

**คุณลักษณะการเผาไหม้แกลบในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดิซ์เบด  
ที่ใช้หัวฉีดกระจายอากาศ**

**Combustion Characteristics of Rice Husk in a Vortex-Fluidized Bed Combustor  
Using a Nozzle-type Distributor**

ประสาน สติตย์เรืองศักดิ์<sup>1\*</sup>, ฐานิตย์ เมธิยานนท์<sup>2</sup>, และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

<sup>3</sup> คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10400

\* ผู้ติดต่อ: E-mail: prasan\_mut@yahoo.com, โทรศัพท์: (662) 9883655 ext. 3107

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้นำเสนอคุณลักษณะการเผาไหม้แกลบในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดิซ์เบดที่ใช้ทรายเป็นเบดตลอดจนสมรรถนะการเผาไหม้ในแง่ของประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $E_c$ ) และแก๊สเสียที่ทางออกเตา การทดลองได้ปรับเปลี่ยนความเร็วอากาศส่วนที่สอง ( $V_2$ ) ซึ่งใช้ในการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาในลักษณะหมุนวนที่ 10.7, 13 และ 15 m/s ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ในช่วง 53-78% ผลการวัดอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนภายในเตาบ่งชี้ว่าการเผาไหม้หลักเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ตัวแหวนวอร์เทค ในขณะที่การเพิ่มความเร็วอากาศส่วนนี้ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดลง ในแง่ขององค์ประกอบแก๊สเสียที่ปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน 6% ที่ทางออกพบว่า CO มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ  $V_2$  โดยมีค่าในช่วง 32-69 ppm ในขณะที่  $NO_x$  มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้น  $V_2$  ซึ่งมีค่าในช่วง 249-296 ppm นอกจากนี้  $E_c$  ทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสูงกว่า 99% ตลอดจนพบว่า  $V_2$  ที่เหมาะสมในแง่ของแก๊สมลพิษ  $NO_x$  ในการศึกษาครั้งนี้คือ 15 m/s ซึ่งคิดเป็น EA = 78%

**คำหลัก:** แกลบ/ แก๊สเสีย/ ฟลูอิดิซ์เบด/ วอร์เทค

**Abstract**

This research presents the combustion characteristics of rice husk fired in the vortex-fluidized bed combustor (VFBC) using sand as the bed. The combustor performances, in terms of combustion efficiency ( $E_c$ ) and gas emissions were also evaluated. In this study, the velocity of the secondary air ( $V_2$ ), swirly introduced to the combustor with the fuel, was varied at 10.7, 13 and 15 m/s, corresponding to the excess air (EA) in the range of 53-78%. The temperature and  $O_2$  profiles along the combustor height indicated that main combustion occurred beneath the vortex ring, while increasing  $V_2$  was responsible for a drop in temperature along the combustor height. In view of gas emissions corrected to 6%  $O_2$ , CO tended to increase as  $V_2$  increased, ranging 32-69 ppm; but  $NO_x$  seemed to decrease with the increase in  $V_2$ . Moreover, the  $E_c$  for all conditions were satisfying, mostly >99%. The results concluded that the optimum  $V_2$ , in terms of  $NO_x$  emissions, was 15 m/s, corresponding to EA = 78%.

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

## 1. บทนำ

แหล่งพลังงานทดแทนเป็นสิ่งจำเป็นต่อการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนในอนาคต เนื่องจากแหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดน้อยลงอย่างต่อเนื่องซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของต้นทุนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นถูกพิจารณาว่าเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับพลังงานลมและแสงอาทิตย์ ปัจจุบันมีหลายประเทศในทวีปยุโรป เช่น สวีเดน เดนมาร์ก เนเธอร์แลนด์และนอร์เวย์ เป็นต้น ได้มีการออกมาตรการต่างๆ เพื่อกระตุ้นให้มีการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนเพิ่มมากขึ้นสำหรับประเทศไทยนั้นก็มีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนจากชีวมวลเช่นเดียวกัน โดยชีวมวลที่ถูกนำไปใช้ส่วนใหญ่เป็นเศษวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิต ได้แก่ แกลบ ชานอ้อย โยผลปาล์ม และกะลาปาล์ม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับแปลงผันพลังงานเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องดำเนินการควบคู่กันไปกับการหาแหล่งพลังงานทดแทน การเผาไหม้ตรง (Direct combustion) เป็นกระบวนการแปลงผันพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [1] โดยเฉพาะเทคโนโลยีเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบดซึ่งได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไปว่ามีประสิทธิภาพดีและปลดปล่อยมลพิษน้อยเมื่อเทียบกับเตาเผาไหม้รูปแบบอื่นๆ [1-2] ทั้งนี้มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ทำการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ ได้แก่ แกลบ [3-6] ชานอ้อย [7] กะลาปาล์ม [8] และฟางข้าว [9] เป็นต้น ในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบด ซึ่งมักพบว่าการใช้ความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไธด์เซชันที่สูงเกินไปจะส่งผลเสียอย่างมากต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีใช้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยน้อย [5] ในขณะที่ปริมาณอากาศส่วนที่สองนั้นจำเป็นต้องจ่ายในกรณีของการเผาไหม้ชีวมวล [10]

งานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัยที่ได้ศึกษาการเผาไหม้แกลบและการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัส

ในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธด์เบด (VFBC) ซึ่งไม่ใช้วัสดุเชื้อเป็นเบดและติดตั้งใบกวานภายในเบดเพื่อป้องกันการเกาะตัวของเชื้อเพลิง [3,11-12] ซึ่งผลการศึกษพบว่าเตา VFBC สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบหรือเชื้อเพลิงร่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพ (>97%) และปลดปล่อยแก๊สมลพิษ (CO และ SO<sub>2</sub>) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เว้นแต่ปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่ต้องควบคุมอุณหภูมิเบดให้ต่ำประมาณ 800°C จึงจะสามารถจำกัดได้ แต่อย่างไรก็ตาม การไม่ผสมวัสดุเชื้อในเบดของเตา VFBC ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการนำเตาเผาไหม้ตัวนี้ไปใช้กับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ จึงได้ปรับเปลี่ยนการศึกษาไปเป็นการใช้ทรายเป็นเบดปริมาณ 15 kg ซึ่งจำเป็นต้องทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ VFBC ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของการทำงานที่แปรเปลี่ยนไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาคคุณลักษณะการเผาไหม้ ตลอดจนสมรรถนะการเผาไหม้ในแง่ของประสิทธิภาพการเผาไหม้และแก๊สมลพิษที่ทางออกเตาเผาไหม้ VFBC ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศส่วนที่สองซึ่งใช้ในการบ้อนแกลบเข้าสู่เตาเผาไหม้แบบหมุนวนเพื่อให้เกิดการเผาไหม้แบบวอร์เทค

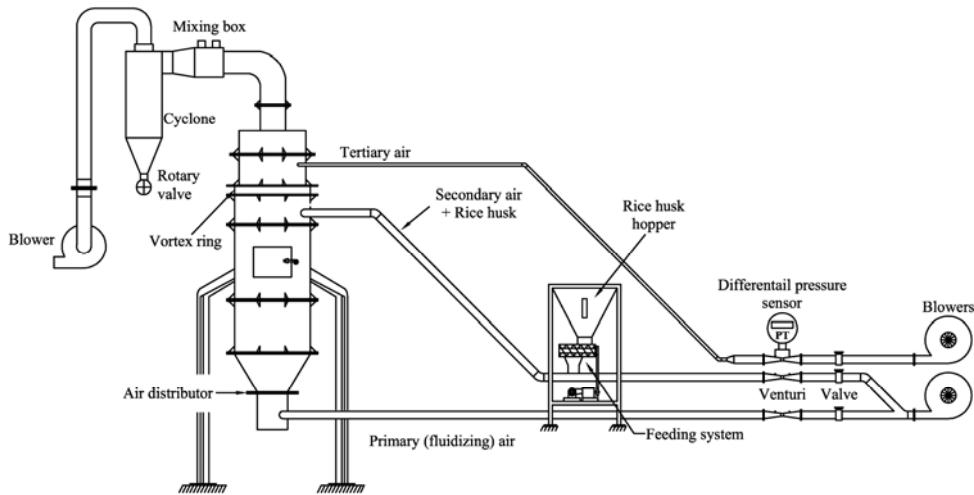
## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธด์เบด (VFBC)

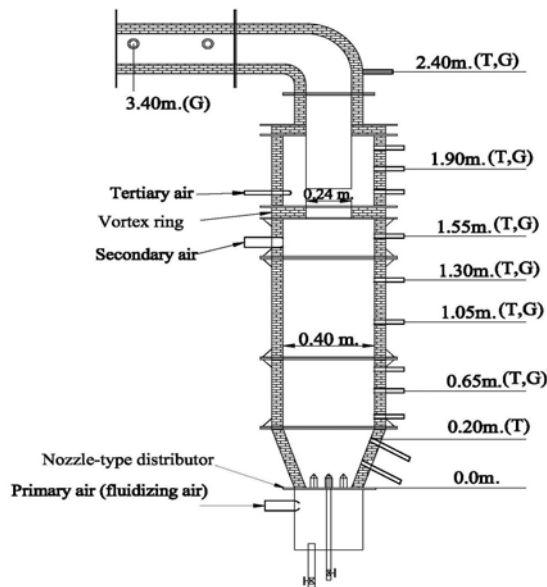
รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธด์เบด (VFBC) โดยเตาเผาไหม้ VFBC ที่ใช้ในการทดลองนั้นถูกออกแบบโดยรวมเอาลักษณะเด่นของเตาเผาแบบไซโคลนคือการเผาไหม้แบบหมุนวนหรือวอร์เทคและการเผาไหม้ขณะแขวนลอยในกระแสอากาศของเตาเผาแบบฟลูอิดไธด์เบดเข้าด้วยกันจึงทำให้เตาเผาตัวนี้มีประสิทธิภาพสูงขนาดของเตา VFBC คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาเท่ากับ 40 cm และสูง 160 cm โดยลักษณะของเตาเผาไหม้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2 คือ ส่วนที่

หนึ่งเป็นรูปทรงกรวยกระบอกสูง 140 cm และส่วนที่สองคือเป็นทรงกรวยหงายตัดยอดสูง 30 cm โดยที่ห้องเผาไหม้ทรงกระบอกจะมีการติดตั้งวงแหวนวอร์เทคซึ่งมีขนาดช่องเปิดของรูเท่ากับ 24 cm โดยวงแหวนวอร์เทคนี้จะช่วยในการดักอนุภาคเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดให้ตกกลับมายังเบดซึ่งจะสามารถเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้ ส่วนด้านล่างของเตาเผาที่เป็นทรงกรวยหงายนั้นจะเป็นส่วนรองรับอนุภาคเบดและเชื้อเพลิงในขณะเผาไหม้แบบฟลูอิดไรซ์เบด ซึ่งมีการติดตั้งตัวกระจายอากาศแบบหัวฉีดไว้ด้านล่างสุด สำหรับการจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ อากาศส่วนที่

หนึ่งเป็นอากาศที่เป่าให้เชื้อเพลิงเกิดฟลูอิดไรซ์ซึ่งถูกจ่ายเข้าบริเวณด้านล่างเตาผ่านตัวกระจายอากาศแบบหัวฉีด อากาศส่วนที่สองถูกจ่ายในแนวสัมผัสกับผนังเตาพร้อมกับแก๊สที่ตำแหน่งใต้วงแหวนวอร์เทค และอากาศส่วนที่สามเป็นส่วนที่ช่วยในการเผาไหม้ซึ่งได้จ่ายที่ตำแหน่งเหนือวงแหวนวอร์เทคในลักษณะสัมผัสกับผนังห้องเผาไหม้เช่นเดียวกับอากาศส่วนที่สอง นอกจากนี้ ในการทดลองได้ใช้ทรายขนาด 300 ไมครอน ปริมาณ 15 kg ซึ่งคิดเป็นความสูงเบดประมาณ 15 cm เป็นอนุภาคเบดเพื่อให้เกิดฟลูอิดไรซ์



รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไรซ์เบด



รูปที่ 2 ขนาดเตาเผาไหม้ VFBC ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและแก๊สเสียในการทดลอง

## 2.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือแกลบซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 1 ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบ (as received)

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

## 2.3 การวัดและขั้นตอนการทดลอง

การวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้เวเนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน  $\pm 3\%$  ของย่านการวัด การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบจะใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ขับสกรูป้อนเชื้อเพลิง ส่วนการวัดอุณหภูมิ (T) ในการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเบิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลซึ่งมีความละเอียด  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  ซึ่งทำการวัดจำนวน 7 ตำแหน่งคือ 0.20, 0.65, 1.05, 1.30, 1.55, 1.90m เหนือแผ่นกระจายอากาศ และที่คอเตาเผาไหม้ (ระดับ 2.40 m) ดังรูปที่ 2 สำหรับในการวัดความเข้มข้นของแก๊ส (G) ภายในเตาคือ  $\text{O}_2$ , CO และ  $\text{NO}_x$  ที่ระดับความสูงต่างๆ คือ 0.65, 1.05, 1.30, 1.55, 1.90, 2.40m และที่ท่อทางออกเตา (3.40m) นั้นได้ใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สเสีย Testo 350XL ซึ่งสามารถวัดแก๊ส  $\text{O}_2$ , CO และ  $\text{NO}_x$  ด้วยเซนเซอร์ชนิดเซลล์เคมี ส่วน  $\text{CO}_2$  ที่แสดงนั้น

ได้มาจากการคำนวณย้อนกลับจากปริมาณ  $\text{O}_2$  ของเครื่องวัด สำหรับประสิทธิภาพการเผาไหม้นั้นหาได้จากการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ภายในเตาที่ดักได้จากไซโคลนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุ LECOCHNS 932 ร่วมกับปริมาณ CO ที่วัดได้จากแก๊สไอเสีย

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการปรับความเร็วลมที่ใช้ของอากาศส่วนต่างๆ ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลองตามตารางที่ 2 จากนั้นทำการจุดเตาเผาไหม้ โดยเริ่มบรรจุทรายปริมาณ 15 kg เข้าสู่เตาเผาไหม้ แล้วให้ความร้อนกับทรายด้วยถ่านไม้ที่ติดไฟแล้วจนให้อุณหภูมิในเตาสูงขึ้นถึงประมาณ  $400\text{-}500^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แกลบสามารถเกิดการลุกไหม้ตัวเองได้ หลังจากนั้นจึงเริ่มป้อนแกลบเข้าสู่เตาเผาไหม้ เมื่อสภาวะการทำงานของเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60-90 นาทีแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าต่าง ๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาและความเข้มข้นของแก๊สต่างๆ ( $\text{O}_2$ , CO,  $\text{NO}_x$ ) ที่ระดับความสูงต่างๆ (ดังรูปที่ 2: T=อุณหภูมิ, G=แก๊ส) รวมถึงการวัดปริมาณถ่านไม้ที่ดักได้จากไซโคลน (เก็บทุก 30 นาที เป็นเวลา 15 นาที) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ โดยข้อมูลที่ได้อาจจะถูกนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $E_c$ ) ได้ตามสมการที่ (1) [3-5,11,12]

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

โดย

$E_F$  = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้ (MJ/kg)

$E_a$  = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในเตา (MJ/kg)

$E_{fg}$  = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในแก๊สไอเสียซึ่งคำนวณได้จากปริมาณ  $\text{CO}_x$  ค่าความร้อนของ CO (MJ/kg)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

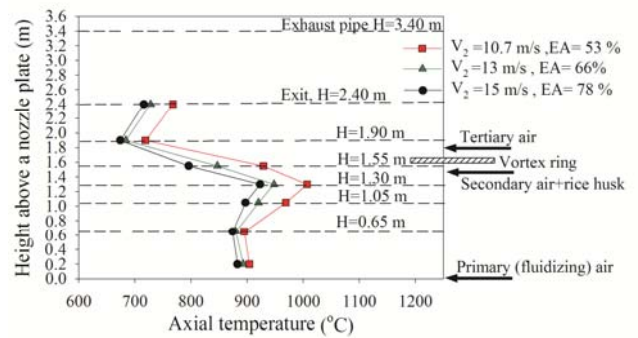
Testing conditions	Run number		
	1	2	3
Fluidizing air velocity (m/s)	0.5	0.5	0.5
Mass fraction (-)	0.47	0.43	0.40
2 <sup>nd</sup> air velocity (m/s)	10.7	13	15
Mass fraction (-)	0.41	0.46	0.50
Tertiary air velocity (m/s)	10	10	10
Mass fraction (-)	0.12	0.11	0.10
Excess air (%)	53	66	78
Rice husk feed rate (kg/h)	22	22	22

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 การกระจายอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้

การกระจายอุณหภูมิตามระดับความสูงในแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้ VFBC ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศส่วนที่สองในเงื่อนไขต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาของทุกเงื่อนไขมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ อุณหภูมิเบด (ระดับ 0.20m) และเหนือเบด (0.65 m) มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 875-900°C ซึ่งบ่งชี้ถึงลักษณะการเกิดการเผาไหม้แบบฟลูอิดเซชันที่ดีจนทำให้อนุภาคเบดและเชื้อเพลิงในช่วงระดับความสูงดังกล่าวเกิดการคลุกเคล้ากันเป็นอย่างดี ส่วนที่ระดับความสูงตั้งแต่ 0.65 ถึง 1.30 m นั้นพบว่าในทุกเงื่อนไขมีแนวโน้มของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าในช่วง 925-1020°C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงโดยเฉพาะสารระเหยจากแกลบเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากถูกจ่ายเข้าสู่เตาเผาไหม้พร้อมกับอากาศส่วนที่สองที่ระดับความสูง 1.50 m นอกจากนี้ การเผาไหม้อย่างต่อเนื่องของแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ซึ่งลอยมาจากเบดกับอากาศส่วนที่สองนี้เป็นอีกเหตุผลหนึ่งส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิดังกล่าว อย่างไรก็ตามในช่วงระดับความสูง 1.30 ถึง 1.90 m นั้นพบว่า อุณหภูมิในทุกเงื่อนไขมีแนวโน้มลดลงในช่วง 800-900°C (ระดับความสูง 1.55

m) และ 675-725°C (ที่ระดับ 1.90 m) ตามลำดับ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการจ่ายอากาศส่วนที่สอง (สัดส่วนมวล 0.42-0.50) และอากาศส่วนที่สาม (สัดส่วนของ 0.10-0.12) ซึ่งทำให้เกิดการผสมกับแก๊สเผาไหม้ที่ไหลมาจากด้านล่างแล้วทำให้อุณหภูมิต่ำลง ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิในช่วงความสูงดังกล่าวมีค่าต่ำลงตามความเร็วอากาศส่วนที่สองที่เพิ่มขึ้น สำหรับในช่วงระดับความสูง 2.0-2.4 m พบว่า อุณหภูมิในทุกเงื่อนไขมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากยังคงมีการเผาไหม้ แก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จำพวก CO ในช่วงดังกล่าว ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณออกซิเจน และ CO ในช่วงเดียวกันนี้ (ดังรูปที่ 4(ก) และ (ข) ตามลำดับ)

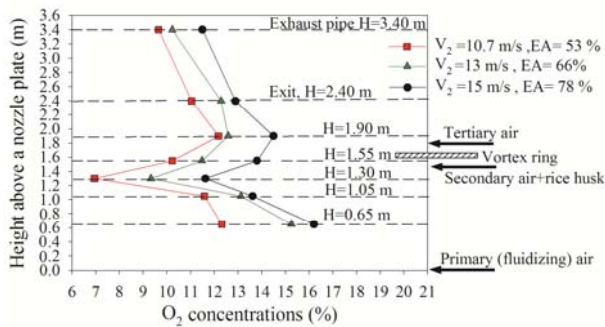


รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิแนวกึ่งกลางตามระดับความสูง

#### 3.2 การกระจายตัวของแก๊สภายในเตาตามระดับความสูง

พฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตา VFBC นั้นอาจสามารถพิจารณาได้จากการกระจายตัวของแก๊สเผาไหม้ตามระดับความสูง ดังรูปที่ 4-6 โดยการกระจายตัวของออกซิเจนดังรูปที่ 4 แสดงให้เห็นค่าในช่วงความสูงตั้งแต่ 0.65 m เหนือแผ่นกระจายอากาศความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ลดลงอย่างรวดเร็วจากประมาณ 12.3-16.2% เหลือเพียง 6.95-11.62% ที่ระดับความสูง 1.30 m ซึ่งบ่งชี้ถึงการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องของเชื้อเพลิงในบริเวณดังกล่าว หลังจากนั้น O<sub>2</sub> ที่ระดับความสูง 1.55 และ 1.90 m มีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าในช่วง

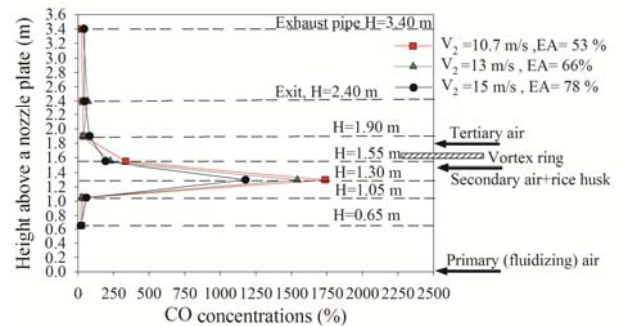
12-15% (ที่ระดับความสูง 1.90 m) เนื่องจากการจ่ายอากาศส่วนที่สองและสามซึ่งมีสัดส่วนรวมกันมากถึง 53-60% เข้ามาในบริเวณดังกล่าว อย่างไรก็ตามที่ระดับความสูงในช่วง 2.40 m (คอเตา) จนถึงจุดวัดแก๊สไอเสียทางออก (3.40 m) พบว่า  $O_2$  มีแนวโน้มลดลงเหลือ 9.65-11.5% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ยังเกิดขึ้นต่อเนื่องของแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จำพวก CO ในช่วงระดับความสูงดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มความเร็วของอากาศส่วนที่สองนั้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของ  $O_2$  ที่ระดับความสูงต่างๆ สูงขึ้น



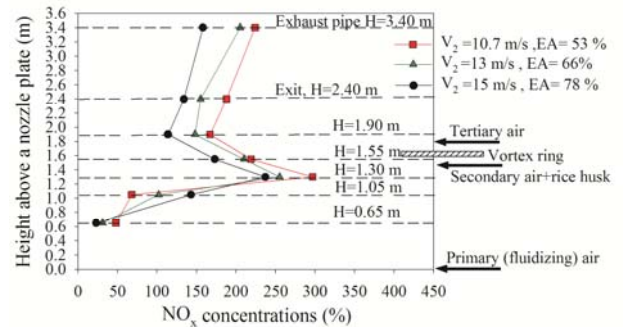
รูปที่ 4 การกระจายตัวของ  $O_2$  แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูง

รูปที่ 5 แสดงความเข้มข้นของแก๊ส CO ตามระดับความสูงของเตาโดยพบว่าที่ระดับความสูงตั้งแต่แผ่นกระจายอากาศจนถึงระดับ 1.05 m นั้น ความเข้มข้นของ CO มีค่าต่ำในช่วง 23-60 ppm ส่วนที่ระดับความสูง 1.30 m นั้น พบว่าความเข้มข้นของ CO มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างรุนแรง โดยสังเกตได้จากอุณหภูมิที่สูง (ดังรูปที่ 3) และการลดต่ำลงของปริมาณ  $O_2$  ในบริเวณดังกล่าว (4(ก)) ซึ่งทำให้ปริมาณ  $O_2$  ที่เหลืออยู่อาจไม่สามารถทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงได้อย่างสมบูรณ์อันเนื่องจากระยะเวลาที่อาจสั้นเกินไป อย่างไรก็ตามหลังจากตำแหน่ง 1.30 m จนถึง 1.90 m ความเข้มข้นของ CO มีค่าลดลงซึ่งเป็นของการจ่ายอากาศส่วนที่สองและสามเข้าสู่เตาเผาไหม้ในลักษณะ

หมุนวนแล้วทำให้เกิดการคลุกเคล้าภายในเตาดีขึ้น และส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ CO อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า CO ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่ระดับ 1.30 m นั้น ไม่แพร่กระจายขึ้นไปตามความสูงของเตาเผาไหม้ การกีดขวางการไหลของของเสียโดยวงแหวนวอร์เทคเป็นต้นเหตุของปรากฏการณ์ดังกล่าว [3,11-12] การเพิ่มความเร็วอากาศส่วนที่สองไม่ค่อยส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของ CO หากแต่เฉพาะที่ระดับความสูง 1.30 m เท่านั้น



รูปที่ 5 การกระจายตัวของ CO แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูง



รูปที่ 6 การกระจายตัวของ  $NO_x$  แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูง

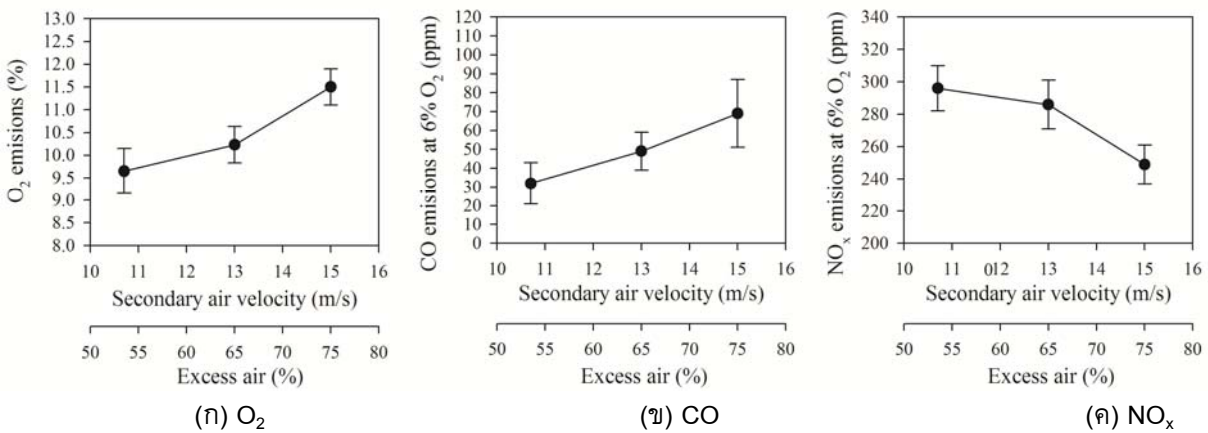
การกระจายตัวของ  $NO_x$  ตามความสูงของเตา VFBC แสดงดังรูป 6 โดยพบว่า  $NO_x$  มีความเข้มข้นต่ำที่ระดับความสูง 0.65 m ในช่วง 23-48 ppm และเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงจะมีค่าสูงสุดที่ระดับความสูง 1.30m ในช่วง 237-290 ppm ซึ่งการทำปฏิกิริยาของสารระเหย

จากเชื้อเพลิงแกลบในรูป  $\text{NH}_3$  ภายใต้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง ( $900\text{-}1000^\circ\text{C}$ ) ตามปฏิกิริยาเคมีคือ  $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NH}_2 + \text{O}_2 + \text{OH} + \text{O} \rightarrow \text{NO}$  น่าจะเป็นต้นเหตุของความเข้มข้นสูงดังกล่าว [11-13] ส่วนในช่วงความสูง 1.30-1.90 m พบว่า  $\text{NO}_x$  มีแนวโน้มลดต่ำลงซึ่งคาดว่าเป็นการทำปฏิกิริยาของ  $\text{O}_2$  ที่มีอยู่ในบริเวณดังกล่าวกับ  $\text{NH}_3$  โดยมีค่าในช่วง 114-167 ppm หลังจากระดับความสูง 1.9 m จนถึงท่อทางออก (3.40 m) ความเข้มข้นของ  $\text{NO}_x$  ที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลของปริมาณ  $\text{O}_2$  ที่ลดต่ำลง (ดังรูป 4)

### 3.3 องค์ประกอบของแก๊สเสียที่ทางออก

ผลกระทบของความเร็วอากาศส่วนที่สองที่มีต่อแก๊สมลพิษที่ทางออกเตาเผาไหม้ VFBC แสดงได้ดังรูปที่ 7 โดยพบว่าการเพิ่มความเร็วอากาศส่วนนี้ส่งผลให้ปริมาณ  $\text{O}_2$  เพิ่มขึ้นจาก 9.65 เป็น 11.5 % ดังรูปที่ 7(ก) ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอากาศส่วนที่เกินที่เพิ่มขึ้นจาก

53 เป็น 78% ส่วนปริมาณ  $\text{CO}$  นั้นพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศส่วนที่สอง ดังรูปที่ 7(ข) โดยมีค่าในช่วง 32-69 ppm (ที่ 6%  $\text{O}_2$ ) ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานที่ 740 ppm ในทุกเงื่อนไขการทดลอง การเพิ่มขึ้นของปริมาณ  $\text{CO}$  นี้เป็นผลมาจากความเร็วแก๊สภายในเตาที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ระยะเวลาการเผาไหม้แก๊ส  $\text{CO}$  ภายในเตาลดลง และการลดต่ำลงของอุณหภูมิภายในเตาเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่เกี่ยวข้อง สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) ตามความเร็วอากาศส่วนที่สองดังรูปที่ 7(ค) นั้นพบว่ามีค่าลดต่ำลงจาก 296 เหลือ 249 ppm (ที่ 6%  $\text{O}_2$ ) โดยการลดลงของ  $\text{NO}_x$  นี้สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในเตาที่ต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นผลกระทบที่เห็นได้ชัดเจนของอุณหภูมิเผาไหม้ต่อการเกิด  $\text{NO}_x$  [12] อย่างไรก็ตามปริมาณ  $\text{NO}_x$  ที่วัดได้ในทุกเงื่อนไขการทดลองนั้นยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่ 220 ppm (ที่ 6%  $\text{O}_2$ )



รูปที่ 7 องค์ประกอบแก๊สเสียที่ทางออกเตา (วัดที่ระยะ 3.4 m) ที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วอากาศส่วนที่สอง

### 3.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

ในแง่ของประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้ VFBC ซึ่งทำงานภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศส่วนที่สองนั้นพบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ในทุกเงื่อนไขมีค่าสูงกว่า 99% ซึ่งมีแนวโน้มลด

ต่ำลงเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศส่วนที่สองจาก 99.94 เหลือ 99.85% ดังตารางที่ 3 โดยพลังงานสูญเสียหลักอยู่ในลักษณะคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ ( $E_{\text{ash}}$ ) ดังสมการที่ (1) ซึ่งคาดว่าเป็นผลของของความเร็วแก๊สที่สูงขึ้นและอุณหภูมิภายในเตาที่ต่ำลง

ตารางที่ 3 พลังงานสูญเสียต่างๆ และประสิทธิภาพการเผาไหม้

Run no.	V <sub>2</sub> (m/s)	Energy losses (%)		Combustion efficiency (%)
		E <sub>fg</sub>	E <sub>ash</sub>	E <sub>c</sub>
1	10.7	0.02	0.04	99.94
2	13	0.03	0.07	99.90
3	15	0.05	0.10	99.85

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ตลอดจนสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิโดซ์เบด (VFBC) ซึ่งใช้ทรายเป็นเบดและใช้หัวฉีดกระจายอากาศภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศส่วนที่สองซึ่งเป็นอากาศส่วนที่นำเชื้อเพลิงกลับเข้าสู่เตาแบบหมุนวน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและการลดลงของความเข้มข้นออกซิเจนอย่างรวดเร็วในช่วงระดับความสูง 0.20 ถึง 1.30 m เหนือหัวฉีดกระจายอากาศ (ใต้วงแหวนวอร์เทค) บ่งชี้ว่าการเผาไหม้หลักเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว โดยการเพิ่มความเร็วอากาศส่วนที่สองนี้ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดต่ำลงแต่ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น

2. การทำปฏิกิริยาของสารระเหยจากเชื้อเพลิงโดยเฉพาะอย่างยิ่ง NH<sub>3</sub> กับ O<sub>2</sub> ที่ตำแหน่ง 1.30 m ภายใต้อุณหภูมิสูงกว่า 900°C เป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของ NO<sub>x</sub> ที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าสูงสุด

3. ปริมาณ O<sub>2</sub> และ CO ซึ่งวัดที่ท่อทางออกมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศส่วนที่สอง โดยความเร็วอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณอากาศส่วนเกินและความเร็วของแก๊สภายในเตาเพิ่มขึ้นตามลำดับ ปริมาณ CO ที่ระดับความเข้มข้น O<sub>2</sub> 6% มีค่าในช่วง 32-69 ppm ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานในทุกเงื่อนไขการทดลอง

4. ปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่ท่อทางออก มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศส่วนที่สองซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิภายในเตาที่ลดลง โดยมีค่าในช่วง 249 ถึง 296 ppm (ที่ 6% O<sub>2</sub>) ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ 220 ppm

5. ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (E<sub>c</sub>) ในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสูงกว่า 99% โดยการเพิ่มความเร็วอากาศส่วนที่สองมีแนวโน้มทำให้ E<sub>c</sub> มีค่าต่ำลง

6. เงื่อนไขความเร็วอากาศส่วนที่สองที่เหมาะสมจากการทดลองในกรณีนี้ที่พิจารณาในแง่ของการปลดปล่อยมลพิษ (NO<sub>x</sub>) ที่ต่ำสุด คือ ความเร็วอากาศที่ 15 m/s ซึ่งสอดคล้องกับอากาศส่วนเกินที่ 78%

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Natarajan, E., Nordin, A., Rao, N. (1998) Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors. Biomass and Bioenergy, Vol. 14, pp. 533-546.
- [2] Werther, J., Saenger, M., Hartge, U., Ogada, T. and Siagi, Z. (2000) Combustion of agricultural residues, Energy and Combustion Science., Vol. 26, pp. 1-27.
- [3] Madhiyanon, T., Lapirattanakun, A., Sathitruangsak, P., Soponronnarit, S. (2006) A novel cyclonic fluidized-bed combustor (U-FBC): Combustion and thermal efficiency, temperature



distribution, combustion intensity, and emission of pollutants, *Combustion and Flame*, Vol. 146, pp. 232-245.

[4] Madhiyanon T, Sathitruangsak P., Soponronnarit S. (2010) Combustion behavior of rice-husk in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC), *Applied Thermal Engineering*, 30, pp. 347-353.

[5] Armesto L, Bahillo A, Veijonen K, Cabanillas A, Otero J. (2002) Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed, *Biomass Bioenergy*, 23, pp.171-179.

[6] Fang M., Yang L., Chen G., Shi Z., Lou Z., Cen K., (2004) Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed, *Biomass Bioenergy*, 85, pp. 1273-82.

[7] Kuprianov, V.I., Janvijitsakul, K., Permchart, W. (2006) Co-firing of sugar cane bagasse with rice husk in a conical fluidized-bed combustor, *Fuel*, Vol. 85, pp.434-442.

[8] Ghani W.A.W.A.K., Alias A.B., Savory R.M., Cliffe K.R., (2009) Co-combustion of agricultural

residues with coal in a fluidized bed combustor, *Waste Management*, 29, pp. 767–773.

[9] Okasha, F. (2007) Staged combustion of rice straw in a fluidized bed, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp.52-59

[10] Varol M, Atimtay AT. (2007) Combustion of olive cake and coal in a bubbling fluidized bed with secondary air injection, *Fuel*, 86, pp. 1430-1438.

[11] Madhiyanon M., Sathitruangsak S., Soponronnarit S. (2009), Co-combustion of rice husk with coal in a cyclonic fluidized-bed combustor ( $\Psi$ -FBC), *Fuel*, 88, pp. 132-138.

[12] Madhiyanon M., Sathitruangsak S., Soponronnarit S. (2009), Co-firing characteristics of rice husk and coal in a cyclonic fluidized-bed combustor ( $\Psi$ -FBC) under controlled bed temperatures, *Fuel*, 90, pp. 2103-112.

[13] Zevenhoven R, Kilpinen P. (2002) Control of pollutants in flue gases and fuel gases. 2nd ed. Finland: Espoo/Turku.