

**ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกินที่มีต่อสมรรถนะการเผาไหม้แกลบและการเผาไหม้  
แกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้น**  
**Effect of Excess Air on Combustion Performances of Rice Husk Combustion and Rice  
Husk/Coal Co-combustion in a Short-combustion-chamber Fluidized Bed Combustor**

ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์<sup>1</sup> ฐานิตย์ เมธิยานนท์<sup>2\*</sup> และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์<sup>3</sup>

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 51 เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

<sup>1,3</sup> คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10400

\*ผู้ติดต่อ: thanid\_m@yahoo.com, เบอร์โทรศัพท์: (662) 9883655 ext. 3107

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ที่มีต่อสมรรถนะการเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยวและการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในสัดส่วน 80:20 (โดยพลังงาน) ในเตาของแก๊สผสมพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยในทุกเงื่อนไขการทดลองจะใช้ EA ในช่วง 80-218% ซึ่งถูกปรับเปลี่ยนโดยการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่จ่ายเข้าสู่เตาเผาไหม้ ผลการทดลองพบว่า การเพิ่ม EA ส่งผลให้อุณหภูมิเบด ลดต่ำลง โดยในทุกเงื่อนไขการทดลอง CO มีค่าระหว่าง 60-1230 ppm (ที่ 6% O<sub>2</sub>) ซึ่ง CO มีค่าเกินมาตรฐานเมื่อเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหินภายใต้สภาวะ EA มากกว่า 172% ส่วนปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่ระดับ O<sub>2</sub> ส่วนเกิน 6% พบว่ามีค่าในช่วง 210-370 ppm ซึ่งในการเผาไหม้ร่วม NO<sub>x</sub> จะมีค่าต่ำกว่ากรณีเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยวในทุกเงื่อนไขการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่ม EA ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (E<sub>c</sub>) ลดลง โดยในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่ามากกว่า 96% นอกจากนี้ ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า EA ที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยวคือ 75% และ EA = 95% สำหรับการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหิน

**คำหลัก:** การเผาไหม้ร่วม/ แกลบ/ ถ่านหิน/ ฟลูอิดไคซ์เบด/ วอร์เทก

**Abstract**

This research describes the effect of excess air (EA) on combustion performance of pure rice husk firing, and rice husk co-firing with coal in the ratio of 80:20 (energy basis) in terms of gas emissions and combustion efficiency (E<sub>c</sub>). For all conditions, EA values, ranging 80-218%, were varied by adjusting the fuel feed rate supplied to the combustor. The results showed that increases in EA resulted in bed temperature reduction. CO emissions, generally ranging from 60 to 1230 ppm (at 6% O<sub>2</sub>), were over the standard value in the cases of co-firing under EA>172%. Moreover, NO<sub>x</sub> values derived from co-firing cases were lower than pure rice husk firing, ranging between 210 and 370 ppm (at 6% O<sub>2</sub>). The increase in EA attributed to slightly decreased E<sub>c</sub>, ranging >96% for all tests. The results concluded that the appropriate EA values were 75% for 100% rice-husk firing, and 95% for rice-husk/coal co-combustion.

**Keywords:** coal/ co-firing/ fluidized-bed/ rice husk/ vortex

## 1. บทนำ

การผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลกำลังได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องเพราะนอกจากเป็นการกำจัดเศษวัสดุทางการเกษตรแล้วยังเป็นการลดการปลดปล่อยปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลอีกด้วย โดยตลอดช่วงเวลากว่าทศวรรษที่ผ่านมา ประเทศไทยได้ส่งเสริมให้มีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตไฟฟ้าและความร้อนในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยกลบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสีข้าวนั้นถูกผลิตได้ปีละประมาณ 5 ล้านตันต่อปี ได้ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันความต้องการการใช้กลบเป็นเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าปริมาณกลบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ซึ่งอาจนำไปสู่การขาดแคลนกลบในช่วงนอกฤดูการเก็บเกี่ยว การเผาไหม้ร่วมระหว่างกลบและถ่านหินถูกพิจารณาว่าเป็นวิธีการที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งถ่านหินที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือถ่านหินบิทูมินัส เพราะมีมลพิษที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้น้อยกว่าลิกไนต์ซึ่งมีอยู่ในประเทศไทย

เมื่อเปรียบเทียบเทคนิคการเผาไหม้รูปแบบต่าง ๆ พบว่าการเผาไหม้แบบฟลูอิดไอซ์เบดเป็นเทคนิคการเผาไหม้ที่ค่อนข้างดีในการนำมาใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพราะความยืดหยุ่นในการใช้เชื้อเพลิงและปลดปล่อยแก๊สมลพิษน้อย [1-5] อย่างไรก็ตามเตาเผาไหม้ฟลูอิดไอซ์เบดทั่วไปมักถูกออกแบบให้เตาเผาไหม้มีความสูง เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคภายในไม่หลุดออกนอกเตา ก่อนที่จะเผาไหม้อย่างหมดจด ซึ่ง ส่งผลให้ค่าสัดส่วนความสูงของเส้นผ่านศูนย์กลาง (H/D) ของเตาเผาไหม้ลักษณะนี้มีค่ามาก (ประมาณ 13) ทั้งนี้ เตาเผาไหม้ฟลูอิดไอซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้นที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยอาศัยการติดตั้งวงแหวนวอร์เทคเพื่อหน่วงเวลาการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงภายในเตาให้ยาวนานขึ้น

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่าง ๆ เช่น เศษวัสดุจากกระบวนการผลิตน้ำมันมะกอกและน้ำมันปาล์ม ลูกพีช และฟางข้าว [6-9] มาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไอซ์เบดเพื่อใช้เพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และแก๊สมลพิษ โดยมักใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลักซึ่งต่างจากงานวิจัยนี้ที่ใช้กลบเป็นเชื้อเพลิงหลัก อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการเผาไหม้ต่าง ๆ ปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพคือ ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ซึ่งมักถูกระบุในรูปของปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess air; EA)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาลักษณะของ EA ที่มีต่อสมรรถนะการเผาไหม้กลบและการเผาไหม้ร่วมของกลบและถ่านหินบิทูมินัส (ขนาด <5 mm) ในสัดส่วน 80:20 (โดยพลังงาน) ซึ่งจะพิจารณาองค์ประกอบของแก๊สไอเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้เป็นสำคัญ โดยในทุกเงื่อนไขการทดลองจะคงปริมาณอากาศที่จ่ายเข้าเตาเผาไหม้และปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเพื่อปรับเปลี่ยน EA เพราะเป็นวิธีที่สะดวกต่อการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกินที่มีต่อการเผาไหม้กลบอย่างเดี่ยวและการเผาไหม้ร่วมของกลบและถ่านหินนั้น จะใช้เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบในหัวข้อ 2.1 และใช้วิธีการทดลองตามหัวข้อที่ 2.3

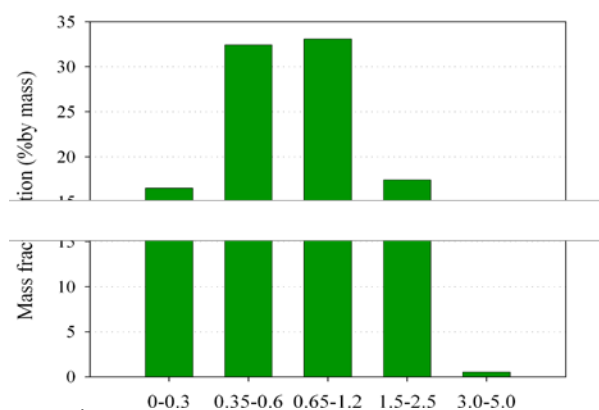
### 2.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือกลบและถ่านหินบิทูมินัส ซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ทั้งสองชนิดดังแสดงใน ตารางที่ 1 ส่วนขนาดของถ่านหินบิทูมินัสที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเล็กกว่า 5 mm ซึ่งมีการกระจายขนาดดังรูปที่ 1 โดยจากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าในเชื้อเพลิงกลบนั้นจะมีปริมาณของสารระเหย (Volatile) ซึ่งเผาไหม้ได้ง่ายมากกว่าถ่านหินบิทูมินัส ในขณะที่ถ่านหินนั้นจะมีปริมาณของคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ในโตรเจนและกำมะถันมากกว่า

แกลบ นอกจากนี้ ค่าความร้อนของถ่านหินบิทูมินัส (24.5 MJ/kg) นั้นจะมีค่ามากกว่าแกลบ (14.98 MJ/kg) อย่างเห็นได้ชัดเช่นกัน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง (as received)

	Bituminous coal	Rice Husk
Proximate analysis		
(wt.%)		
Fixed carbon	38.92	20.1
Volatile matter	32.2	55.6
Moisture	24.69	10.3
Ash	4.19	14.0
Ultimate analysis		
(wt.%)		
Carbon	57.15	38.0
Hydrogen	3.29	4.55
Oxygen	14.18	32.4
Nitrogen	1.2	0.69
Sulphur	1.28	0.06
Moisture	17.49	10.3
Ash	5.41	14.0
Colorific value		
(MJ/kg)	24.5	14.98



รูปที่ 1 สัดส่วนโดยมวลของขนาดถ่านหินบิทูมินัส

## 2.2. เตาเผาไหม้ฟลูอิดไธซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้น

เตาเผาไหม้ฟลูอิดไธซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้นที่ใช้ในการทดลองนั้น มีไดอะแกรม ดังแสดงใน รูปที่ 2 ลักษณะของเตาเผาไหม้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ดังรูปที่ 3 คือ 1) เตาเผาไหม้ที่เป็นทรงกระบอกที่มี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเท่ากับ 500 mm และสูง 1525 mm และ 2) ส่วนกรวยซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยอดตัดกรวย 300 mm สูง 500 mm ซึ่งถูกออกแบบสำหรับรองรับอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมด ผ่นังเตาด้านในก่อด้วยอิฐและฉาบด้วยซีเมนต์ทนไฟหนา 125 mm ในส่วนของตัวเตาเผาที่เป็นทรงกระบอกได้มีการติดตั้งวงแหวนวอร์เทคที่ระดับความสูง 1380 mm (เหนือแผ่นกระจายอากาศ) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูวงแหวนเท่ากับ 300 mm เพื่อดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดที่อาจหลุดลอยขึ้นเมื่อเกิดการฟุ้งกระจายของเชื้อเพลิง

การจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้มีด้วยกันสามส่วน ดังนี้คือ 1) อากาศส่วนที่หนึ่งซึ่งเป็นอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไธซ์ 2) อากาศส่วนที่สองเป็นอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้และช่วยในการดักจับอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดซึ่งมีการจ่ายที่สองระดับความสูงคือระดับเหนือวงแหวนวอร์เทค (recirculating ring) ที่ระดับ 1490 mm ซึ่งถูกจ่ายในลักษณะสัผัสกับผ่นังเตาเผาไหม้จำนวน 2 ท่อ และระดับใต้วงแหวนวอร์เทคซึ่งยังแบ่งออกเป็นอากาศส่วนที่สองใต้วงแหวนอันดับที่ 1 และ 2 โดยอากาศส่วนที่สองใต้วงแหวนวอร์เทคอันดับที่ 1 จ่ายในลักษณะทำมุมกับเส้นสัมผัสผ่นังเตาที่ 65 องศา จำนวน 4 ท่อ (ระดับ 1030 mm) ซึ่งจะทำให้เกิดวงแหวนอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm ส่วนอากาศส่วนที่สองใต้วงแหวนวอร์เทคอันดับที่ 2 จะจ่ายที่ระดับ 1290 mm ในลักษณะสัผัสกับผ่นังเตาเผาไหม้ และ 3) อากาศส่วนที่สามเป็นอากาศซึ่งจ่ายเพื่อใช้เผาไหม้และป้องกันการรุกรานของไฟที่จะเข้าไปยังถังพักบ่อนแกลบ

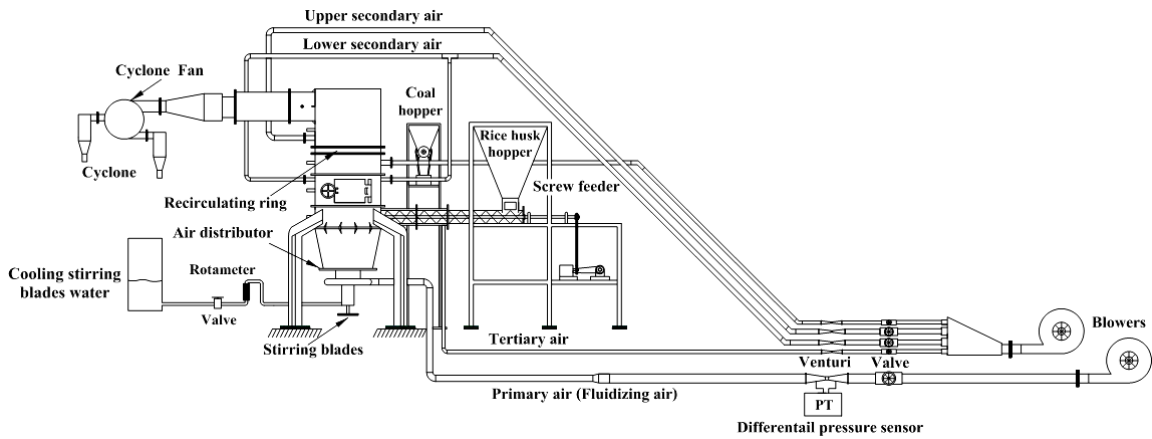
นอกจากนี้ ภายในเบดยังติดตั้งใบกวนเพื่อทำลายการเกาะตัวกันของอนุภาคเชื้อเพลิง ที่อาจเกิดขึ้น ในการบ่อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาไหม้จะใช้ระบบสกรูบ่อน (Screw feeder) และควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ ซึ่ง จะแยกการบ่อนแกลบและถ่านหินบิทูมินัสออกจากกัน โดยแกลบจะใช้สกรูบ่อนเข้าไปในเบดที่ระดับความสูง 650 mm ส่วนถ่านหินบิทูมินัส

จะถูกสกรูลำเลียงไปให้ตกลงในท่ออากาศส่วนที่สองใต้  
วงแหวนอันดับที่ 2 แล้วใช้อากาศพาเข้าสู่เตาเผาใหม่

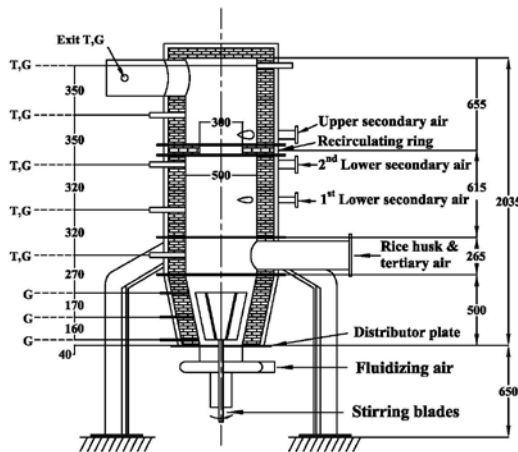
### 2.3. การวัดและขั้นตอนการทดลอง

การ วัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการ ทดลอง ของ  
งานวิจัยนี้ ได้ใช้ เวนจิวรี ที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับ  
เซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่ง มีความคลาดเคลื่อน  
 $\pm 3\%$  ของย่านการวัด เป็นอุปกรณ์ในการวัดอัตราการ  
ไหลของอากาศ การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิง  
แกลบและถ่านหินบิทูมินัสนั้น จะใช้ อินเวอร์เตอร์  
ควบคุม ความเร็วรอบมอเตอร์ ที่ใช้ ขับสกรูป้อน  
เชื้อเพลิงทั้งสองชนิด ส่วนการวัดอุณหภูมิในการ

ทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์  
แสดงผล ซึ่งมีความละเอียด  $\pm 1^\circ\text{C}$  สำหรับการวัด  
องค์ประกอบ แก๊สเผาไหม้ ที่ระดับต่าง ๆ นั้นได้ ใช้  
เครื่องวิเคราะห์แก๊สเสีย Testo 350 XL ซึ่งสามารถวัด  
แก๊ส  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , และ  $\text{SO}_2$  ส่วน  $\text{CO}_2$  ที่แสดงนั้น  
ได้มาจากการคำนวณย้อนกลับจากปริมาณ  $\text{O}_2$  ของ  
เครื่องวัด ส่วน ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตานั้น  
หาได้จากการวิเคราะห์ ปริมาณคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้  
ภายในถ้ำที่ตกได้จากไซโคลนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์  
องค์ประกอบธาตุ LECO CHNS 932 ร่วมกับปริมาณ  
CO ที่วัดได้



รูปที่ 2 ไตอะแกรมเตาเผาไหม้ฟลูอิด์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้นที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3 ขนาดเตาและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและแก๊สไอเสียของเตาเผาไหม้ฟลูอิด์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้น

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการปรับปริมาณอากาศ  
ส่วนต่าง ๆ ดังตาราง จากนั้นทำการจุดเตาเผาไหม้  
โดยจะเริ่มใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่ออุ่นให้เตาอุณหภูมิ  
สูงขึ้นประมาณ  $700-800^\circ\text{C}$  แล้วจึงเริ่มป้อนถ่านหิน

บิทูมินัสเข้าสู่เตาเผาไหม้ซึ่งทำการปรับ อัตราการป้อน  
เชื้อเพลิงทั้งสองด้วยอินเวอร์เตอร์ให้ได้อัตราการป้อน  
เชื้อเพลิงตามเงื่อนไข เมื่อสภาวะการทำงานของ  
เตาเผาไหม้ เข้าสู่สภาวะคงตัว ( Steady) ซึ่งใช้เวลา

ประมาณ 60-90 นาทีแล้วจึง เริ่มบันทึก ค่าต่าง ๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของ แก๊สเผาไหม้ ที่ท่อทางออกเตา (ดังรูปที่ 3) ปริมาณแก๊สที่ดักได้จากไซโคลน (เก็บทุก 30 นาที เป็นเวลา 10 นาที) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ โดยข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $E_c$ ) ได้ตามสมการที่ (1) [3, 10-11]

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

โดย

$E_F$  = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้ (MJ/kg)

$E_a$  = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในเตา (MJ/kg)

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

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลองผลกระทบของ EA

Run number	Testing conditions	
	Pure rice husk firing	Rice husk/coal co-firing
1	EA (%)	80
	Feed (kg/h)	64.5
2	EA (%)	100
	Feed (kg/h)	58
3	EA (%)	130
	Feed (kg/h)	50.5
4	EA (%)	150
	Feed (kg/h)	46.5
5	EA (%)	200
	Feed (kg/h)	39

EA = ปริมาณอากาศส่วนเกิน, Feed = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง

#### 2.4. เงื่อนไขการทดลอง

การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินในการทดลองทั้งสองกรณีจะทำโดยการลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เข้าสู่เตาและคงปริมาณอากาศสุทธิไว้เท่า

เดิมในทุกเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งความเร็วลมที่ใช้ของอากาศส่วนหนึ่ง อากาศส่วนที่สองเหนือวงแหวนวอร์เทค และใต้วงแหวนวอร์เทคอันดับที่ 1, 2 และอากาศส่วนที่สามดังนี้ คือ 0.4, 15, 19, 25 และ 4.64 m/s ตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนของอากาศแต่ละส่วนเท่ากับ 0.25, 0.07, 0.40, 0.13 และ 0.15 ตามลำดับ สำหรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศส่วนเกินของแต่ละเงื่อนไขถูกแสดงดังตารางที่ 2

#### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการศึกษาผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้แกลบและการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหินที่มีต่อสมรรถนะของการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบห้องเผาไหม้สั้น ซึ่งได้พิจารณาสมรรถนะของการเผาไหม้จากประสิทธิภาพการเผาไหม้และองค์ประกอบแก๊สไอเสียเป็นสำคัญ โดยผลการทดลองทั่วไปพบว่า การเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง (8-10 ชั่วโมง) โดยไม่ต้องผสมวัสดุเฉื่อยลงในเบดและไม่เกิดปัญหาการเกาะตัวของอนุภาคบนแผ่นกระจายอากาศ ส่วนผลการทดลองอื่นๆ ได้แสดงดังหัวข้อต่อไป

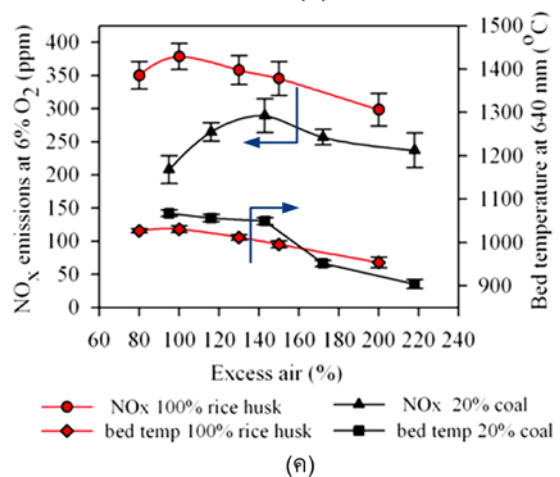
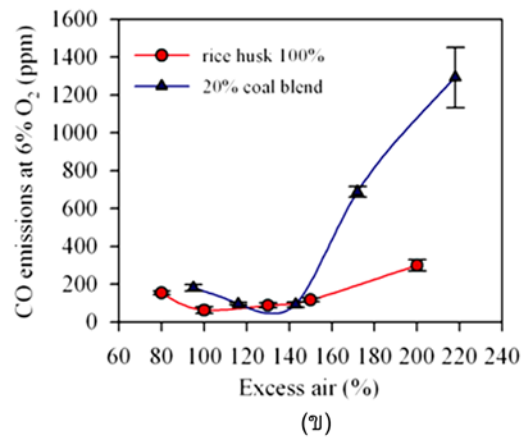
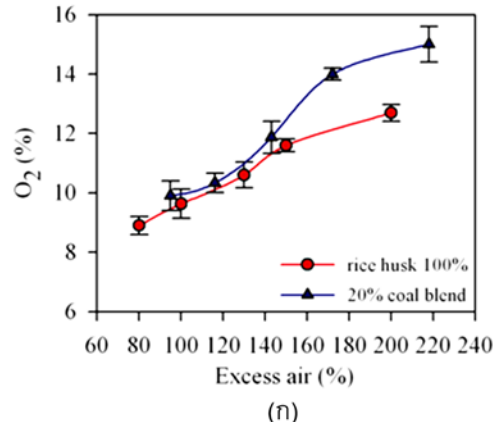
##### 3.1 องค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ทางออก

องค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้แกลบอย่างเดียวและการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหิน บิทูมินัสในสัดส่วน 80:20 (โดยความร้อน) ภายใต้ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ในช่วง 80-220% ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจน ( $O_2$ ) ในแก๊สไอเสียตามปริมาณอากาศส่วนเกินดังแสดงรูปที่ 4(ก) พบว่าการเพิ่ม EA ส่งผลให้ปริมาณ  $O_2$  ในแก๊สไอเสียเพิ่มสูงขึ้นในทั้งสองกรณี ซึ่งมีค่าในช่วง 9-12% สำหรับการเผาไหม้แกลบเพียงลำพัง ในขณะที่กรณีการเผาไหม้ร่วมนั้นมีค่าในช่วง 10-15% โดยการเพิ่มขึ้นของ  $O_2$  ในแก๊สไอเสียนั้นเป็นไปตามการคาดหมาย เนื่องจากการเพิ่ม EA เข้าไปเผาไหม้จะเป็นการเพิ่มโอกาสการสัมผัสกันของเชื้อเพลิงและอากาศนั้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณ  $O_2$  ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา

มากเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้ ในช่วง EA 80-150% นั้นพบว่า  $O_2$  ที่ทางออกของทั้งสองกรณีมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงความสมบูรณ์ในการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามในรูปที่ 4(ก) ยังพบอีกว่าเมื่อเพิ่ม EA ในช่วง 172-220% จะมีความแตกต่างของปริมาณ  $O_2$  ในแก๊สไอเสียของทั้งสองกรณีอย่างเห็นได้ชัด โดย  $O_2$  ในกรณีของการเผาไหม้ร่วมจะมีค่าสูงกว่าการใช้แกลบเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจาก การลดลงอย่างมากของอุณหภูมิเบด (จาก 1050 เหลือ 900°C) ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ช้าลง และทำให้ปริมาณ  $O_2$  ถูกนำไปใช้เผาไหม้อนุภาคถ่าน (Char) ที่มาจากถ่านหินซึ่งมักเผาไหม้ในเบดและเผาไหม้ได้ยากกว่าสารระเหยในแกลบจึงเป็นผลให้  $O_2$  ในกรณีการเผาไหม้ร่วมมีค่าสูงกว่า ผลกระทบของการปรับเปลี่ยน EA ของการเผาไหม้แกลบ 100% และการเผาไหม้ร่วมของแกลบและถ่านหิน ที่มีต่อปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ถูกแสดงในรูปที่ 4(ข) โดยพบว่าปริมาณ CO มีค่าลดลงจาก 200 ppm เหลือ 70 ppm เมื่อเพิ่ม EA จาก 80 เป็น 100% ในกรณีการเผาไหม้แกลบลำพัง และจาก 97 เป็น 118% ในกรณีของการเผาไหม้ร่วม โดยเป็นผลมาจาก  $O_2$  ที่เพิ่มมากขึ้นตาม EA มีโอกาสเข้าไปทำปฏิกิริยากับ CO แล้วกลายเป็น  $CO_2$  ได้เพิ่มมากขึ้น แต่ทั้งนี้หากเพิ่ม EA ในช่วง 150-218% พบว่า CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 120 เป็น 220 ppm (ที่ 6%  $O_2$ ) ในกรณีของการแกลบ 100% ในขณะที่ ในกรณีของการเผาไหม้ร่วม CO เพิ่มขึ้นจากประมาณ 100 เป็น 1230 ppm (ที่ 6%  $O_2$ ) สำหรับสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของ CO คือการลดลงของอุณหภูมิเบดทั้งสองกรณี (ดูจากรูปที่ 4(ค)) ซึ่งเป็นผลให้อัตราของปฏิกิริยาการเผาไหม้ลดลง ทั้งนี้จากรูปที่ 4(ข) สามารถสังเกตเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ CO ในกรณีการเผาไหม้ร่วมมีมากกว่าอีกกรณีหนึ่ง เนื่องจากอุณหภูมิเบดในกรณีของการเผาไหม้ร่วมลดต่ำลงมากกว่า ประกอบกับกรณีเผาไหม้ร่วมซึ่งมีถ่านหินที่เผาไหม้ยากจึงส่งผลให้โอกาสที่จะเกิดการเผาไหม้ถ่านหินอย่างสมบูรณ์ลดน้อยลง นอกจากนี้ใน

กรณีการเผาไหม้ร่วมนั้น การเพิ่ม EA ตั้งแต่ 172% ขึ้นไป ส่งผลให้ปริมาณ CO สูงกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (740 ppm) [10-11]



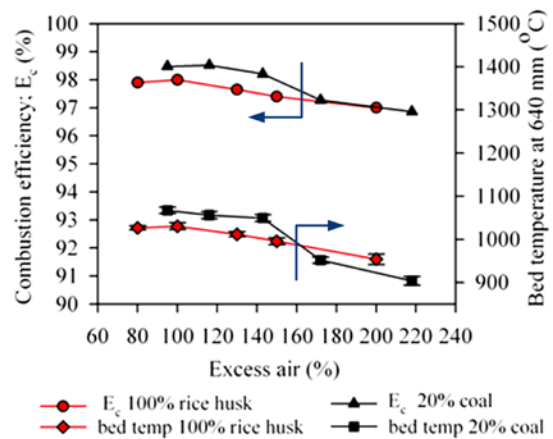
รูปที่ 4 องค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ทางออกเตา

จากรูปที่ 4(ค) แสดงความสัมพันธ์ของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) และอุณหภูมิเบดที่ระดับ 640 mm ที่เปลี่ยนแปลงตาม EA ของทั้งสองกรณี โดยพบว่า การเพิ่ม EA จาก 78 เป็น 100% ในกรณี

การเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยว และ EA ในช่วง 95-140% สำหรับการเผาไหม้ร่วม ส่งผลให้ปริมาณ  $\text{NO}_x$  (คิดที่ 6%  $\text{O}_2$ ) ในแก๊สไอเสียเพิ่มสูงขึ้นจาก 350 ไปเป็น 380 ppm และ 210 เป็น 270 ppm ตามลำดับ เนื่องจากเชื้อเพลิงมีโอกาสได้ทำปฏิกิริยากับ  $\text{O}_2$  ได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของ CO ในรูปที่ 4(ข) นอกจากนี้ในรูปที่ 4(ค) ยังพบว่าการเพิ่ม EA ในช่วง 100-200% ในกรณีแกลบเพียงลำพังและ 140-218% ในกรณีเผาไหม้ร่วม จะพบว่า  $\text{NO}_x$  ที่ได้มีแนวโน้มลดลงจาก 370 เหลือประมาณ 300 ppm (กรณีแกลบ) และในกรณีแกลบและถ่านหินจะลดจาก 270 เหลือประมาณ 230 ppm เนื่องจากอุณหภูมิเบดที่ลดต่ำลงประกอบกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณ CO ซึ่งช่วยยับยั้งกระบวนการเกิด  $\text{NO}_x$  [10-13] เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ  $\text{NO}_x$  ที่เปลี่ยนแปลงตาม EA ของทั้งสองกรณีพบว่า  $\text{NO}_x$  ของกรณีเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยวมีค่าสูงกว่าในทุกเงื่อนไข EA โดยเป็นที่น่าประหลาดใจว่าในกรณีของการเผาไหม้ร่วมนั้นเชื้อเพลิงจะมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าการเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยว ประกอบกับการเผาไหม้เกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิเบดที่สูงกว่า (ประมาณ  $40^\circ\text{C}$  โดยดูจากอุณหภูมิเบดที่ระดับความสูง 640 mm) ซึ่งน่าจะส่งผลให้ปริมาณ  $\text{NO}_x$  ที่เกิดจากการเผาไหม้มีค่าสูงกว่า แต่ผลที่ได้จากการทดลองนั้นพบว่าในกรณีของการเผาไหม้ร่วมจะส่งผลให้  $\text{NO}_x$  มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากถ่านหินมีอนุภาคคาร์บอน (char) ขณะเผาไหม้ในเตามากกว่าแกลบซึ่งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของ  $\text{NO}_x$  ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่วุ่นวายซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา [10] ไปตามสมการ ( $\text{NO}^{+\text{char}+\text{CO}} \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_2$ ) [10,13] จึงส่งผลให้ปริมาณ  $\text{NO}_x$  ในแก๊สไอเสียมีน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ปริมาณ  $\text{NO}_x$  ในกรณีของการเผาไหม้แกลบเพียงลำพังในนั้นมีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐานของประกาศกรมโรงงานและอุตสาหกรรมที่ระบุไว้ที่ไม่เกิน 215 ppm (ที่  $\text{O}_2$  6%) ในขณะที่กรณีของการเผาไหม้ร่วมนั้นมีเพียงเงื่อนไขที่ EA=95% เท่านั้นที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่ 257 ppm (ที่  $\text{O}_2$  6%) [10-11]

### 3.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิเบด

ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ที่ใช้ในการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในสัดส่วน 80:20 (โดยความร้อน) ที่มีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ( $E_c$ ) และอุณหภูมิเบดที่ระดับความสูง 640 mm เหนือแผ่นกระจายอากาศถูกแสดงดังรูปที่ 5 โดยพบว่า  $E_c$  ในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสูงกว่า 96% และการเพิ่ม EA ส่งผลให้  $E_c$  มีแนวโน้มลดลงทั้งสองกรณี โดยเฉพาะเมื่อจ่าย EA เกิน 100% ในกรณีของการเผาไหม้แกลบเพียงอย่างเดียว และมากกว่า 143% ในกรณีการเผาไหม้ร่วม โดยสาเหตุของการลดลงของ  $E_c$  คืออุณหภูมิเบดที่ระดับ 640 mm ตกลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในกรณีของการเผาไหม้ร่วมซึ่งเป็นผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ลดลง เมื่อเปรียบเทียบ  $E_c$  ของทั้งสองกรณีในช่วง EA=80-140% พบว่ากรณีการผสมถ่านหินลงไปเผาไหม้ด้วย 20% (โดยความร้อน) จะมี  $E_c$  สูงกว่าเนื่องจากอนุภาคถ่านหินซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าแกลบจะเคลื่อนที่ลงไปเผาไหม้ในเบดทำให้มีระยะเวลาในการเผาไหม้นานขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิเบดที่ระดับ 640 mm สูงกว่าและนำไปสู่  $E_c$  ที่สูงกว่า ส่วนในช่วง EA=200-220% นั้นพบว่า  $E_c$  ของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันที่ 97% ทั้งนี้  $E_c$  มีค่าสูงสุดที่ EA = 100% สำหรับการเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยวและ EA=95% ในกรณีการเผาไหม้แกลบกับถ่านหิน



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการเผาไหม้และอุณหภูมิเบดตามปริมาณอากาศส่วนเกิน

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองผลกระทบของ EA ในการเผาไหม้แกลบและการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหิน บิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิด์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้น โดยใช้ EA ในช่วง 80-200% สำหรับการเผาไหม้แกลบ และ 95-218% ในกรณีการเผาไหม้ร่วม ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การเพิ่ม EA ส่งผลให้  $O_2$  ในแก๊สไอเสียเพิ่มขึ้นโดยมีค่าในช่วง 9-12% สำหรับการเผาไหม้แกลบอย่างเดียว และ 10-15% ในกรณีการเผาไหม้ร่วม ซึ่งในกรณีของการเผาไหม้ร่วมจะมี  $O_2$  ต่ำกว่าในช่วง EA ที่ใกล้เคียงกัน

2. ปริมาณ CO (ที่ 6%  $O_2$ ) ของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเผาไหม้ด้วย EA ในช่วง 80-150% ซึ่งมีปริมาณ CO ระหว่าง 70-180 ppm โดยการเพิ่ม EA เกิน 100% ในกรณีของการเผาไหม้แกลบอย่างเดียว และ 143% ในกรณีการเผาไหม้ร่วม ส่งผลให้ CO เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ 210 ppm และ 1230 ppm ตามลำดับ ทั้งนี้การปริมาณ CO จากกรณีเผาไหม้ร่วมเมื่อ EA เกิน 172% จะมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ 740 ppm (ที่ 6%  $O_2$ )

3. การเพิ่ม EA ในช่วง 80-100% (กรณีแกลบอย่างเดียว) และ 95-143% (กรณีเผาไหม้ร่วม) ส่งผลให้  $NO_x$  เพิ่มขึ้น แต่  $NO_x$  จะลดลงเมื่อเพิ่ม EA เกินช่วงข้างต้น ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิเบดที่ลดลง นอกจากนี้  $NO_x$  ในกรณีการเผาไหม้ร่วมมีค่าต่ำกว่าการเผาไหม้แกลบอย่างเดียวในทุกเงื่อนไขการทดลอง โดย  $NO_x$  มีค่าสูงสุดที่ 380 ppm สำหรับการเผาไหม้แกลบ และ 280 ppm สำหรับการเผาไหม้ร่วม

4. การเพิ่ม EA ส่งผลให้  $E_c$  ลดต่ำลงทั้งสองกรณี ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิเบดที่ระดับ 640 mm โดยกรณีการเผาไหม้ร่วมมี  $E_c$  สูงกว่ากรณีการเผาไหม้แกลบเพียงอย่างเดียว และในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่า  $E_c$  สูงกว่า 96% ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ EA =100% (98.3%) ในกรณีของการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียว และที่ EA = 116% (98.6%) ในกรณีการเผาไหม้ร่วม

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย นอกจากนี้ยังขอขอบคุณ บมจ. ยูนิคไมน์นิ่ง เซอร์วิสเซส ที่ให้การสนับสนุนถ่านหิน บิทูมินัสตลอดการทดลองในงานวิจัยนี้

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Natarajan E, Nordin A, Rao AN. (1998) Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors, *Biomass Bioenergy*,14, pp. 533-546.
- [2] Werther J, Saenger M, Hartge EU, Ogada T, Siagi Z. (2000) Combustion of agricultural residues. *Prog Energy Combust Sci*, 26, pp. 1-27.
- [3] 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.
- [4] Fang M, Yang L, Chen G, Shi Z, Luo Z, Cen K. (2004) Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed, *Fuel Process Technol*, 85, pp. 1273-1282.
- [5] Sun Z, Jin B, Zhang M, Liu R, Zhang Y, Experimental studies on cotton stalk combustion in a fluidized bed, *Energy*, 33, pp. 1224-1232.
- [6] Ghani WAWAK, Alias AB, Savory RM, Cliffe KR. (2009) Co-combustion of agricultural residues with coal in a fluidized bed combustor, *Waste Management*, 29, pp.767-773.
- [7] Armesto L, Bahillo A, Cabanillas A, Veijonen K, Otero J, Plumed A, Salvador L. (2003) Co-combustion of coal and olive oil industry residues in fluidised bed. *Fuel*, 82, pp. 993-1000.



- [8] 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.
- [9] Lin W, Dam-Johansen K, Agglomeration in fluidized bed combustion of biomass-mechanism and co-firing with coal, *Proc of the 15<sup>th</sup> Int. Conference on fluidized bed combustion*, May 16 - 19, 1999, Savannah, Georgia.
- [10] Sathitruangsak S, Madhiyanon M, Soponronnarit S (2009), Rice husk co-firing with coal in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC), *Fuel*, 88, pp.1394-1402
- [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.
- [13] Zevenhoven R, Kilpinen P. (2002) Control of pollutants in flue gases and fuel gases. 2nd ed. Finland: Espoo/Turku.