การพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบ

Development of a Vortexing-Fluidized bed Combustor for Rice Husk Fuel

ฐานิตย์ เมธิยานนต์[1] นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์[1] อดิศักดิ์ นาถกรณกุล[2] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[2]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 51 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
โทร 02-9883666 ext. 244 หรือ 09-8160456 E-mail : thanid_m@yahoo.com[1]
[2]คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400
โทร 02-4708693-9 ext. 111 E-mail : somchart.sop@kmutt.ac.th[4]

บทคัดย่อ

เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟูอิไดซ์เบด(Vortex-Fluidized Bed Combustor,VFBC)สำหรับเชื้อเพลิงแกลบได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยรวมลักษณะของการเผาไหม้ร่วมวอร์เทคกับฟลูอิไดซ์เบดไว้ด้วยกันอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราการไหลของอากาศในแต่ละส่วนแตกต่างกันไปในแต่ละการทดลองจากการทดลองพบว่า ขณะที่เกิดการเผาไหม้ห้องเผาไหม้ของเตาเผาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามลักษณะการเผาไหม้คือ 1)บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทคขึ้นไปซึ่งมีลักษณะการเผาไหม้แบบวอร์เทค การหมุนวนของอากาศเหนือวงแหวนมีส่วนสำคัญในการช่วยดักจับอนุภาคขนาดใหญ่ที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่ให้หนีออกไปจากเตา และ 2)บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ด้านล่างวงแหวนวอร์เทคลงมาซึ่งเกิดการเผาไหม้แบบแบบฟลูอิไดซ์เบดจะเด่นชัดมากโดยมีการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดเตาซึ่งทำให้ได้ภาระความร้อนสูงสุดเท่ากับ 0.825 MW_{th}/m^3 การเกิดฟลูอิไดซ์เซชันภายในเตาไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยผสมลงในเบด และปริมาณอากาศส่วนเกินจะส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาโดยพบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 110% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาจะมีค่าสูงสุดประมาณ 85 % และอุณหภูมิแก๊สร้อนตรงทางออกมีค่าประมาณ 1,060 ^{o}C การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาไม่ให้เกินกว่า 1,000 ^{o}C โดยการปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สามให้เหมาะสม และสุดท้ายพบว่าปริมาณ CO และ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากเตาอยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่ามาตราฐานโดยมีค่าไม่เกิน 15 และ 118 ppm ตามลำดับ

Abstract

Vortexing-Fluidized Bed Combustor(VFBC) for rice husk with combining the features of vortexing-fluidized Bed combustion was developed in this research. Rice husk feed rate and airflow rate of each part were varied from experimental to the other. During combustion process, the experimental result shown that combustion chamber was devided into two categorizes by mechanism of combustion namely 1)combustion chamber occupying above the vortexing ring which vortexing combustor took place. The aggressive swirling of air above vortxing ring much help in trapping the large unburn partical and perventing partical escaping from the combustor and 2)combustion chamber locating below the vortexing ring which combustor was dominated by fluidized bed combustion resulted by the uniformity of the temperature distribution across the chamber. This efficient space utilization offered the highest thermal load of combustor that is 0.825 MW_{th}/m^3. Moreover , no any inert material was necessary to mix in to the bed for promoting fluidization. It was also found that the excess air directly affected on thermal efficiency and with 110% excess air gave the highest thermal efficiency of 85% and combustion gas temperature at the exit was around 1,060 ^{o}C. To controll temperatures inside the combustor to not exceed 1,000 ^{o}C ,the thirdly air could be supplied with appropriate airflow rate . Finally , the amount of CO and NO_x were less than 15 and 118 ppm. respectively , which were comsiderably lower than the acceptable standard level.

1. บทนำ

เนื่องจากในแต่ละปีอุตสาหกรรมโรงสีข้าวอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารสัตว์มีความต้องการพลังงานความร้อนไปใช้ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก เช่น ใช้ในการอบแห้ง ผลิตไอน้ำ เป็นต้น ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงและประเทศต้องนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเข้ามาปีละจำนวนมากจึงได้มีผู้ประกอบการหลายรายภายในประเทศผลิตเตาเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวล เช่น แกลบ ซังข้าวโพดเป็นต้นเพื่อใช้กับอุตสาหกรรมดังกล่าวโดยเตาที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ ได้แก่เตาเผาไหม้แบบปล่องควันและตะแกรงเอียง และเตาเผาไหม้ไซโคลนซึ่งเตาเผาไหม้ไซโคลน [1] การเผาไหม้โดยใช้หลักการของการไหลวนหรือการไหลแบบวอร์เทคได้เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายมาหลายทศวรรษแล้ว ซึ่งนอกจากทำหน้าที่ผลิตความร้อนแล้วยังทำหน้าที่ดักเถ้าไม่ให้หลุดลอยออกไปพร้อมกับแก๊สเผาไหม้ด้วยต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ [2, 3, 4] สำหรับเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดก็ได้มีการพัฒนามานานแล้วเช่นกันส่วนใหญ่จะใช้กับเชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแต่ก็มีการ

[1]Corresponding author

นำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลเช่นกัน [5, 6, 7] แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่เป็นทรงกลมและมีความหนาแน่นต่ำเช่น แกลบ ขี้เลื่อย เป็นต้น ทำให้ยากต่อการทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เชชัน จึงมีความจำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจำพวกทรายซิลิกา อลูมินา ผสมลงในเบดในอัตราส่วนที่เหมาะสม [5, 8] อย่างไรก็ตามการผสมวัสดุเฉื่อยเหล่านี้ลงไปจะทำให้ความดันตกคร่อมห้องเผาไหม้มีค่าสูงมากจำเป็นต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในส่วนนี้สูง และเมื่อประมาณ 10 กว่าปีมานี้ ได้มีการพัฒนาเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดซึ่งใช้กับถ่านหินบดและเป็นเตาชนิดที่ป้อนเชื้อเพลิงเข้าทางด้านล่างของเบด [9, 10, 11] และได้มีการพัฒนาขึ้นโดยมีการเพิ่มอากาศส่วนที่สอง ซึ่งถูกฉีดเข้าไปในแนวสัมผัสในบริเวณ free board โดยจะทำให้เกิดการหมุนวนของแก๊สเผาไหม้และอนุภาคขึ้นในบริเวณ free board การฉีดอากาศส่วนที่สองสามารถทำได้ที่ระดับความสูงต่างๆ ของตัวเตา ผลของการเกิดวอร์เทคจากการฉีดอากาศเข้าไปในแนวสัมผัสนี้จะทำให้สามารถดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่ให้หลุดลอยออกไปจากเตาและยังทำให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคเชื้อเพลิง ระหว่างบริเวณเบดด้านล่างกับบริเวณที่เกิดวอร์เทคใน free board ส่งผลให้สามารถลดความสูงของเตาฟลูอิไดซ์เบดลงได้ งานวิจัยเหล่านี้ [9, 10, 11] คล้ายคลึงกับ U.S. Patent no. 4,867,079 [17] ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตขายแต่ในต่างประเทศได้มีการทำวิจัยในห้องปฏิบัติการพบว่ามีจุดเด่นที่น่าสนใจอยู่หลายประการซึ่งสามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับเตาเผาไหม้ไซโคลนได้ดังแสดงในตารางข้างล่างดังนี้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบลักษณะและคุณสมบัติของเตาเผาไหม้ไซโคลนและฟลูอิไดซ์เบด [4, 5]

เตาเผาฟลูอิไดซ์เบด	เตาเผาไซโคลน
1 ค่าภาระความร้อนเตาประมาณ 1 MW/m^3	1 ค่าภาระความร้อนเตาประมาณ 0.34 MW/m^3
2 อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเตา (H/D) ประมาณ 13	2 H/D มีค่าประมาณ 2.5
3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ในช่วง 80– 95%	3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ในช่วง 65 – 80%
4 ต้องใช้วัสดุเฉลี่ย จำพวกซิลิกา อลูมินา เป็นต้น ผสมลงในเบด	4 ไม่ต้องใช้วัสดุเฉื่อยผสมลงในเบด
5 เถ้าสามารถลอยออกไปพร้อมกับอากาศร้อนที่ท่อทางออก	5 ต้องมีระบบลำเลียงทางกลในการลำเลียงเถ้าออกจากเตา

และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาพฤติกรรมการไหลของแก๊ส–อนุภาคภายในเตาเผาไหม้วอร์เทคพบว่าบริเวณใกล้ผนังเตาอากาศที่จะมีการไหลในทิศทางลง(สู่ด้านล่างเตา)ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคภายในเตา และมีส่วนสำคัญให้ residence time นานขึ้น [12]

2. ขั้นตอนการออกแบบเตาเผาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟูอิไดซ์เบด (Vortex-Fluidized Bed Combustor,VFBC)

จากผลการศึกษาพฤติกรรมของอากาศ–แกลบภายในเตาเผาไหม้จำลอง[13]แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่สามารถจะนำหลักการดังกล่าวไปใช้กับเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบด(Vortex-fluidized bed combustion, VFBC)จริงได้จึงได้นำข้อมูลจากการศึกษาในข้างต้นมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเตาเผา VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเตาเผา VFBC เป็นเตาเผาที่ถูกออกแบบมาเพื่อรวมเอาลักษณะเด่นของเตาเผาแบบไซโคลนและเตาเผาแบบฟลูอิไดซ์เบดเข้าด้วยกันโดยเตาเผา VFBC มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาเท่ากับ 40 cm. สูง 110 cm. ดังแสดงในรูปที่ 1a และสามารถแบ่งเตาเผาออกเป็น 2 ส่วน ตามลักษณะรูปร่างของเตาดังแสดงในรูปที่ 1a ส่วนที่หนึ่งรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกระบอกและส่วนที่สองรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกรวยหงายโดยบริเวณปลายกรวยถูกตัดเพื่อติดตั้งแผ่นกระจายอากาศ(Air Distributor)สำหรับอากาศส่วนที่สอง

อากาศที่ถูกใช้ในการเผาไหม้แกลบภายในเตาเผา VFBC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 1b คือ 1)อากาศส่วนที่หนึ่ง (Primary Air)คืออากาศที่นำแกลบเข้าสู่เตาเผาซึ่งจะถูกป้อนในแนว Tangential ทางด้านบนของห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอก เพื่อทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศและแกลบแบบวอร์เทค 2)อากาศส่วนที่สอง (Secondary Air)จะถูกจ่ายผ่านแผ่นกระจายลมเข้าสู่เตาเผา VFBC ที่บริเวณด้านที่ด้านล่างของห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยหงายทำให้เกิดพฤติกรรมแบบฟลูอิไดซ์เบดทั่วในบริเวณของห้องเผาไหม้ที่อยู่ถัดจากวงแหวนวอร์เทคลงมา โดยรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกรวยหงายจะช่วยทำให้แกลบลอยตัวได้ง่ายและอนุภาคในเบดมีกาหมุนเวียนทั่วถึงโดยไม่ต้องใช้วัสดุเฉื่อยมาผสมลงในเบด และ3)อากาศส่วนที่สาม (Thirdly Air)จะเป็นอากาศที่ถูกจ่ายในแนว Tangential ที่ตำแหน่งด้านข้างเตาเผาแบบทรงกระบอกในระดับความสูงเท่ากับ 55 cm. เพื่อลดอุณหภูมิในห้องเตาเผาที่เกิดการเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบด

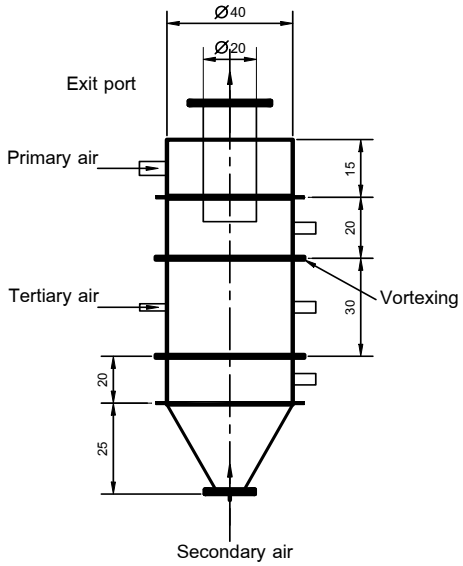
3. วิธีการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

3.1 การทดลองเบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC

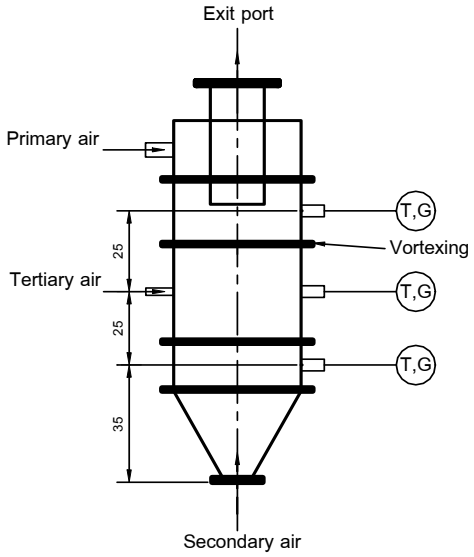
เตรียมอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการติดเตาเผาโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงแกลบและอุ่นเตาจนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ประมาณ 600 $^{\circ}$C จึงเริ่มทำการทดลอง

1. ปรับอัตราการไหลของอากาศและแกลบให้สอดคล้องกับเงื่อนการทดลองที่ 1-6 ในตารางที่ 2 ในการทดลองจะใช้ Blower 2 ตัว ตัวละ 2.2 kW ในการวัดอัตราการไหลของอากาศใช้ออริฟิสมิเตอร์ซึ่งถูกปรับเทียบจาก Hot wire anemometer ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 3% ของค่าที่วัดได้ และสามารถควบคุมอัตราการป้อนของแกลบโดยใช้ frequency Inverter ที่ใช้ควบคุมความเร็วรอบของ Motor ในการป้อนแกลบ

2. เริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC ทุก 5 นาทีจนครบ 120 นาที โดยใช้ Thermocouple type K และใช้ Indicator ซึ่งมีความละเอียด $\pm 1^{\circ}$

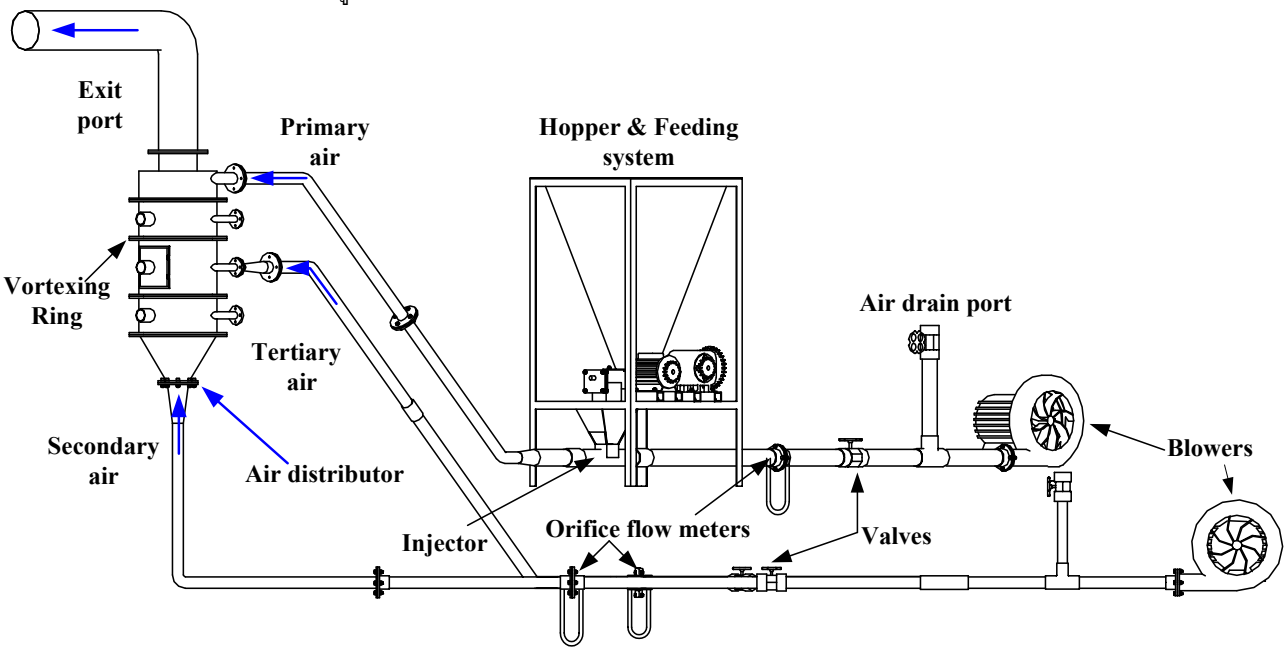


(a) Dimensions of VFBC



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

รูปที่ 1 Dimensions and Temperature measure positions of VFBC



รูปที่ 2 Schematic diagram of the overall experimental set-up of VFBC

3.2 การศึกษาผลของปริมาณอากาศส่วนที่สามต่อสมรรถนะของ VFBC

(อุปกรณ์การทดลองเป็นชุดเดียวกับชุดศึกษาการทดลองเบื้องต้น เพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC)

1.การปรับอัตราการไหลของแกลบและอากาศให้สอดคล้องกับเงื่อนที่การทดลองที่ 7-10 ในตารางที่ 2

2.เริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่ง Y = 0.35 m 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 เก็บขี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้

3.บันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกและตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Gas analyzer รุ่น GA-40T plus

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

ตารางที่ 2 The operation condition of VFBC

		The preliminary study of VFBC operation condition						The study of the effects of thirdly airflow on performance of VFBC			
Run No.		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Specific Rice husk feed rate	(kg/h-m^3)	160	187	213	240	240	240	240	240	240	240
Primary air											
Flow rate	(m^3/min)	2.75	2.75	2.75	2.2	2.33	2.75	2.06	2.06	2.06	2.06
Velocity	(m/s)	22.7	22.7	22.7	18.2	19.2	22.7	17	17	17	17
Secondary air											
Flow rate	(m^3/min)	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.85	0.85	0.85	0.85
Velocity	(m/s)	2	2	2	2	2	2	1.75	1.75	1.75	1.75
Thirdly air											
Flow rate	(m^3/min)	-	-	-	-	-	-	-	0.37	0.76	1.124
Velocity	(m/s)	-	-	-	-	-	-	-	12.34	25	37.01
Excess air	(%)	110	170	138	77	85	110	70	90	110	130

ตารางที่ 3 แสดงสมรรถนะในการวัดปริมาณแก๊สเสียของ Gas analyzer รุ่น GA-40T plus

Gas	Range
O_2	0 - 20.9%
CO_2	0 - 50%
CO	0 – 4,000 ppm
NO_x	0 – 5,000 ppm
SO_2	0 – 5,000 ppm

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน(η_{th})ของเตานิยามได้ด้วยสมการดังนี้

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

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

Te = อุณหภูมิแก๊สเสียที่ตำแหน่งทางออกของ VFBC

Ti = อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าของ VFBC

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

4. ผลการทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเบื้องต้นดังนั้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของเตาเผา VFBC จึงได้กำหนดเงื่อนไขทดลองออกเป็น 6 เงื่อนไขโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของแกลบและอากาศต่างๆ กันดังแสดงในตารางที่ 2 เงื่อนการทดลองที่ 1-6

4.1 การทดลองเบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC

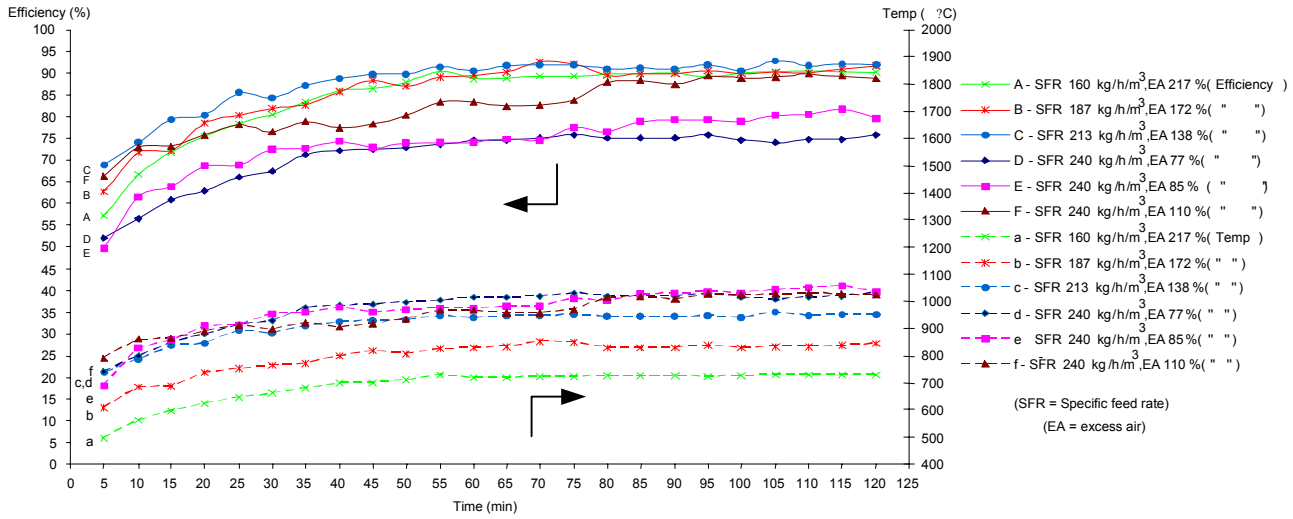
จากผลการทดลองสามารถสรุปในประเด็นสำคัญได้ดังนี้

4.1.1 จากการสังเกตการเผาไหม้ผ่านช่องมองของเตาเผา VFBC พบว่าการเกิดฟลูอิไดซ์เซชันจะครอบคลุมบริเวณตั้งแต่ด้านล่างของเตาเผา VFBC จนถึงบริเวณที่เป็นที่ตั้งของวงแหวนวอร์เทค(Vortexing ring)ซึ่งการเกิดฟลูอิไดซ์เซชันของแก๊สเผาไหม้กับอนุภาคภายในของเตาเผาจะสอดคล้องกับการเกิดฟลูอิไดเซชันของอากาศ–แกลบในกรณีเตาเผาไหม้จำลอง[13]

4.1.2 การเกิดฟลูอิไดซ์เซชันภายในเตาเผา VFBC ไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยจำพวกทรายซิลิกาหรืออลูมินาลงไปในเบดเหมือนเช่นในเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดโดยทั่วไป

4.1.3 เตาเผา VFBC สามารถทำอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะ (SFR) ได้ 240 kg/h/m^3 ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน(EA) 110% เมื่อคำนวณเป็นค่าภาระความร้อนของเตา(โดยกำหนดให้ HHV ของแกลบ = 14.5 MJ/kg)ที่ η_{th} 87% จะมีภาระความร้อนเท่ากับ 0.84 MW$_{th}$/m^3 ซึ่งความจริงอาจสามารถป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตราที่มากกว่านี้ได้ถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินให้มากขึ้นโดยการจ่ายอากาศส่วนที่สามเข้าไปในเตา จากการทดลองจะได้ว่า SFR ที่เตาเผา VFBC ทำได้มีค่าใกล้เคียงกับของเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่ง SFR มีค่าประมาณ 265 kg/h/m^3 [5] และสูงกว่าที่เตาเผาไหม้ไซโคลนที่ผลิตขายอยู่ภายในประเทศทำได้ ซึ่ง SFR มีค่าสูงสุดประมาณ 110 kg/h/m^3

4.1.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา(η_{th})ในกรณีที่ค่า SFR เท่ากับ 240 kg/h/m^3(กรณี F ในรูปที่ 3)พบว่าค่า η_{th} จะเพิ่มขึ้นไปตามเวลาที่เตาทำงานโดยจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 90 นาที (และเป็นจริงสำหรับในกรณีอื่นๆ ด้วย)โดย η_{th} จะมีค่าประมาณ 87% ซึ่งถึงแม้จะต่ำกว่าในกรณีของเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดซึ่ง η_{th} มีค่าในช่วง 90–95% แต่ก็สูงกว่าของเตาไซโคลนมากซึ่ง η_{th} มีค่าประมาณ 65–80%



รูปที่ 3 The variation of thermal efficiency of VFBC and exhaust gas temperature with various of rice husk feed rate and excess air

4.1.5 อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ทางออกของเตาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาทีแรกของการทดลอง และจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็จะเริ่มลดน้อยลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้จะมีอุณหภูมิประมาณ 900 °C ในเวลาเพียง 20 นาที และถึง 1000 °C ในเวลาประมาณ 80 นาที(ดูกรณี f ในรูปที่ 3)

4.1.6 ในกรณีที่ค่า SFR 240 kg/h/m^3 ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) 110% ขี้เถ้าที่ออกจากเตาเผามีขนาดเล็กละเอียดสีดำปนขาวซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนคาร์บอนในเชื้อเพลิงไปเป็นแก๊สเผาไหม้(carbon conversion efficiency)ได้ดีซึ่งมีสาเหตุจากกหมุนวนแบบวอร์เทคที่รุนแรงในบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนทำหน้าที่ดักอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้ไม่ให้สามารถหลุดออกจากเตาเผา VFBC ได้ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการเกิดม่านอากาศที่ใช้ดักอนุภาคภายในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดแบบจำลอง [13]

จากผลการทดลองข้างต้นจึงได้เลือกเงื่อนไขที่ทำให้เตาเผา VFBC ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาสูงสุดคือที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุด(SFR)เท่ากับ 240 kg/h/m^3 (กรณี F ในรูปที่ 3)โดยใช้เป็นเงื่อนไขที่มีการใช้อากาศส่วนที่สาม

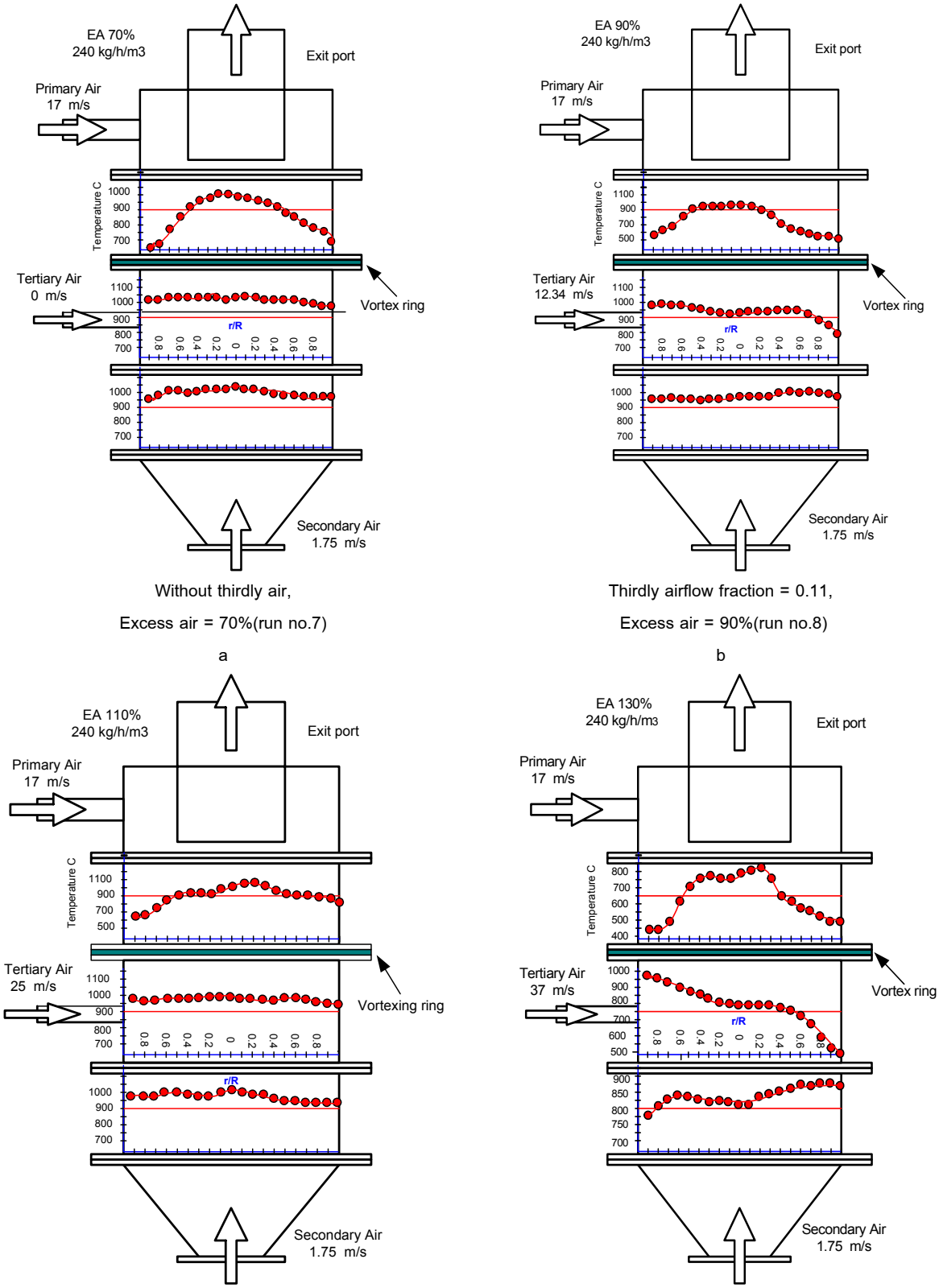
4.2 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา VFBC

ในการทดลองนี้กำหนดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจำเพาะ 240 kg/h/m^3 และทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สามดังแสดงในเงื่อนไขการทดลองที่ 7-10 ในตารางที่ 2

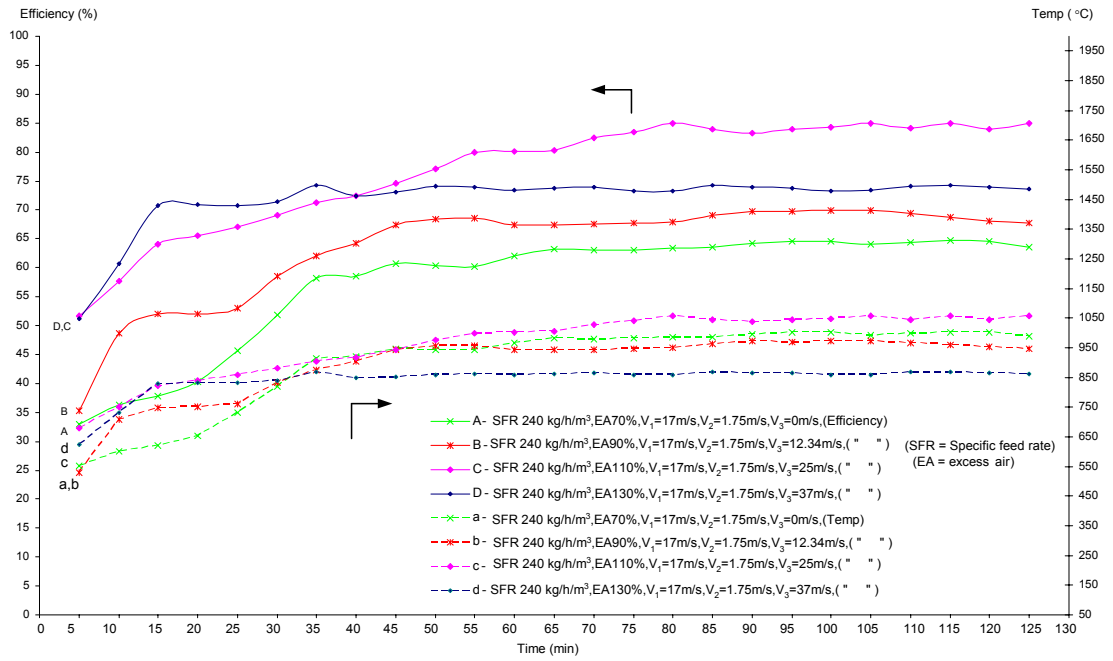
การกระจายอุณหภูมิภายใน VFBC สามารถแบ่งออกเป็นสองบริเวณคือ 1)บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทคพบว่าการกระจายอุณหภูมิของทั้ง 4 เงื่อนไขดังแสดงในรูปที่ 4(a-d) กระจายอุณหภูมิที่คล้ายคลึงกันเป็นรูปพาราโบลาคว่ำ โดยบริเวณขอบผนังจะมีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากใกล้ตำแหน่งที่จ่ายอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนบริเวณแกนกลางของเตาเผาจะมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่แก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไหลผ่านเพื่อเข้าสู่ท่อทิ้งเถ้าที่อยู่ด้านบนของเตาเผา 2)คือบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทคพบว่าปริมาณอากาศส่วนเกิน(EA) 70%, 90% และ 110% มีการกระจายอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดเตาที่ความสูงเท่ากับ 0.35 m. และ 0.55 m. ดังแสดงในรูปที่ 4(a-c) ซึ่งสะท้อนให้เห็นการเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบดขึ้นภายในเตาที่ระดับความสูงดังกล่าวที่ทั้งอากาศและอนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางแน่นอน(Random movement)และส่งผลให้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะ (SFR) 240 kg/h/m^3 ได้ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอากาศภายในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดในแบบจำลอง [14] สำหรับที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน(EA) 130% ดังแสดงในรูปที่ 4d อุณหภูมิบริเวณผนังจะต่ำกว่าที่บริเวณอื่นภายในเตาเผาค่อนข้างมากสาเหตุมาจากการจ่ายอากาศส่วนที่สามในบริเวณนี้มากเกินความจำเป็นทำให้มีการสูญเสียความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปกับการทำให้ไนโตรเจนในอากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตานับจากบริเวณที่ถัดจากวงแหวนวอร์เทคลงมาพบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 70% จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในช่วง 990-1,025 °C และเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 90% และ 110% จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า 1,000 °C โดยมีค่าในช่วง 930-975 °C โดยที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน(EA) 110% จะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th})สูงสุดเท่ากับ 85% (กรณี C รูปที่ 5) และพบว่าอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ตรงทางออกของเตามีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 1,060 °C

4.3 สมรรถนะของเตา VFBC

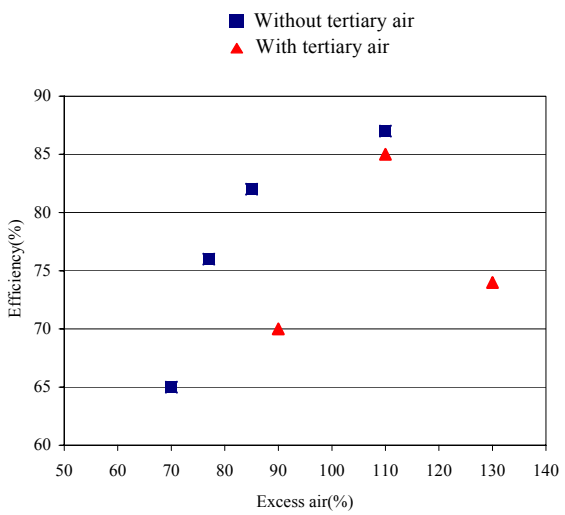
4.3.1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและภาระความร้อนของเตา ประสิทธิภาพเป็นดัชนีที่ใช้บอกความคุ้มค่าของการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง ส่วนภาระความร้อนของเตาซึ่งมีหน่วยเป็น MW_{th}/m^3 เป็นตัวบ่งบอกถึงความคุ้มค่าในการใช้พื้นที่ภายในเตาโดยในทางเศรษฐศาสตร์แล้วค่าภาระความร้อนของเตาจะแปรผกผันกับเงินทุนในการก่อสร้าง ดังนั้นในการประเมินสมรรถนะของเตาต้องพิจารณาจากดัชนีทั้งสองตัวไปพร้อมๆ กัน จากรูปที่ 3 และ 5 พบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน



รูปที่ 4 Temperature distribution inside VFBC



รูปที่ 5 แสดงการกระจายอุณหภูมิและประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ภายในเตาเผาแบบวอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบด(VFBC)

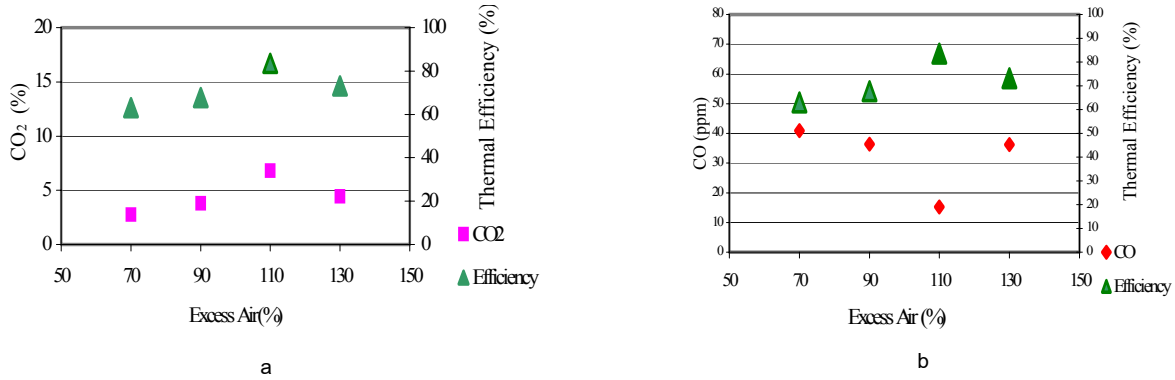


รูปที่ 6 The effect of excess air on thermal efficiency (SFR = 240 kg/h-m^3)

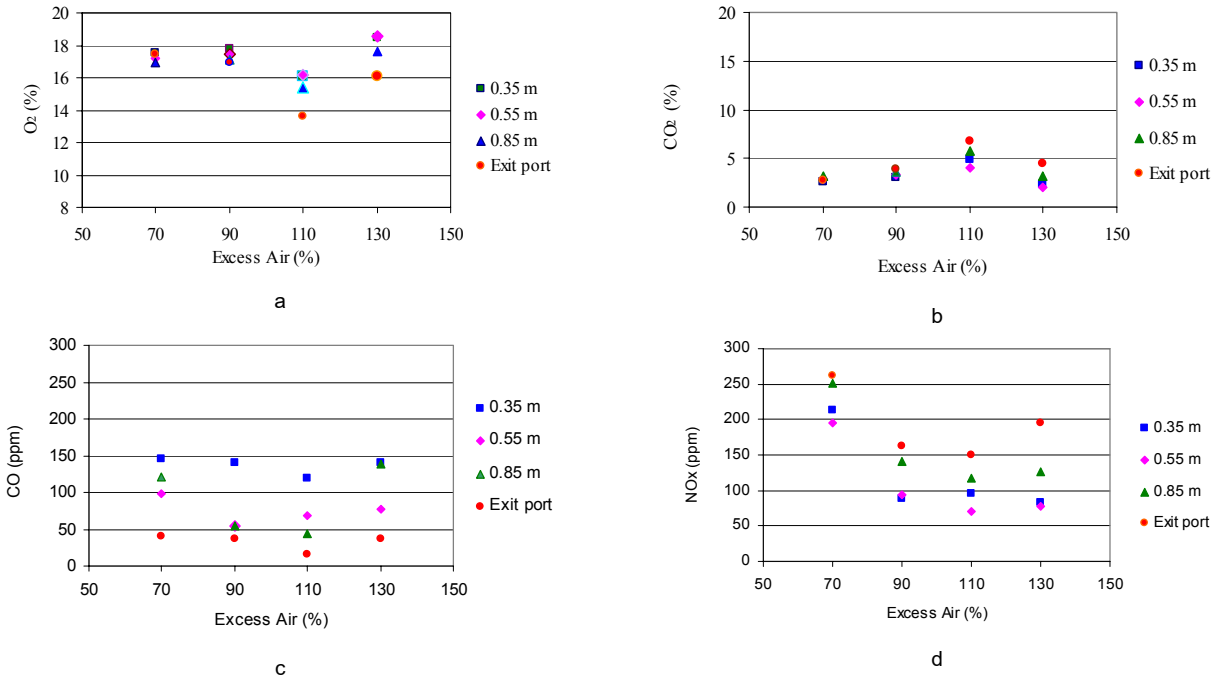
110% η_{th} จะมีค่าสูงสุดประมาณ 85-87 % โดยมีค่าภาระความร้อนเตาเท่ากับอยู่ในช่วง 0.83-0.84 MW_{th}/m^3(คำนวณโดยใช้ค่า HHV ของแกลบเท่ากับ 14.5 MJ/kg)ซึ่งทั้งค่า η_{th} และภาระความร้อนของเตาเผา VFBC ใกล้เคียงกับของเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบด[5] และสูงกว่าเตาเผาไซโคลน [4] จากการทดลองเบื้องต้นที่ไม่มีการใช้อากาศส่วนที่สาม (เงื่อนไขการทดลองที่ 1-6)และการทดลองที่มีการเพิ่มอากาศส่วนที่สามเข้าไป(เงื่อนไขการทดลองที่ 7-10)พบว่า η_{th} จะแปรผันตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกิน โดยการใช้หรือไม่ใช้อากาศส่วนที่สามจะไม่มีผล η_{th} ซึ่งดูได้จากกราฟรูปที่ 6 แต่การใช้อากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในเตาไม่ให้เกิน 1,000 °C ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินและ η_{th} ที่การไหลจำเพาะเท่ากับ 240 kg/h/m^3 แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจะพบว่าในช่วงแรก η_{th} จะเพิ่มขึ้นตามประปริมาณอากาศส่วนเกินและหลังจากปริมาณอากาศส่วนเกินมากกว่า 110% ค่า η_{th} จะลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่าในช่วงแรกที่มีการใช้ปริมาณอากาศเกินน้อยความปั่นป่วน(Turbulent)ที่เกิดจากความเร็วของอากาศภายในเตาไม่มากพอที่จะทำลายชั้นฟิล์มของเถ้าที่ปกคลุมพื้นผิวอนุภาคของแข็งที่ยังเผาไหม้ไม่หมดทำให้ O_2 แพร่ไปทำปฏิกิริยากับธาตุคาร์บอนที่พื้นผิวอนุภาคได้น้อยการเผาไหม้จึงไม่ค่อยสมบูรณ์และเมื่อมีความเร็วของอากาศเพิ่มมากขึ้นการเผาไหม้ก็จะสมบูรณ์ขึ้นจนกระทั่งได้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 85-87% ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 110% และจากนั้นถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นไปอีกจะทำให้ต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งกับการทำให้ไนโตรเจนในอากาศเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิในเตาเผาผลก็คืออุณหภูมิในเตาจะต่ำลง(ดังแสดงในรูปที่ 4d)ทำให้เกิดปฏิกิริยาออซิเดชันไม่ดีพอจึงทำให้ η_{th} ต่ำลง

4.4 องค์ประกอบของแก๊สเสีย

จากการทดลองพบว่า CO_2 และ CO ที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกินและประสิทธิภาพของเตาดังแสดงในรูปที่ 7(a,b) โดยถ้าใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสม(EA = 110%)จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์และส่งผลให้ประสิทธิภาพของเตาสูง (η_{th} = 87 %)และเกิดปริมาณ CO_2 ในสัดส่วนที่สูงในขณะที่สัดส่วนปริมาณของ CO จะมีค่าน้อยที่ประสิทธิภาพเตาสูงสุด ปริมาณ CO และค่า NO_x จะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 15 ppm และ 118 ppm ซึ่งต่ำกว่า



รูปที่ 7 Thermal efficiency (%)



รูปที่ 8 ปริมาณแก๊สเผาไหม้ที่ทางออกของเตาเผา VFBC

เกณฑ์ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแสดล้อมกำหนดปริมาณ O_2 ส่วนเกินในแก๊สเสียที่ออกมาจากเตา(รูปที่ 8a)จะแปรผันตรงกับ η_{th} โดยที่ปริมาณอากาศส่วนส่วนเกิน 70% จะมีค่า η_{th} ต่ำที่สุดจึงมีปริมาณ O_2 ส่วนเกินเหลืออยู่ในแก๊สเสียมากที่สุดประมาณ 17% ในขณะที่ถ้าใช้ปริมาณอากาศส่วนเกิน 110% ค่า η_{th} จะมีค่าสูงสุดทำให้ O_2 ถูกใช้ไปในการเผาไหม้มาก ปริมาณ O_2 ที่ออกมากับแก๊สเสียตรงทางออกจึงเหลือน้อยที่สุดประมาณ 13.6% การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊ส CO_2, CO, O_2 และ NO_x ตามระดับความสูงของเตาแสดงในรูปที่ 8(a-d) โดยพบว่าปริมาณ CO_2, O_2 และ NO_x ยังไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับความสูงของเตา เฉพาะ CO เท่านั้นที่พบว่าที่ทุกปริมาณอากาศส่วนเกินค่า CO จะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ระดับความสูง 0.35 m. เพราะปริมาณอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดซึ่งมากองรวมกันเป็นเบดที่บริเวณด้านล่างเตามีปริมาณมากเมื่อเทียบกับปริมาณอากาศส่วนที่สองที่จ่ายจากด้านล่างทำให้การเผาไหม้ยังไม่สมบูรณ์

5. สรุปผลการทดลอง

ในการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1 เตาเผา VFBC สามารถรวมพฤติกรรมการไหลของอากาศและแกลบแบบวอร์เทคและฟลูอิไดซ์เบดขณะที่เกิดการเผาไหม้ได้ซึ่งสังเกตได้จากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาที่สามารถแบ่งออกเป็นสองบริเวณคือ 1)บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทคโดยมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิคล้ายรูปพาราโบลาคว่ำแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลแบบวอร์เทคและ 2)บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทคการกระจายอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้เกิดขึ้นอย่าง

ความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดเตาแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลแบบฟลูอิไดซ์เบด

2 จากการรวมพฤติกรรมการเผาไหม้แบบวอร์เทคและฟลูอิไดซ์เบด ขณะที่เกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ตลอดทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของเตาเผา VFBC ทำให้ VFBC สามารถผลิตภาระความร้อนจำเพาะได้สูงสุด 0.825 MW/m^3 ที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 85% และปริมาณอากาศส่วนเกิน 110% โดยอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ทางออกประมาณ 1,060 ^oC

3 การเกิดฟลูอิไดซ์เซชันภายในเตาไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยจำพวกทรายซิลิกา หรืออลูมินา ลงไปในเบด

4 วงแหวนวอร์จะช่วยเพิ่มความเร็วในการหมุนวนมากขึ้นและบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนจะมีการเคลื่อนที่หมุนวนอย่างรุนแรงดักแกลบที่มีน้ำหนักมากจะไม่สามารถเคลื่อนที่ออกจากเตาเผาได้จึงทำให้ได้ขี้เถ้าที่ออกจากเตาเผา VFBC ที่เล็กละเอียดที่มีสีดำปนขาว

5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะแปรผันตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกิน โดยปริมาณอากาศส่วนที่สามจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเตาตราบเท่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกินมีค่าเหมาะสม แต่อากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาไม่ให้เกิน 1,000 ^oC

6 ปริมาณ CO_2 CO และ O_2 สอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกินและประสิทธิภาพของเตาโดยที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 85% จะให้ CO จะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 15 ppm และ NO = 118 ppm ซึ่งเป็นต่ำกว่าประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแสดล้อมกำหนด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและคุณวิบูรณ์ เทเพนทร์ 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 Agricaltural 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, Piriyarungroj 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”