำให้ η_{th} ต่ำลง

2.3 องค์ประกอบของแก๊สเสีย

จากการทดลองพบว่า CO₂ และ CO ที่เกิด

ขึ้นจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกินและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาดังแสดงใน Figure 7 (a,b) โดยถ้าใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมเท่ากับ 157% จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นสมบูรณ์และส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาสูง (η_{th} = 95 %) และเกิดปริมาณ CO₂ ในสัดส่วนที่สูง ในขณะที่สัดส่วนปริมาณของ CO จะมีค่าน้อยที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาสูงสุด ปริมาณ CO จะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 50 ppm และปริมาณ O₂ ส่วนเกินในแก๊สเสียที่ออกมาจากเตาดังแสดงใน Figure 8(a) จะแปรผันตรงกับ η_{th} โดยที่ปริมาณอากาศส่วนส่วนเกิน 87% จะมีค่า η_{th} ต่ำที่สุด จึงมีปริมาณ O₂ ส่วนเกินเหลืออยู่ในแก๊สเสียมากที่สุดประมาณ 9.5% ในขณะที่ถ้าใช้ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% ค่า η_{th} จะมี

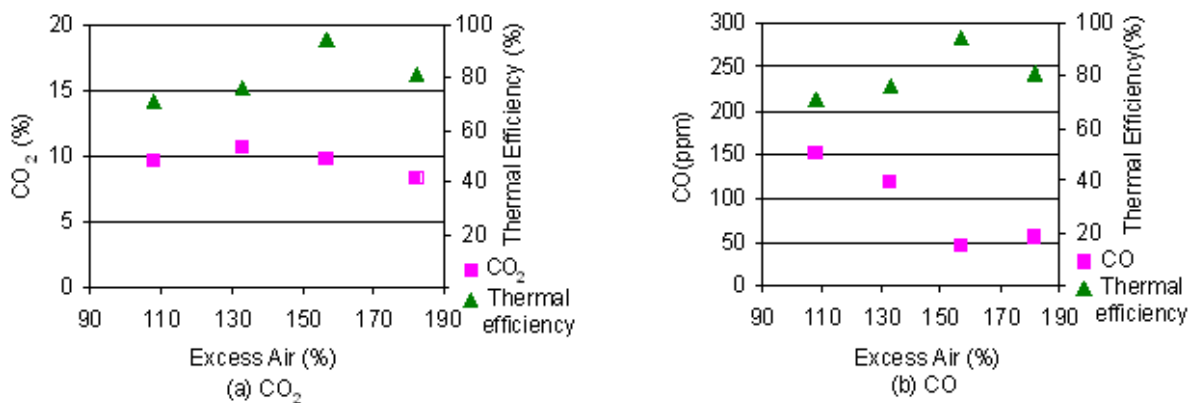


Figure 7. The effect of excess air on emitted gases and thermal efficiency. (run nos. 7-10)

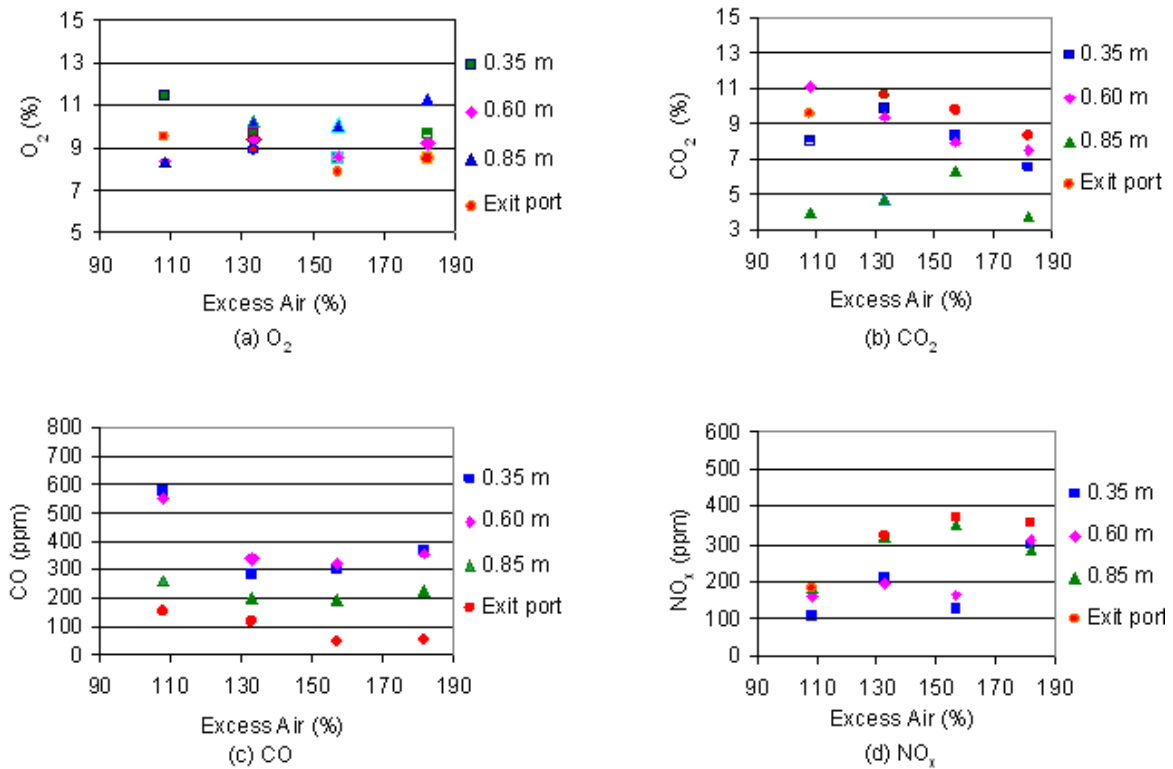


Figure 8. The variation of emitted gases with excess air at different heights of combustor. (run nos. 7-10)

ค่าสูงสุดทำให้ O_2 ถูกใช้ไปในการเผาไหม้มาก ปริมาณ O_2 ที่ออกมากับแก๊สเสียตรงทางออกจึงเหลือน้อยที่สุดประมาณ 7.8% การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊ส CO_2 , CO , O_2 และ NO_x ตามระดับความสูงของเตาแสดงใน Figure 8(a-d) โดยพบว่าปริมาณ CO_2 , O_2 และ NO_x ยังไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับความสูงของเตา มีเฉพาะ CO เท่านั้นที่พบว่าที่ทุกปริมาณอากาศส่วนเกินค่า CO จะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ระดับความสูง 0.35 เมตร เพราะปริมาณอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดซึ่งมากองรวมกันเป็นเบดที่บริเวณด้านล่างเตาซึ่งมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับปริมาณอากาศส่วนที่สองที่จ่ายจากด้านล่างทำให้การเผาไหม้ยังไม่สมบูรณ์หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยา reduction

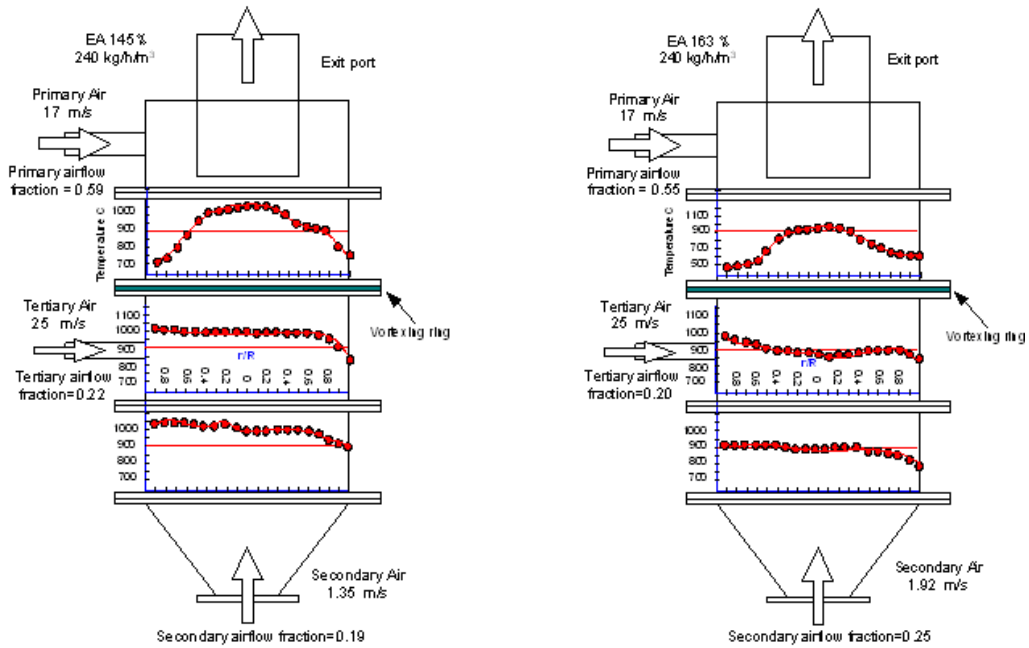
3. การศึกษาผลของปริมาณอากาศส่วนที่สองต่อสมรรถนะของ VFBC

ในการทดลองนี้ได้กำหนดอัตราการไหลของ

เชื้อเพลิงจำเพาะ 240 kg/h/m^3 อัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สามเท่ากับ $2.06 \text{ m}^3/\text{min}$ และ $0.75 \text{ m}^3/\text{min}$ ตามลำดับ และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศที่สอง ดังแสดงใน Table 2 เงื่อนไขการทดลองที่ 11-13

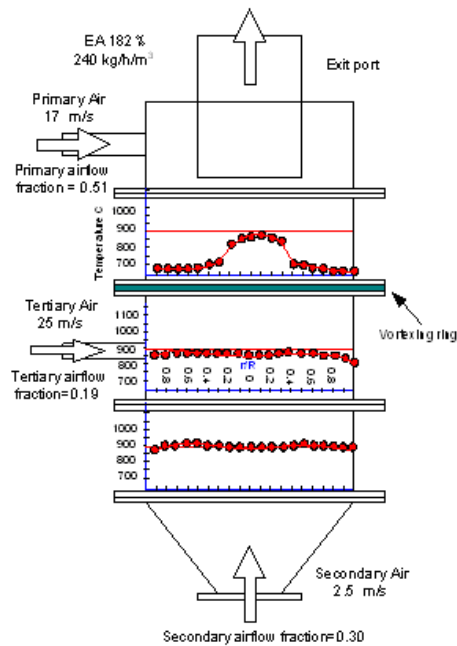
3.1 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา VFBC

Figure 9(a-c) แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองเท่ากับ $0.66 \text{ m}^3/\text{min}$ และ $1.22 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_2 = 1.35 \text{ m/s}$ และ 2.5 m/s) ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดในการทดลองของทั้ง 13 การทดลอง พบว่ายังคงก่อให้เกิดพฤติกรรมเผาไหม้แบบวอร์เทคและฟลูอิดไคซ์เบด โดยการกระจายอุณหภูมิภายใน VFBC แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทค ลักษณะการกระจายอุณหภูมิมิมีลักษณะคล้ายพาราโบลาคว่า 2) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทค พบว่าที่ระดับความสูงของเตาเท่ากับ



(a) Excess air = 145% (run no.11)

(b) Excess air = 163% (run no.12)



(c) Excess air = 182% (run no.13)

Figure 9. Temperature distributions inside VFBC at distance of 0.35, 0.6 and 0.8 M. above air distributor according to run nos. 11-13

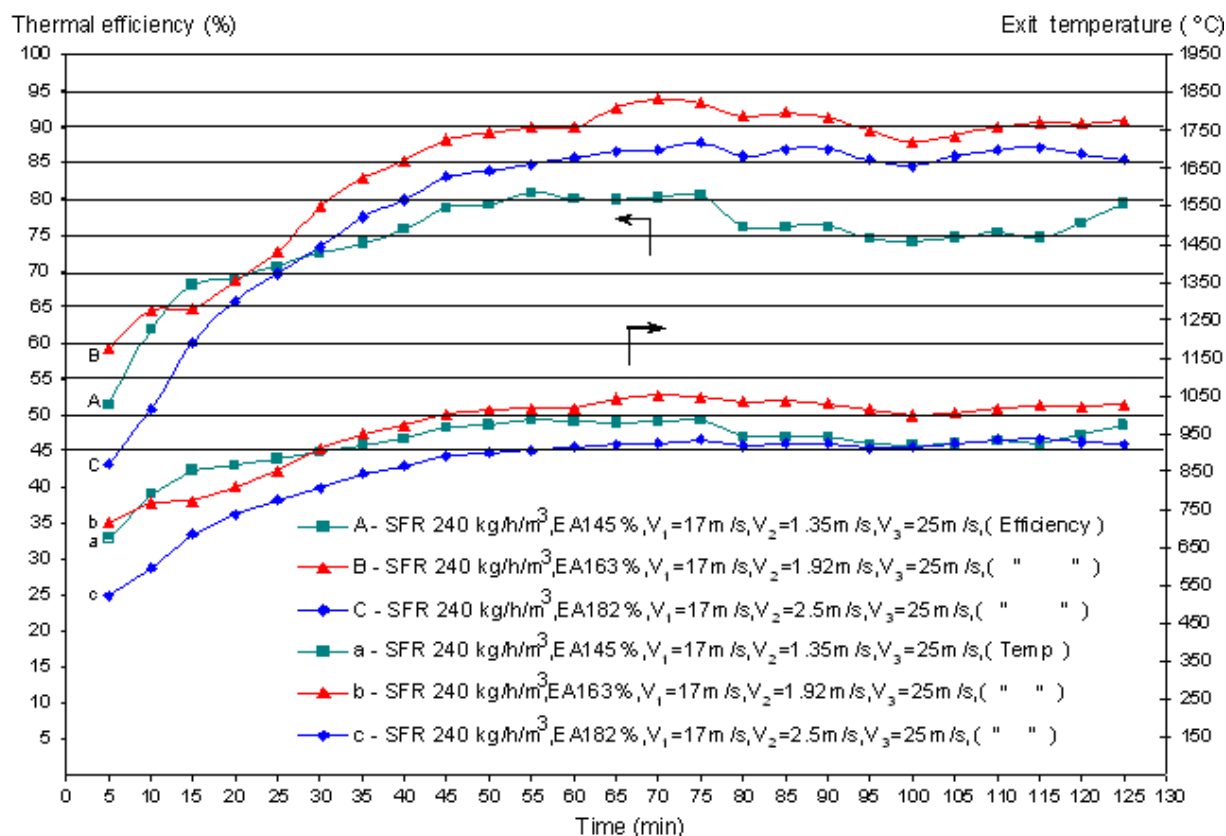


Figure 10. The variation of thermal efficiency of VFBC and exhaust gas temperature with a variety of secondary air velocity (v_2). (Specific rice husk feed rate (SFR) = 240 kg/h/m³; Primary air velocities (v_1) = 17 m/s; tertiary air velocity (v_3) = 25 m/s; EA = Excess air)

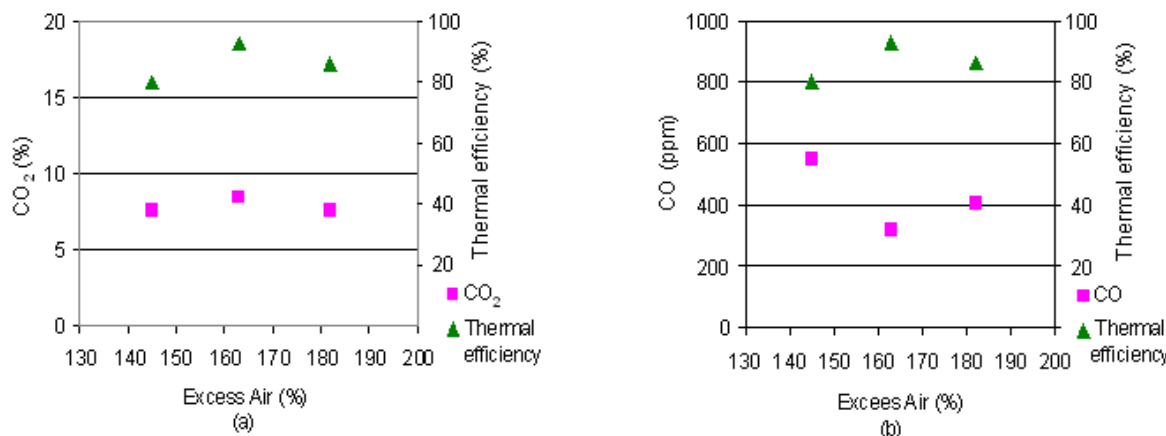


Figure 11. The effect of excess air on emitted gases and thermal efficiency. (run nos. 11-13)

0.35 เมตร, 0.6 เมตร มีการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ ซึ่งลักษณะการกระจายอุณหภูมิทั้ง 2 ส่วนคล้ายกับลักษณะการกระจายอุณหภูมิในหัวข้อ 2.1

3.2 สมรรถนะของเตา VFBC

จากการทดลอง เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองซึ่งมีผลทำให้ได้ค่าปริมาณอากาศส่วนเกิน 145% ($V_2 = 1.35$ m/s) และ 182% ($V_2 = 2.5$ m/s) ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนดังแสดงใน Figure 10 และ 11 เป็นไปในลักษณะคล้ายคลึงกับของกรณีการศึกษาเบื้องต้นที่ไม่มีการจ่ายอากาศส่วนที่สาม (หัวข้อ 1 Figure 3) และการศึกษาผลของอากาศส่วนที่สาม (หัวข้อ 2.2 Figure 5) กล่าวคือ ถ้าผลของการปั่นป่วนไม่มากพอ (กรณีนี้คือปริมาณอากาศส่วนที่สองน้อย) ทำให้ η_{th} ต่ำ ซึ่งเท่ากับ 78% และเมื่อเพิ่มดีกรีความปั่นป่วน (กรณีเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สอง) จะทำให้ η_{th} สูงขึ้น ซึ่งเท่ากับ 92% (คือกรณีอากาศส่วนเกิน 163% ตาม Figure 10 เส้นกราฟ B) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินมากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ตกลง ประกอบกับการที่ความเร็วในการทำให้เกิดฟลูอิดซ์เซชันสูงทำให้อุณหภูมิที่ยังเผาไหม้ไม่หมดหลุดออกจากเตาเผาได้ จึงจะทำให้ η_{th} ลดลง เหลือเท่ากับ 87% (คือกรณีอากาศส่วนเกิน 182% ตาม Figure 10 เส้นกราฟ C) นอกจากนี้ที่สำคัญจะเห็นได้จากผลการทดลองทั้งหมดตั้งแต่ต้น (หัวข้อ 1 เป็นต้นมา) จะพบว่าถึงแม้ว่าปริมาณอากาศในแต่ละส่วนจะแตกต่างกันไปแต่ถ้ารวมกันแล้วได้ปริมาณอากาศส่วนเกินใกล้เคียงกันจะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ไม่แตกต่างกันดังจะเห็นได้จากผลการทดลองดังต่อไปนี้

ในกรณีศึกษาผลของอากาศส่วนที่สองในหัวข้อนี้พบว่าเมื่อใช้อากาศส่วนเกิน 145% ($V_2 = 1.35$ m/s) ในการเผาไหม้ ทำให้มีอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยเท่ากับ 950°C และ η_{th} เท่ากับ 78% ดังแสดงใน Figure 10 (เส้นกราฟ a และ A) เมื่อนำมาคำนวณจะมีพิกัดความร้อนเท่ากับ 0.76 MW_{th}/m³ ซึ่งค่า η_{th} ดังกล่าวมีค่ามากกว่า η_{th} ที่ได้จากการใช้อากาศส่วนเกิน 108% และ 133% ของกรณีการศึกษาผลของอากาศส่วนที่สามในหัวข้อ 2.2 ซึ่งมีค่า η_{th} เท่ากับ 70% และ 75% ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 5 (เส้นกราฟ A และ B) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าค่า η_{th} ที่

เพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นผลมาจากความปั่นป่วนของปริมาณอากาศทั้งหมดที่ใช้มากกว่าที่จะขึ้นกับปริมาณอากาศที่ใช้ในแต่ละส่วน (อากาศส่วนที่สองหรือสาม) และเมื่อใช้อากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นเท่ากับ 163% ($V_2 = 1.92$ m/s) ของกรณีศึกษาผลของอากาศส่วนที่สองทำให้มีอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยเท่ากับ 1,025°C และ η_{th} เท่ากับ 92% ดังแสดงใน Figure 10 (เส้นกราฟ b และ B) ทำให้ได้พิกัดความร้อนของเตาเท่ากับ 0.9 MW_{th}/m³ ซึ่งทั้งค่า η_{th} และพิกัดความร้อนเตาจะใกล้เคียงกับของกรณีอื่นๆ ที่มีปริมาณอากาศส่วนเกินใกล้เคียงกันคือ 1) กรณีใช้อากาศส่วนเกิน 157% (กรณีมีการจ่ายอากาศส่วนที่สามเข้าสู่เตาเผา VFBC, run no.9 หัวข้อ 2) ทำให้มีอุณหภูมิทางออกสูงสุดเท่ากับ 1,060°C และ η_{th} สูงสุดเท่ากับ 95% ดังแสดงใน Figure 5 (เส้นกราฟ c และ C) โดยให้พิกัดความร้อนของเตาเท่ากับ 0.92 MW_{th}/m³ 3) กรณีใช้อากาศส่วนเกิน 157% (กรณีไม่มีการจ่ายอากาศส่วนที่ 3 เข้าสู่เตาเผา VFBC, run no.6 หัวข้อ 1) ทำให้มีอุณหภูมิทางออกเท่ากับ 1,020°C และ η_{th} เท่ากับ 92% ดังแสดงใน Figure 3 (เส้นกราฟ f และ F) นอกจากนี้พบว่าถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินให้มากขึ้นเท่ากับ 182% ($V_2 = 2.5$ m/s) ในการเผาไหม้จะทำให้มีอุณหภูมิทางออกลดลงเหลือเท่ากับ 924°C และ η_{th} ลดลงเหลือเท่ากับ 87% ดังแสดงใน Figure 10 (เส้นกราฟ c และ C) ทำให้พิกัดความร้อนของเตาลดลงเหลือเท่ากับ 0.85 MW_{th}/m³ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่มากเกินไปปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ส่วนหนึ่งต้องสูญเสียให้กับไนโตรเจนในอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดลง ซึ่งคล้ายกับกรณีใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 182% ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2

3.3 องค์ประกอบแก๊สไอเสีย

ในการวิเคราะห์ถึงปริมาณแก๊ส CO₂, CO และ O₂ ที่ตำแหน่งทางออกของเตาเผา VFBC เมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้ พบว่าทุกเงื่อนไขของการทดลองปริมาณแก๊ส CO₂, CO และ O₂ ที่เกิดขึ้นให้ผลที่สอดคล้องกับค่า η_{th} ที่ได้จากการเผาไหม้ในทิศทางที่เมื่อค่า η_{th} สูงขึ้น ปริมาณ CO₂ จะเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ CO และ O₂ จะลดลง

จาก Figure 11(a) แสดงให้เห็นว่า CO₂ ที่

ตำแหน่งทางออกจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการไหม้ โดยเมื่อใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 145% ทำให้ η_{th} ต่ำ ซึ่งเท่ากับ 78% เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.2) จึงทำให้มี CO_2 ที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณน้อย ซึ่งเท่ากับ 7.5% แต่เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินในการไหม้ให้มากขึ้น ซึ่งเท่ากับ 163% พบว่า η_{th} เพิ่มขึ้นเป็น 92% เนื่องจากการเกิดการปั่นป่วนในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณ CO_2 เพิ่มขึ้น ซึ่งเท่ากับ 8.5% อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 182% ทำให้ปริมาณ CO_2 ลดลงเหลือเท่ากับ 7.5% เนื่องจากการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ 1) เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับ η_{th} ที่ลดลงต่ำลง ซึ่งเท่ากับ 87% (ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.2) และ 2) สัดส่วนของปริมาณ CO_2 ลดลงเพราะสัดส่วนของอากาศทั้งหมดที่นำมาใช้ในการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้น ส่วนการพิจารณาปริมาณ CO ที่

เกิดจากการเผาไหม้พบว่า จาก Figure 11(b) แสดงให้เห็นว่า CO ที่ตำแหน่งทางออกจะแปรผันกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการไหม้ เมื่อใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 145% ในการเผาไหม้พบว่าเกิด CO ออกมาปริมาณมาก มีค่าเท่ากับ 547 ppm แสดงให้เห็นว่าเป็นเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้ η_{th} ต่ำเท่ากับ 78% แต่เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 163% พบว่าปริมาณ CO ลดลงเหลือเท่ากับ 315 ppm เนื่องจาก 1) ปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ η_{th} ที่เพิ่มขึ้นเป็น 92% และ 2) การที่ใช้อากาศส่วนเกินมากขึ้นทำให้สัดส่วนของ CO ลดลง (เช่นเดียวกับกรณีของ CO_2 ที่ EA = 182%) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินขึ้นไปอีกเป็น 182% ทำให้ CO กลับมาเพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 404 ppm เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับค่า η_{th} ที่ลดลงเหลือเท่ากับ 87% (ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินกับ η_{th} ที่ได้จากการเผาไหม้ ได้กล่าวไว้แล้ว

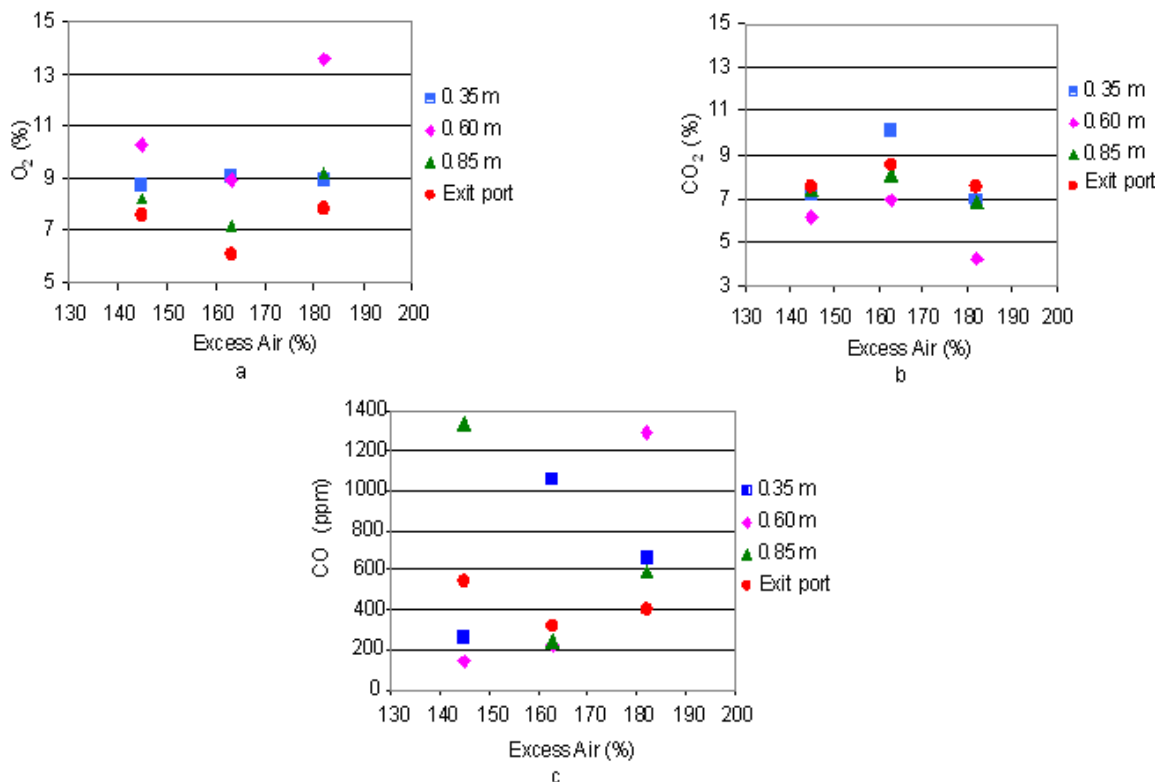


Figure 12. The variation of emitted gases with excess air at different heights of combustor. (run nos. 11-13)

Table 3. The specification of Gas analyzer model Testo 350 XL

GAS	Range
O ₂	0-25%
CO	0-10,000 ppm
NO	0-3,000 ppm
SO ₂	0-5,000 ppm

ในหัวข้อ 2.2) และในการพิจารณาปริมาณ O₂ ที่เกิดจากการเผาไหม้ จาก Figure 12(a) แสดงให้เห็นว่า O₂ ที่ตำแหน่งทางออก จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการไหม้ โดยเมื่อใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 145% ทำให้ η_{th} ที่ต่ำ ซึ่งเท่ากับ 78% ทำให้เหลือ O₂ ที่ไม่ได้ใช้ในการเผาไหม้จำนวนมาก ซึ่งเท่ากับ 7.6% แต่เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินในการไหม้เท่ากับ 163% ทำให้ η_{th} เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเท่ากับ 92% ซึ่งทำให้ O₂ ถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้มากขึ้น จึงทำให้เหลือ O₂ ออกมาน้อย ซึ่งเท่ากับ 6.1% และเมื่อปริมาณอากาศส่วนเกินใช้ในการไหม้เท่ากับ 182% ทำให้ O₂ เพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 7.8% เนื่องจาก 1) ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เหลือ O₂ ที่ไม่ได้ใช้ในการเผาไหม้จำนวนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ η_{th} ที่ลดลงเหลือเท่ากับ 87% และ 2) การเพิ่มอากาศส่วนเกินมากขึ้น เป็นการทำให้สัดส่วนของปริมาณ O₂ ในแก๊สเสียที่ได้จากการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้นตาม และจากผลการทดลองนี้ทำให้พบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊ส CO₂, CO และ O₂ ที่เกิดขึ้น สอดคล้องกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วตั้งแต่ต้น ส่วนในการวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊ส CO₂, CO และ O₂ ตามระดับความสูงของเตาแสดงใน Figure 12(a-c) โดยพบว่า ปริมาณ CO₂, CO และ O₂ ยังไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับความสูงของเตาซึ่งคล้ายกับผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3

สรุปผลการทดลอง

ในการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบซึ่งสามารถ

สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เตาเผา VFBC ที่มีสัดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงมีค่าต่ำเพียง 2.75 สามารถรวมพฤติกรรมการไหลของอากาศและแกลบแบบวอร์เทคและฟลูอิดซ์เบดขณะที่เกิดการเผาไหม้ได้ซึ่งสังเกตได้จากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาที่สามารถแบ่งออกเป็นสองบริเวณคือ 1) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทคโดยมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิลักษณะรูปพาราโบลาคว่ำแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลแบบวอร์เทค และ 2) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทคการกระจายอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดเตาแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบด

2. จากการรวมพฤติกรรมการเผาไหม้แบบวอร์เทคและฟลูอิดซ์เบดขณะที่เกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ตลอดทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของเตาเผา VFBC ทำให้เตาสามารถผลิตพิกัดความร้อนจำเพาะได้สูงสุด 0.91 MW_{th}/m³ ที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 95% และปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% โดยอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ทางออกประมาณ 1,060°C

3. การเกิดฟลูอิดซ์เซชันภายในเตาไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยจำพวกทรายซิลิกาหรืออลูมินา ลงไปในเบด

4. การติดตั้งวงแหวนวอร์เทคจะช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่หมุนวนอย่างรุนแรงบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทค โดยอนุภาคที่มีน้ำหนักมากจะไม่สามารถเคลื่อนที่ออกจากเตาเผาได้ ซึ่งถ้าที่ออกจากเตาเผา VFBC จึงมีขนาดเล็กละเอียดประมาณ 200-600 μm . และมีสีดำปนเทา

5. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะแปรผันตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกิน ในลักษณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศ

ส่วนเกินประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณอากาศส่วนเกินมีค่ามากเกินไปประสิทธิภาพเชิงความร้อนก็จะลดต่ำลง โดยปริมาณอากาศส่วนที่สองและสามจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเตา แต่ถ้าความเร็วอากาศส่วนที่สองที่ทำให้เกิดฟลูอิดิเซชันมากเกินไปจะทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดมีโอกาสดูดออกมาจากเตาได้ และอากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาไม่ให้เกิน 1,000°C

6. ปริมาณ CO₂, CO และ O₂ สอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกินและประสิทธิภาพของเตาโดยที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 95% จะให้ปริมาณ CO และ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากเตาค่าไม่เกิน 50 ppm และ 380 ppm ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย คุณวิบูรณ์ เทเพนท์ สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรมกลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวที่กรุณาให้คำแนะนำต่องานวิจัยนี้ และนักศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ช่วยเหลือในการทดลอง โดยมีรายชื่อดังต่อไปนี้ นายอำนาจ มากกลาง นายสิงห์ชัย ทรัพย์อุดมมาก นายวสันต์ ศรีคำมูล นายธีระวัธ อ่อนดี นายไกรสร ล้อสุวรรณ นายสุรสิทธิ์ ภูเมือง นายอนุชา ใจกล้า นายสุรัตน์ จตุรัสขสกุล นายอดิเรก ไสสอง นายวีระ ศรีอริยะกุล นายเสวี อรพัฒนานนท์ นายวรรณ วัณแป้น นายคำนวน เพ็ญรักษา และ นายสิทธิโชค นพคุณขจร

เอกสารอ้างอิง

- Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, k., Cabanillas, A. and Otero, J. 2002. Combustion Behavior of Rice Husk in a Bubbling Fluidized Bed, *B Bioenergy*, 23(3): 171-179.
- Becker *et al.*, Patent Number: 4,881,476. Cyclone Reactor with Internal Separation and Axial Recirculation.
- Gupta, A.k., Lilley, D.G and Syred, N. 1984. *Swirl Flows*. Abacus Press, Tunbridge Wells, England.
- Madhiyanon, T., Piriyanunroj, N., Nathakarannakule, A. and Soponronnarit, S. 2003(a). A Study on Air-Rice Husk Flow Behavior Cold Model, In Proc 4th the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering., Kasetsart University, Bangkok, Thailand, Much. 13-14, 2003: 332-343.
- Madhiyanon, T., Piriyanunroj, N., Nathakarannakule, A. and Soponronnarit, 2003(b). The Vortexing-Fluidized bed Combustor Cold Model: Experiment Study of Air-Rice Husk Flow Behavior, *K & D Journal of EIT.*, 14(4): 59-67.
- Natarajan, E., Nordin A and Rao A.N. 1998. Overview of Combustion and Gasification of Rice Husk in Fluidized Bed Reactor, *B Bioenergy*, 14(5/6): 533-546.
- Nieh, S. and Zhang, J. 2000. Swirling, Reacting, Turbulent Gas-Particle Flow in a Vortex Combustor, *Powder Technol.*, 122: 70-78.
- Nigh, S., Yang, G., Zhu, A.Q. and Zhao, C.S. 1992. Measurements of Gas-Particle Flows and Elutriation of an 18 i.d. Cold Vortexing Fluidized-Bed Combustor Model, *Powder Technol.*, 69: 139-146.
- Patent Number: 4,867,079. Combustor with Multistage Internal Vortices.
- Patent Number: 4,881,476. Cyclone Reactor with Internal Separation and Axial Recirculation.
- Rao, T.R., and Bheemarasetti, J.V. Ram. 2000. Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Sands, *Energy.*, 26(6): 633-644.
- Shang *et al.*, Patent Number: 4,867,079. Combustor with Multistage Internal Vortices.
- Singh, R., Maheshwari, R.C and Ojha, T.P. 1980. Development of a Husk Fired Furnace. *J. agric Engng Res.*, 25: 119-120.
- Soponronnarit, S., Swadisevi, T., Wetchacama, S, Shujinda, A. and Srisawat, B. 2000. Cyclone Rice Husk Furnace and Its Application on Paddy Drying, *Int. Energy J.*, 1(2): 67-75.
- Tumambig, J.A. 1984. Testing and Evaluation of Rice Hull-Fed Furnace for Grain Drying, *National Post Harvest Institute for Research and Extension.*, pp. 197-214.

- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.U., Ogada, T. and Siagi, Z. 2000. Combustion of Agricultural residues, *Prog. Energy Combust. Sci*, 26(1): 1-27.
- Yang, G. and Nieh, S. 1987. Particle Flow Pattern in the Freeboard of a Vortexing Fluidized Bed, *Powder Technol.*, 50: 121-131.
- Yang, G. and Nieh, S. 1989. On the Suspension Layers in the Freeboard of Vortexing Fluidized Beds, *Powder Technol.*, 57: 171-179.