

## อิทธิพลของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่มีต่อคุณลักษณะการเผาไหม้แกลบในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดที่ใช้ทรายเป็นเบด

### Effects of Fluidizing Air Velocity on Combustion Characteristics of Rice Husk In A Vortex-Fluidized Bed Combustor Using Sand as a Bed material

ประสาน สติภัยเรืองศักดิ์<sup>1</sup>, ปรัชญา บุญประสิทธิ์<sup>1</sup>, ฐานิตย์ เมธียนนท์<sup>1\*</sup> และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

<sup>2</sup> คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

\*ติดต่อ: E-mail: thanid\_m@yahoo.com, 029883655 ต่อ 3107

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอคุณลักษณะการเผาไหม้แกลบในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดที่ใช้ทรายเป็นเบด ตลอดจนสมรรถนะการเผาไหม้ในแง่ของประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $E_c$ ) และแก๊สเสียที่ทางออกเตา การทดลองได้ปรับเปลี่ยนความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่ง ( $V_1$ ) คือความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 m/s ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ในช่วง 60-95% ผลการวัดอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนภายในเตาบ่งชี้ว่าการเผาไหม้หลักเกิดขึ้นในท้องเผาไหม้ใต้วงแหวนวอร์เทค ในขณะที่การเพิ่มความเร็วอากาศส่วนนี้ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดลง ในแง่ขององค์ประกอบแก๊สเสียที่ปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน 6% ที่ทางออกพบว่า CO มีค่าน้อยลงเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของ  $V_1$  โดยมีค่าต่ำในช่วง 43-48 ppm ในขณะที่  $NO_x$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้น  $V_1$  ซึ่งมีค่าในช่วง 296-328 ppm นอกจากนี้  $E_c$  ทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสูงกว่า 99% ตลอดจนพบว่า  $V_1$  ที่เหมาะสมในการศึกษานี้คือ 0.5 m/s

**คำหลัก:** แกลบ/ แก๊สเสีย/ ฟลูอิดซ์เบด/ 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 fluidizing air ( $V_1$ ), was varied at 0.5, 0.6 and 0.7 m/s, corresponding to the excess air (EA) in the range of 60-95%. The temperature and  $O_2$  profiles along the combustor height indicated that main combustion occurred beneath the vortex ring, while increasing  $V_1$  was responsible for a drop in temperature along the combustor height. In view of gas emissions corrected to 6%  $O_2$ , CO tended to slightly decrease as  $V_1$  increased, ranging 43-48 ppm; but  $NO_x$ , ranging 296-328 ppm, seemed to increase with the increase in  $V_1$ . Moreover, the  $E_c$  for all conditions were satisfying, mostly >99%. The results concluded that the optimum  $V_1$ , was 0.5 m/s.

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันวิกฤตการณ์ด้านพลังงานน้ำมันที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องควบคู่กับการตื่นตัวในเรื่องสภาวะโลกร้อน ส่งผลให้นานาประเทศได้กำหนดนโยบายที่จะส่งเสริมให้มีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น

โดยประเทศไทยได้มีการกำหนดนโยบายการเพิ่มสัดส่วนพลังงานทดแทนเป็น 8% ในปี 2554 [1] ทำให้ระยะเวลาที่ผ่านมามารการนำเชื้อเพลิงชีวมวลจำพวก แกลบ ฟางข้าว และเปลือกไม้ นำมาเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำแบบต่างๆ ในประเทศไทยแกลบซึ่งเป็นผลพลอยได้จาก

กระบวนการสีข้าว เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้สูง ส่วนเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบันว่ามีประสิทธิภาพสูง คือการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางว่าเป็นเตาเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูง [2,3] และกำลังเป็นที่นิยมอยู่ในปัจจุบัน โดยเชื้อเพลิงที่มักถูกนำไปเผาไหม้ได้แก่ แกลบ [4-7] ชานอ้อย [8] กะลาปาล์ม [9] และฟางข้าว [10] เป็นต้น

งานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัยได้ศึกษาการเผาไหม้แกลบและการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหินปิทูมินัสในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบด ซึ่งไม่ใช่วัสดุเนื้อเยื่อเป็นเบดและติดตั้งใบกววนภายในเบดเพื่อป้องกันการเกาะตัวของเชื้อเพลิง [7,11] ซึ่งผลการศึกษาพบว่า VFBC สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบหรือเชื้อเพลิงร่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพ (>97%) และปลดปล่อยแก๊สพิษ (CO และ SO<sub>2</sub>) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เว้นแต่ NO<sub>x</sub> ที่ต้องควบคุมอุณหภูมิเบดให้ต่ำกว่า 800°C จึงจะสามารถจำกัดได้ ดังนั้นการไม่ผสมวัสดุเนื้อเยื่อในเบดของเตา VFBC ส่งผลให้ขีดจำกัดในการนำเตาเผาไหม้ไปประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชนิดอื่นที่ไม่สามารถทำให้เกิดสภาวะฟลูอิดไธซ์เบดได้อย่างเดียวกับแกลบ จึงได้ปรับเปลี่ยนการศึกษามาเป็นการใช้ทรายเป็นเบดปริมาณ 15 kg จึงจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ใน VFBC ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของการทำงานที่แปรเปลี่ยนไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเผาไหม้แกลบในเตาเผาไหม้ VFBC ที่ใช้ทรายเป็นเบดและใช้หัวฉีดกระจายอากาศ ซึ่งเป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากที่ผ่านมา [12] โดยศึกษาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเตาตลอดจนประเมินสมรรถนะของเตาเผาไหม้ VFBC ภายใต้การปรับเปลี่ยนความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไธซ์เบด

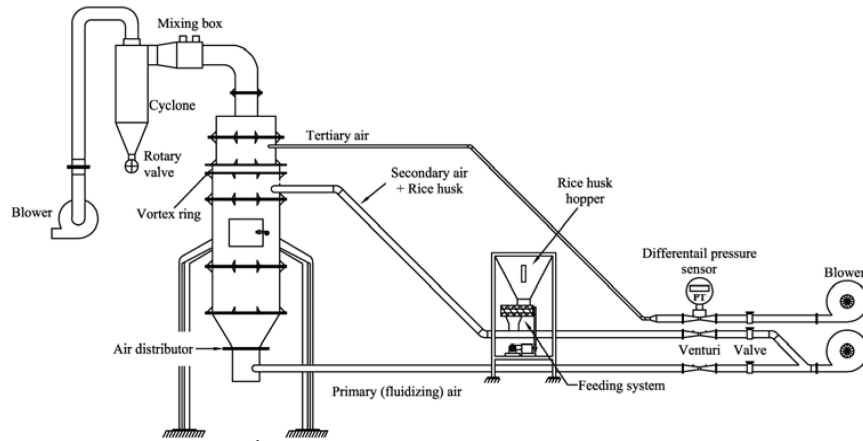
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาผลกระทบของความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไธซ์เบดที่มีต่อสมรรถนะการเผาไหม้แกลบของเตาเผาไหม้ VFBC ที่ใช้ทรายเป็นเบด ซึ่งพิจารณาถึงลักษณะการเผาไหม้ องค์ประกอบของแก๊สไอเสีย และประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยทุกเงื่อนไขการทดลองจะปรับอัตราการป้อน

เชื้อเพลิงและความเร็วอากาศในส่วนอื่นๆไว้คงที่ แต่จะปรับเปลี่ยนเพียงความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไธซ์เบดเท่านั้น

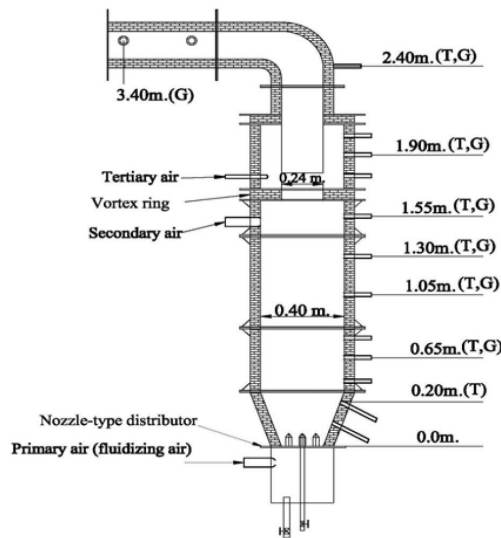
## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบด (VFBC)

รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบด (VFBC) โดยเตาเผาไหม้ VFBC ที่ใช้ในการทดลองนั้นถูกออกแบบโดยรวมเอาลักษณะเด่นของเตาเผาแบบไซโคลนคือการเผาไหม้แบบหมุนวนหรือวอร์เทคและการเผาไหม้อุณหภูมิสูงในอากาศของเตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบดเข้าด้วยกัน จึงทำให้เตาเผาตัวนี้มีประสิทธิภาพสูง ขนาดของเตา VFBC คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาไหม้เท่ากับ 40 cm และสูง 165 cm โดยลักษณะของเตาเผาไหม้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2 คือส่วนที่หนึ่งเป็นรูปทรงกรวยหงายตัดยอดสูง 30 cm โดยที่ห้องเผาไหม้ทรงกระบอกจะมีการติดตั้งวงแหวนวอร์เทคซึ่งมีขนาดช่องเปิดของรูเท่ากับ 24 cm โดยวงแหวนวอร์เทคนี้จะช่วยในการดักอนุภาคเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมด ให้ตกลงมายังเบดซึ่งจะสามารถเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้ ส่วนด้านล่างของเตาเผาที่เป็นกรวยหงายนั้นจะเป็นส่วนรองรับอนุภาคเบดและเชื้อเพลิงในขณะที่เผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด ซึ่งมีการติดตั้งตัวกระจายอากาศแบบหัวฉีดไว้ด้านล่างสุด สำหรับการจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ อากาศส่วนที่หนึ่งเป็นอากาศส่วนที่ทำให้เกิดฟลูอิดไธซ์เบดซึ่งถูกจ่ายเข้าบริเวณด้านล่างของเตาผ่านตัวกระจายอากาศแบบหัวฉีด อากาศส่วนที่สองถูกจ่ายในแนวสัมผัสกับผนังเตาพร้อมกับแกลบที่ตำแหน่งใต้วงแหวนวอร์เทค และอากาศส่วนที่สามเป็นส่วนที่ช่วยในการเผาไหม้ ซึ่งตำแหน่งที่จ่ายอยู่เหนือวงแหวนวอร์เทคในแนวสัมผัสกับผนังเตาเช่นเดียวกับอากาศส่วนที่สอง นอกจากนี้ ในการทดลองได้ใช้ทรายขนาด 300 μm ปริมาณ 15 kg ซึ่งคิดเป็นความสูงเบด 15 cm เป็นอนุภาคเบดเพื่อให้เกิดฟลูอิดไธซ์เบด



รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด



รูปที่ 2 ขนาดเตาเผาไหม้ VFBC ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและแก๊สไอเสียในการทดลอง

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	10.3
Moisture	10.3
Ash	14.0
Higher heating value (MJ/kg)	
	14.98

## 2.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือแกลบซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 1

## 2.3 ขั้นตอนการทดลอง

การวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้เวเนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน  $\pm 3\%$  ของยานการวัด การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบจะใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ขับสกรูป้อนเชื้อเพลิง ส่วนการวัดอุณหภูมิ (T) ในการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลซึ่งมีความละเอียด  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  ซึ่งทำการวัดจำนวน 7 ตำแหน่งคือ 0.20, 0.65, 1.05, 1.30, 1.55, 1.90 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ และที่คอเตาเผาไหม้ (ระดับ 2.40) ดังรูปที่ 2 สำหรับในการวัดความเข้มข้นของแก๊ส (G) ภายในเตาคือ  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  และ  $\text{NO}_x$  ที่ระดับความสูงต่างๆ คือ 0.65, 1.05,



1.30, 1.55, 1.90, 2.40 m และที่ท่อทางออกเตา (3.40 m) นั้นได้ใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย Testo 350XL ซึ่งสามารถวัดแก๊ส O<sub>2</sub>, CO และ NO<sub>x</sub> ด้วยเซนเซอร์ชนิดเซลล์เคมี ส่วน CO<sub>2</sub> ที่แสดงนั้น ได้มาจากการคำนวณย้อนกลับจากปริมาณ O<sub>2</sub> ที่ได้จากเครื่องวัด สำหรับประสิทธิภาพการเผาไหม้นั้นหาได้จากการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ภายในถ้ำที่ติดจากไซโคลน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุ Leco CHNS932 ร่วมกับปริมาณ CO ที่วัดได้จากแก๊สไอเสีย

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการปรับความเร็วลมที่ใช้ของอากาศส่วนต่างๆ ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลองตามตารางที่ 2 จากนั้นทำการจุดเตาเผาไหม้ โดยเริ่มบรรจุน้ำมันประมาณ 15 kg เข้าสู่เตาเผาไหม้แล้วให้ความร้อนกับทรายด้วยถ่านไม้ติดไฟแล้ว จนอุณหภูมิในเตาสูงขึ้นถึง 400-500 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหล็กสามารถเกิดการลุกไหม้ตัวเองได้ หลังจากนั้นจึงเริ่มป้อนเหล็กเข้าสู่เตาเผาไหม้ เมื่อสภาวะการทำงานของเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60-90 นาทีแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าต่างๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาและความเข้มข้นของแก๊สต่างๆ (O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>) ที่ระดับความสูงต่างๆ (ดังรูปที่ 2: T=อุณหภูมิ, G=แก๊ส) รวมถึงการวัดปริมาณถ่านที่ติดได้จากไซโคลน (เก็บทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 15 วินาที) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ โดยข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ (E<sub>c</sub>) ได้ตามสมการที่ (1) [4,5,7,11]

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

โดย

E<sub>F</sub> = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้ (MJ/kg)

E<sub>a</sub> = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในถ้ำ (MJ/kg)

E<sub>fg</sub> = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในแก๊สไอเสียซึ่งคำนวณได้จากปริมาณ CO<sub>x</sub> ค่าความร้อนของ CO (MJ/kg)

### 3. ผลการทดลอง

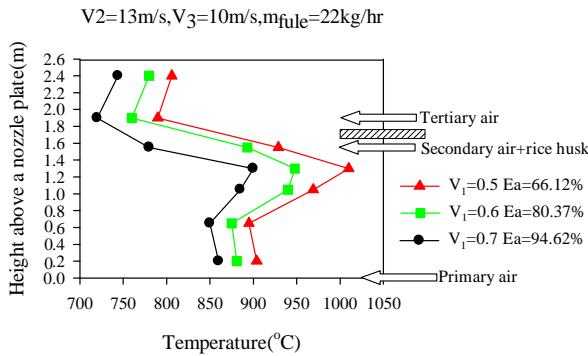
#### 3.1 การกระจายอุณหภูมิในแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้

การกระจายอุณหภูมิตามลำดับความสูงในแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้ VFBC ภายใต้การเปลี่ยนแปลง

ความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชัน (อากาศส่วนที่หนึ่ง, V<sub>1</sub>) ในเงื่อนไขต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยพบว่าการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาไหม้ของทุกเงื่อนไขมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยในช่วงความสูง 0.2-0.65 m (เบต-เหนือเบต) มีอุณหภูมิใกล้เคียงกันในแต่ละเงื่อนไขซึ่งบ่งชี้ถึงลักษณะการเกิดฟลูอิดเซชันที่ดีจนทำให้อุณหภูมิเบตและเชื้อเพลิงในช่วงระดับความสูงดังกล่าวเกิดการคลุกเคล้ากันเป็นอย่างดี ส่วนที่ระดับความสูง 0.65-1.30 m พบว่าในทุกเงื่อนไขอุณหภูมิมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยเฉพาะสารระเหยจากเหล็กเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากถูกจ่ายเข้าสู่เตาเผาไหม้พร้อมกับอากาศส่วนที่สองที่ระดับความสูง 1.5 m นอกจากนี้การเผาไหม้อย่างต่อเนื่องของแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ซึ่งลอยมาจากเบตกับอากาศส่วนที่สองนี้เป็นอีกเหตุผลหนึ่งส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิดังกล่าว อย่างไรก็ตามในช่วงระดับความสูง 1.3-1.9 m พบว่าอุณหภูมิในทุกเงื่อนไขมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีสาเหตุมาจากการจ่ายอากาศส่วนที่สอง (สัดส่วนมวล 0.76-0.78) และอากาศส่วนที่สาม (สัดส่วนมวล 0.15) ซึ่งทำให้เกิดการผสมกับแก๊สเผาไหม้ที่ไหลมาจากด้านล่างแล้วทำให้อุณหภูมิต่ำลงตามความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่งที่เพิ่มขึ้น สำหรับในช่วงความสูง 2.0-2.4 m พบว่าอุณหภูมิในทุกเงื่อนไขมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากยังคงมีการเผาไหม้แก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จำพวก CO ในช่วงดังกล่าว ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณออกซิเจน และ CO ในช่วงเดียวกันนี้ (ดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

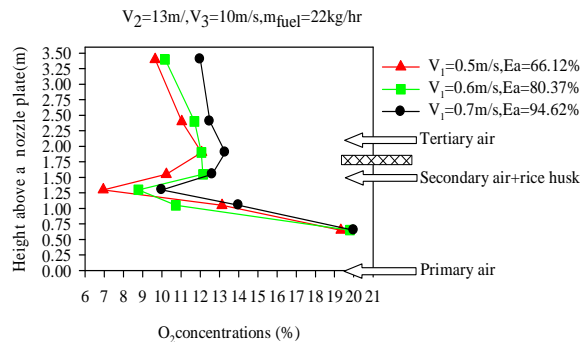
Testing conditions	Run number		
	1	2	3
Fluidizing air velocity (m/s)	0.50	0.60	0.70
Mass fraction (-)	0.43	0.47	0.51
2 <sup>nd</sup> air velocity (m/s)	13.00	13.00	13.00
Mass fraction (-)	0.46	0.43	0.40
Tertiary air velocity (m/s)	10.00	10.00	10.00
Mass fraction (-)	0.11	0.10	0.09
Excess air (%)	66.12	80.37	94.64
Rice husk feed rate (kg/h)	22	22	22



รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตาตามระดับความสูง

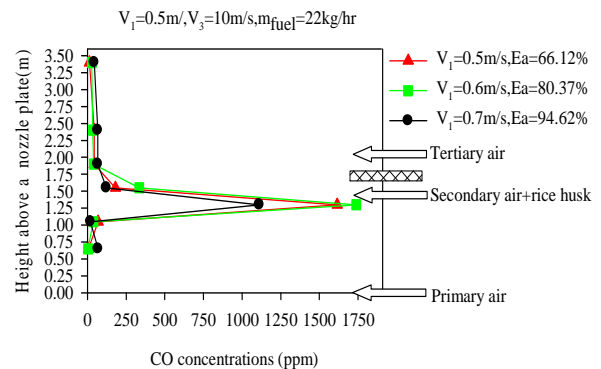
3.2 การกระจายตัวของแก๊สภายในเตาตามระดับความสูง

พฤติกรรมเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตา VFBC นั้น อาจสามารถพิจารณาได้จากการกระจายตัวของแก๊สเผาไหม้ตามระดับความสูง ดังรูปที่ 4-6 โดยการกระจายตัวของออกซิเจนดังรูปที่ 4 แสดงให้เห็นค่าในช่วงความสูงตั้งแต่ 0.65 m เหนือแผ่นกระจายอากาศความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ลดลงอย่างรวดเร็วจากประมาณ 19.32-20% เหลือเพียง 6.95-10% ที่ระดับความสูง 1.30 m ซึ่งบ่งชี้ถึงการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องของเชื้อเพลิงในบริเวณดังกล่าว หลังจากนั้น O<sub>2</sub> ที่ระดับความสูง 1.55 และ 1.90 m มีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าในช่วง 12.08-13.30% (ที่ระดับความสูง 1.90 m) เนื่องจากการจ่ายอากาศส่วนที่สองและสามซึ่งมีสัดส่วนรวมกันมากถึง 91-93% เข้ามาในบริเวณดังกล่าว อย่างไรก็ตามที่ระดับความสูงในช่วง 2.40 m (คอกเตา) จนถึงจุดวัดแก๊สไอเสียทางออก (3.40 m) พบว่า O<sub>2</sub> มีแนวโน้มลดลงเหลือ 9.65-12% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ยังเกิดขึ้นต่อเนื่องของแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จำพวก CO ในช่วงระดับความสูงดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มความเร็วยังของอากาศส่วนที่หนึ่งนั้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ที่ระดับความสูงต่างๆ สูงขึ้น



รูปที่ 4 การกระจายตัวของ O<sub>2</sub> แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูง

รูปที่ 5 แสดงความเข้มข้นของแก๊ส CO ตามระดับความสูงของเตาโดยพบว่าที่ระดับความสูงตั้งแต่แผ่นกระจายอากาศจนถึงระดับ 1.05 m นั้น ความเข้มข้นของ CO มีค่าต่ำในช่วง 20-68 ppm ส่วนที่ระดับความสูง 1.30 m นั้น พบว่าความเข้มข้นของ CO มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างรุนแรง โดยสังเกตได้จากอุณหภูมิที่สูง (ดังรูปที่ 3) และการลดต่ำลงของปริมาณ O<sub>2</sub> ในบริเวณดังกล่าว (4) ซึ่งทำให้ปริมาณ O<sub>2</sub> ที่เหลืออยู่อาจไม่สามารถทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงได้อย่างสมบูรณ์อันเนื่องจากระยะเวลาที่อาจสั้นเกินไปอย่างไรก็ดี หลังจากตำแหน่ง 1.30 m จนถึง 1.90 m ความเข้มข้นของ CO มีค่าลดลงซึ่งเป็นของการจ่ายอากาศส่วนที่สองและสามเข้าสู่เตาเผาไหม้ในลักษณะหมุนวนแล้วทำให้เกิดการคลุกเคล้าภายในเตาดีขึ้น และส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ CO อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า CO ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่ระดับ 1.30 m นั้น ไม่แพร่กระจายขึ้นไปตามความสูงของเตาเผาไหม้ การกีดขวางการไหลของของเสียโดยวงแหวนวอร์เทคเป็นต้นเหตุของปรากฏการณ์ดังกล่าว [7,11,12] การเพิ่มความเร็วยังของอากาศส่วนที่สองไม่ค่อยส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของ CO หากแต่เฉพาะที่ระดับความสูง 1.30 m เท่านั้น



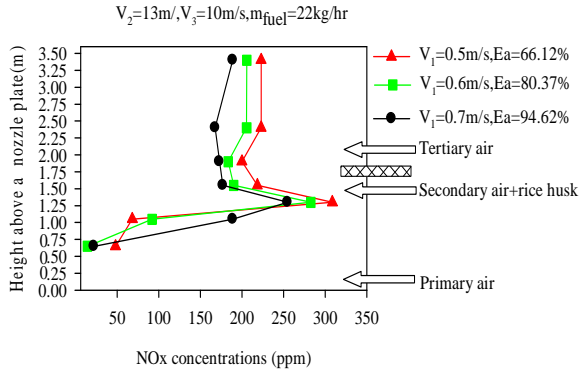
รูปที่ 5 การกระจายตัวของ CO แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูง

การกระจายตัวของ NO<sub>x</sub> ตามความสูงของเตา VFBC แสดงดังรูป 6 โดยพบว่า NO<sub>x</sub> มีความเข้มข้นต่ำที่ระดับความสูง 0.65 m ในช่วง 14-47.9 ppm และเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงจะมีค่าสูงสุดที่ระดับความสูง 1.30 m ในช่วง 255-308.85 ppm ซึ่งการทำปฏิกิริยาของสารระเหยจากเชื้อเพลิงแอลบในรูป NH<sub>3</sub> ภายใต้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง (900-1000°C) ตามปฏิกิริยาเคมีคือ

$$NH_3 + O_2 \rightarrow NH_2 + OH \rightarrow NO$$

น่าจะจะเป็นต้นเหตุ

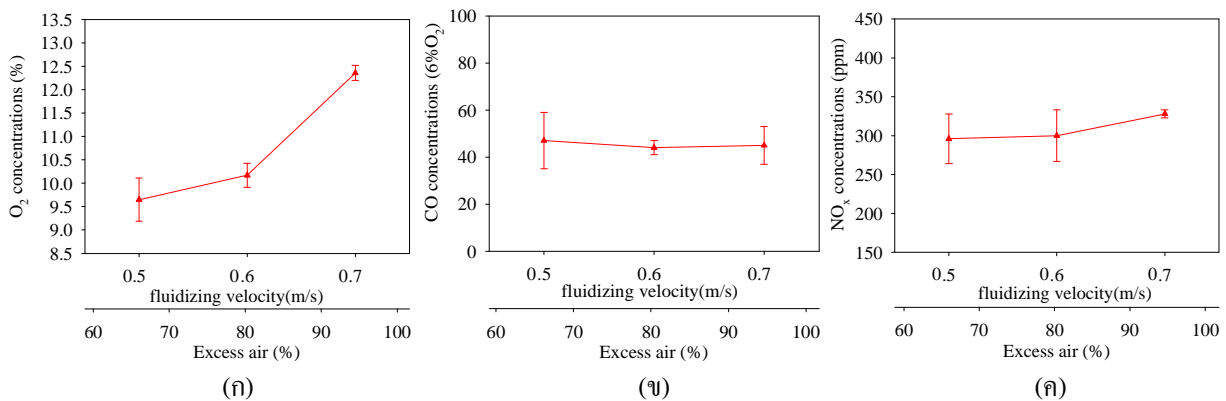
ของความเข้มข้นสูงดังกล่าว [11,13-14] ส่วน ในช่วงความสูง 1.30-1.90 m พบว่า NO<sub>x</sub> มีแนวโน้มลดต่ำลงซึ่งคาดว่าเป็นการทำปฏิกิริยาของ O<sub>2</sub> ที่มีอยู่ในบริเวณดังกล่าวกับ NH<sub>3</sub> โดยมีค่าในช่วง 173-200 ppm หลังจากระดับความสูง 1.9 m จนถึงท่อทางออก (3.40m) ความเข้มข้นของ NO<sub>x</sub> ที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลของปริมาณ O<sub>2</sub> ที่ลดต่ำลง (ดังรูป 4)



รูปที่ 6 การกระจายตัวของ NO<sub>x</sub> แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูง

### 3.3 องค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่ทางออก

ผลกระทบของความเร็วจานอากาศส่วนที่หนึ่งที่มีต่อแก๊สมลพิษที่ทางออกเตาเผาไหม้ VFBC แสดงได้ดังรูปที่ 7 โดยพบว่า การเพิ่มความเร็วอากาศส่วนนี้ส่งผลให้ปริมาณ O<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นจาก 9.65 เป็น 12.36 % ดังรูปที่ 7(ก) ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นจาก 66.12% เป็น 94.62% ส่วนปริมาณ CO นั้นพบว่ามีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่ง



รูปที่ 7 องค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ทางออกเตา (วัดที่ระยะ 3.4 m) ที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่ง

ดังรูปที่ 7 (ข) โดยมีค่าในช่วง 45-47 ppm (ที่ 6% O<sub>2</sub>) ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานที่ 740 ppm ในทุกเงื่อนไขการทดลอง การลดลงของปริมาณ CO นี้เป็นผลมาจากความเร็วแก๊สภายในเตาที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ระยะเวลาการเผาไหม้แก๊ส CO ภายในเตาลดลง และการลดต่ำลงของอุณหภูมิภายในเตาเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่เกี่ยวข้อง สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ตามความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่งดังรูปที่ 7(ค) นั้นพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 296 เป็น 328 ppm (ที่ 6% O<sub>2</sub>) โดยการเพิ่มขึ้นของ NO<sub>x</sub> นี้สอดคล้องกับอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นผลกระทบที่เห็นได้ชัดเจนของอากาศส่วนเกินต่อการเกิด NO<sub>x</sub> [14] อย่างไรก็ตามปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่วัดได้ในทุกเงื่อนไขการทดลองนั้นยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่ 220 ppm (ที่ 6% O<sub>2</sub>)

### 3.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

ในแง่ของประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้ VFBC ซึ่งทำงานภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่งนั้นพบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ในทุกเงื่อนไขมีค่าสูงกว่า 99% ซึ่งมีแนวโน้มลดต่ำลงเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่งจาก 99.94 เหลือ 99.87% ดังตารางที่ 3 โดยพลังงานสูญเสียหลักอยู่ในลักษณะคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ (E<sub>ash</sub>) ดังสมการที่ (1) ซึ่งคาดว่าเป็นผลของความเร็วแก๊สที่สูงขึ้นและอุณหภูมิภายในเตาที่ต่ำลง

ตารางที่ 3 พลังงานสูญเสียต่างๆและประสิทธิภาพการเผาไหม้

Run No.	$V_1$ (m/s)	Energy losses (%)		Combustion efficiency (%)
		$E_{fg}$	$E_{ash}$	$E_c$
1	0.5	0.02	0.04	99.94
2	0.6	0.01	0.06	99.93
3	0.7	0.04	0.08	99.87

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ตลอดจนสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด (VFBC) ซึ่งใช้ทรายเป็นเบดและใช้หัวฉีดกระจายอากาศภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่งซึ่งเป็นอากาศส่วนที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและการลดลงของความเข้มข้นออกซิเจนอย่างรวดเร็วในช่วงระดับความสูง 0.20 ถึง 1.30 m เหนือหัวฉีดกระจายอากาศ (ได้วงแหวนวอร์เทค) บ่งชี้ว่าการเผาไหม้หลักเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว โดยการเพิ่มความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่งส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดต่ำลง แต่ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น

2. การทำปฏิกิริยาของสารระเหยจากเชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $NH_3$  กับ  $O_2$  ที่ตำแหน่ง 1.30 m ภายใต้อุณหภูมิสูงกว่า  $900^\circ C$  เป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของ  $NO_x$  ที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าสูงสุด

3. ปริมาณ  $O_2$  ซึ่งวัดที่ท่อทางออกมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่ง โดยความเร็วอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณอากาศส่วนเกินและความเร็วของแก๊สภายในเตาเพิ่มขึ้นตามลำดับ ปริมาณ CO ที่ระดับความเข้มข้น  $O_2$  6% มีค่าในช่วง 45-47 ppm ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานในทุกเงื่อนไขการทดลอง

4. ปริมาณ  $NO_x$  ที่ท่อทางออก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าในช่วง 296 ถึง 328 ppm (ที่ 6%  $O_2$ ) ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ 220 ppm

5. ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $E_c$ ) ในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสูงกว่า 99% โดยการเพิ่มความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่งมีแนวโน้มทำให้  $E_c$  มีค่าต่ำลง

6. เงื่อนไขความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่งที่เหมาะสมจากการทดลองในกรณีนี้พิจารณาในแง่ของการปลดปล่อยมลพิษ ( $NO_x$ ) ที่ต่ำสุด คือ ความเร็วอากาศที่ 0.5 m/s ซึ่งสอดคล้องกับอากาศส่วนเกินที่ 66.12%

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

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

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] EPPO. Annual Report. Energy Planning and Policy Office; 2006.
- [2] 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
- [3] 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.
- [4] Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Soponronnarits. (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 huskin 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] Madhiyanon, T., Lapiroattanakun, A., Sathitruangsak, P., Soponronnarit, S., 2006 A novel cyclonic fluidized-bed combustor ( $\Psi$ -FBC): Combustion and thermal efficiency, temperature distribution, combustion intensity,

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

[8] 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.

[9] 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.

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

[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] ประสาน สติตย์เรืองศักดิ์, ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2011). คุณลักษณะการเผาไหม้ แกลบในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด ที่ใช้หัวฉีด กระจายอากาศ: การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกระบี่.

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

[14] 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.