

**ผลกระทบของอุณหภูมิเบดที่มีต่อสมรรถนะการเผาไหม้แกลบและการเผาไหม้
แกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดิซ์เบด**
**Effect of Bed Temperature on Combustion Performances of Rice Husk Combustion
and Rice Husk/Coal Co-combustion in a Vortex Fluidized Bed Combustor**

ปราสาน สถิตย์เรืองศักดิ์* ฐานิตย์ เมธิยานนท์² และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 51 เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

³ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10400

*ผู้ติดต่อ: prasan_mut@yahoo.com, เบอร์โทรศัพท์: (662) 9883655 ext. 3107

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลกระทบของอุณหภูมิเบดที่มีผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วอร์เทค - ฟลูอิดิซ์เบดที่ใช้เผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยวและเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัส 25% (ฐานพลังงาน) ร่วมกับแกลบ โดยสมรรถนะเตาที่พิจารณาคือปริมาณแก๊สมลพิษที่ทางออกเตาและประสิทธิภาพการเผาไหม้ (E_c) การทดลองจะควบคุมอุณหภูมิเบดที่ระดับ 0.43 m เหนือแผ่นกระจายอากาศไว้ที่ 800, 850 และ 900°C ในการเผาไหม้ โดยจะคงปริมาณอากาศส่วนเกินไว้ที่ประมาณ 88% ในทุกเงื่อนไขการทดลอง ผลการทดลองพบว่า CO มีค่าลดลง โดยมีค่าในช่วง 115-225 ppm (ที่ 6% O_2) ในขณะที่ NO_x และ SO_2 (ที่ 6% O_2) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเบด โดยมีค่าระหว่าง 150-350 ppm และ 23-40 ppm ตามลำดับ ส่วน E_c จากการทดลองทั้งสองกรณีพบว่าส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 99% นอกจากนี้ จากผลศึกษาสรุปได้ว่าอุณหภูมิเบดที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยวคือ 800°C และ 850°C สำหรับการเผาไหม้ร่วม

คำหลัก: การเผาไหม้ร่วม/ ถ่านหิน/ ฟลูอิดิซ์เบด/ วอร์เทค

Abstract

This paper presents the effect of bed temperature affecting on the combustion performances of the vortex-fluidized bed combustor (VFBC) firing pure rice-husk, and co-firing rice-husk with 25% bituminous coal blend (energy basis). Gas emissions and combustion efficiency (E_c) were considered as the indicator of the combustion performance. For both cases, the experiments were performed under the bed temperatures (0.43 m above the distributor plate) of 800, 850, and 900°C. The excess air was also fixed at 88% for all conditions. The results showed that CO decreased with increased bed temperatures, ranging 115-225 ppm (at 6% O_2), while NO_x and SO_2 emissions increased with bed temperatures, ranging 150-350 ppm and 23-40 ppm respectively. E_c values were mostly >99% for both cases. Moreover, the results recommended that the appropriate bed temperatures for rice-husk firing and co-firing were 800°C and 850°C respectively.

Keywords: coal/ co-firing/ fluidized bed/ vortex

1. บทนำ

ปัจจุบันวิกฤตการณ์ด้านราคาพลังงานน้ำมันที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องควบคู่กับการตื่นตัวในเรื่องสถานะโลกร้อน ส่งผลให้นานาประเทศได้กำหนดนโยบายที่จะส่งเสริมให้มีการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น โดยประเทศไทยก็ได้มีการกำหนดนโยบายให้มีเพิ่มสัดส่วนพลังงานทดแทนจากร้อยละ 0.5 ของพลังงานเชิงพาณิชย์ให้เป็นร้อยละ 8% ในปี 2554 [1] ทำให้ระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการใช้ชีวมวลจำพวก แกลบ ขี้เลื่อย และชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ ชีวมวลดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เผาไหม้ตรงในเตาเผาไหม้ชนิดต่าง ๆ อาทิเช่น เตาตะกรับ เตาไซโคลน หรือเตาเผาแบบฟลูอิดไธด์เบด เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาเผาไหม้แต่ละชนิดข้างต้นพบว่าเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธด์เบดเป็นเตาเผาที่มีประสิทธิภาพสูง [2-3] และกำลังเป็นที่นิยมอยู่ในปัจจุบัน โดยเชื้อเพลิงที่มักถูกนำไปเผาไหม้ได้แก่ แกลบ [4-7] ชานอ้อย [8] และเชื้อเพลิงร่วม [9-12] เป็นต้น นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเตาเผาแกลบที่มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงกว่า 99% ซึ่งมีชื่อว่า “เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธด์เบด” [7] ตลอดจนได้ทำการศึกษาเบื้องต้นของการเผาไหม้ร่วม (Co-combustion) ซึ่งเป็นเทคนิคการเผาไหม้ที่จะได้รับความนิยมในอนาคตเพราะสามารถเสริมเสถียรภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ปริมาณจำกัดตามช่วงฤดูกาลได้ โดยได้ทำการศึกษาร่วมระหว่างแกลบและถ่านหินบิทูมินัส (เนื่องจากถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณมากและเสถียรภาพในการใช้งานค่อนข้างสูง) โดยเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดได้ถูกแยกการจ่ายออกจากกัน ซึ่งผลการทดลองพบว่าเชื้อเพลิงทั้งสองนั้นสามารถเผาไหม้ร่วมกันได้อย่างดีและมีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า 97% [13] อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิเบดเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อสมรรถนะของการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้ทุกชนิด ดังนั้นงานวิจัย จึงได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเบดที่ใช้ในการเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยวและการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัส ในสัดส่วน 75:25

(ฐานพลังงาน) โดยการทดลองจะคง ปริมาณ อากาศส่วนเกิน (Excess air) ที่ 88%

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเบดที่มีต่อการเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยวและการเผาไหม้ร่วมของแกลบและถ่านหินนั้นจะใช้เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบในหัวข้อ 2.1 และใช้วิธีการทดลองตามหัวข้อที่ 2.3

2.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือแกลบและถ่านหินบิทูมินัสซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงในตารางที่ 1 ส่วนขนาดของถ่านหินบิทูมินัสที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเฉลี่ยในช่วง 0.5-1.2 mm ซึ่งเหมาะกับการลำเลียงเข้าสู่เตาเผาไหม้ด้วยลม (Pneumatic Feeding)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง (as received)

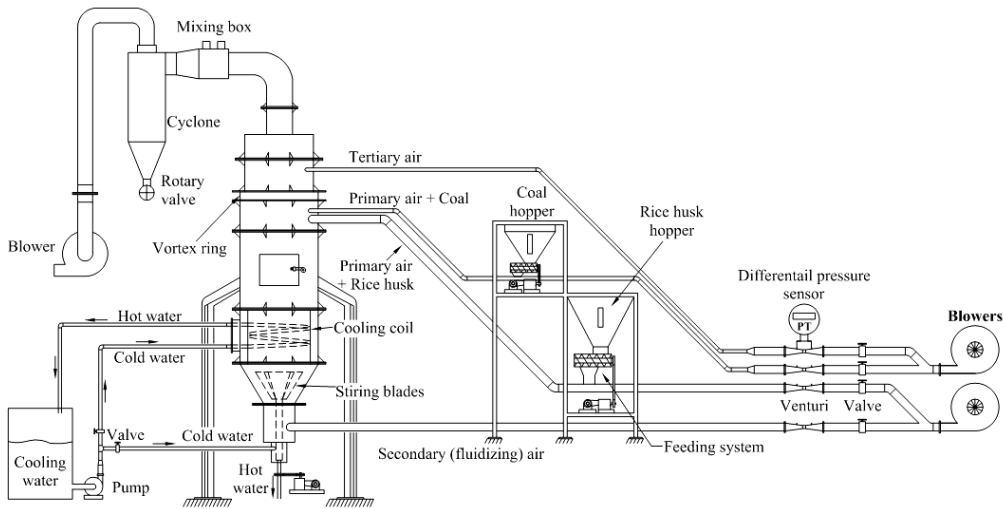
	Bituminous coal	Rice Husk
Proximate analysis (wt.%)		
Fixed carbon	38.92	20.1
Volatile matter	32.2	55.6
Moisture	24.69	10.3
Ash	4.19	14.0
Ultimate analysis (wt.%)		
Carbon	57.15	38.0
Hydrogen	3.29	4.55
Oxygen	14.18	32.4
Nitrogen	1.2	0.69
Sulphur	1.28	0.06
Moisture	17.49	10.3
Ash	5.41	14.0
Colorific value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

2.2 เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธด์เบด (VFBC)

รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธด์เบด (VFBC) โดยเตาเผาไหม้ VFBC ที่ใช้ในการทดลองนั้นถูกออกแบบโดยรวมเอาลักษณะเด่นของเตาเผาแบบไซโคลนคือการเผาไหม้

แบบหมุนวนหรือวอร์เทคและการเผาไหม้ขณะแขวนลอยในกระแสอากาศของเตาเผาแบบฟลูอิดไรซ์เบดเข้าด้วยกันจึงทำให้เตาเผาตัวนี้มีประสิทธิภาพสูงขนาดของเตา VFBC คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาเท่ากับ 40 cm และสูง 165 cm โดยลักษณะของเตาเผาไหม้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2 คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นรูปร่างทรงกระบอกสูง 140 cm และส่วนที่สองคือเป็นทรงกรวยหงายตัดยอดสูง 25 cm โดยที่ห้องเผาไหม้ทรงกระบอกจะมีการติดตั้งวงแหวนวอร์เทคซึ่งมีขนาดช่องเปิดของรูเท่ากับ 20 cm โดยวงแหวนวอร์เทคนี้จะช่วยในการดักอนุภาคเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดให้ตกกลับมายังเบดซึ่งจะสามารถเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้ ส่วนด้านล่างของเตาเผาที่เป็นทรงกรวยหงายนั้นจะเป็นส่วนรองรับอนุภาคเชื้อเพลิงในขณะที่เผาไหม้แบบฟลูอิดไรซ์เบด ซึ่งมีการติดตั้งแผ่นกระจายอากาศไว้ด้านล่างสุด สำหรับการจ่ายอากาศเข้าเตาเผา ไหม้จะ

แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ อากาศส่วนที่หนึ่งซึ่งถูกจ่ายในแนวสัมผัสกับผนังเตา พร้อมกับเกลบที่ตำแหน่งใต้วงแหวนวอร์เทค อากาศส่วนที่สองเป็นอากาศที่ เป่าให้เชื้อเพลิงเกิดฟลูอิดไรเซชันซึ่งถูกจ่ายเข้าบริเวณด้านล่างเตา และอากาศส่วนที่สามเป็นส่วนที่ช่วยในการเผาไหม้ซึ่งได้ทำการแบ่งจ่ายสองตำแหน่งคือเหนือและใต้วงแหวน วอร์เทค โดยอากาศส่วนที่สามใต้วงแหวนวอร์เทคจะจ่ายเข้ามาพร้อมกับถ่านหินบิทูมินัสในห้องเผาไหม้ ฟลูอิดไรซ์เบดในลักษณะสัมผัสกับผนังห้องเผาไหม้ เช่นเดียวกับอากาศส่วนที่หนึ่ง และส่วนที่สามเหนือวงแหวนวอร์เทค นอกจากนี้ ภายในเบดยังได้ติดตั้งใบกวนเพื่อป้องกันการเกาะตัวกันของอนุภาคเชื้อเพลิงขณะเผาไหม้ที่อาจเกิดขึ้น และมีการติดตั้งท่อระบายความร้อนภายในเตาเพื่อควบคุมอุณหภูมิเบดที่ระดับ 0.43 m (ดังรูปที่ 2) ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลอง



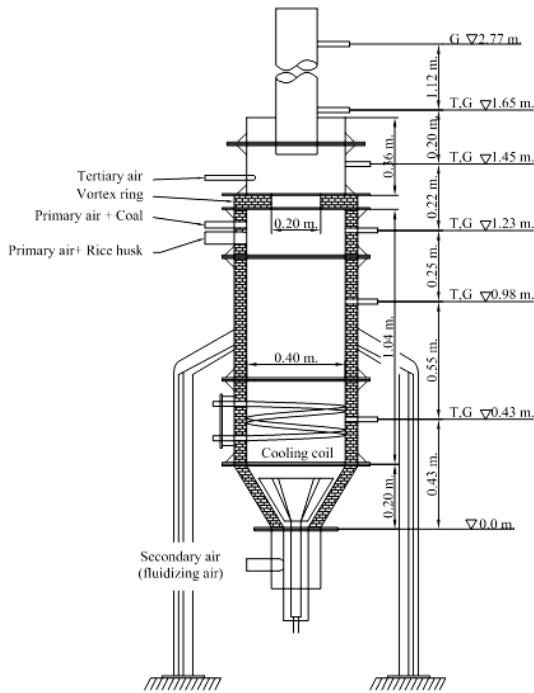
รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไรซ์เบด

2.3. การวัดและขั้นตอนการทดลอง

การวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้เวนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ ของย่านการวัด การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและถ่านหินบิทูมินัสนั้นจะใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ขับสกรูป้อนเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด ส่วนการวัดอุณหภูมิในการ

ทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลซึ่งมีความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการวัดจำนวน 5 ตำแหน่งคือ 0.43, 0.98, 1.23, 1.45 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ และที่ท่อทางออกเตาเผาไหม้ (ระดับ 1.65 m) ดังรูปที่ 2 สำหรับการวัดองค์ประกอบแก๊สเผาไหม้ที่ระดับต่าง ๆ นั้นได้ใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สเสีย Testo 350 XL ซึ่งสามารถวัดแก๊ส O_2 , CO , NO_x , และ SO_2 ส่วน CO_2 ที่แสดงนั้น

ได้มาจากการคำนวณย้อนกลับจากปริมาณ O_2 ของเครื่องวัด สำหรับประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้หาได้จากวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ภายในเตาที่ติดได้จากไซโคลนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ LECO CHNS 932 ร่วมกับปริมาณ CO ที่วัดได้



รูปที่ 2 ขนาดและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและแก๊สเสียในการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการปรับ ความเร็วลมที่ใช้ของอากาศส่วนหนึ่งที่จ่ายแกลบและถ่านหิน อากาศส่วนที่สองและอากาศส่วนที่สามดังนี้ คือ 15.5, 22, 1.35, 11.26 m/s ตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนของอากาศแต่ละส่วนเท่ากับ 0.53, 0.20, 0.17, 0.10 ตามลำดับ จากนั้นทำการจุดเตาเผาไหม้ โดยจะเริ่มใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่ออุ่นให้เตาอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ $700-800^{\circ}C$ แล้วจึงเริ่มป้อนถ่านหินบิโทมินัสเข้าสู่เตาเผาไหม้ โดย ทำการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงทั้งสอง ชนิดด้วยอินเวอร์เตอร์ให้ได้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 88% (30 kg/h สำหรับแกลบอย่างเดียว และ 27.12 kg/h ในกรณีการเผาไหม้ร่วม) จากนั้นจึงทำการปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่จ่ายเข้าไประบายความร้อนที่ชุดระบายความร้อน

เพื่อควบคุมอุณหภูมิเบดที่ระดับ 0.43 m เพื่อให้ได้เงื่อนไขการทดลอง เมื่อสภาวะการทำงานของเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60-90 นาทีแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าต่าง ๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาที่ระดับต่าง ๆ (ดังรูปที่ 2) ปริมาณแก๊สที่ติดได้จากไซโคลน (เก็บทุก 30 นาที เป็นเวลา 15 นาที) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ โดยข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ (E_c) ได้ตามสมการที่ (1) [4-7]

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

โดย

E_F = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้ (MJ/kg)

E_a = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในเตา (MJ/kg)

E_{fg} = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในแก๊สไอเสียซึ่งคำนวณได้จาก ปริมาณ CO \times ค่าความร้อนของ CO (MJ/kg)

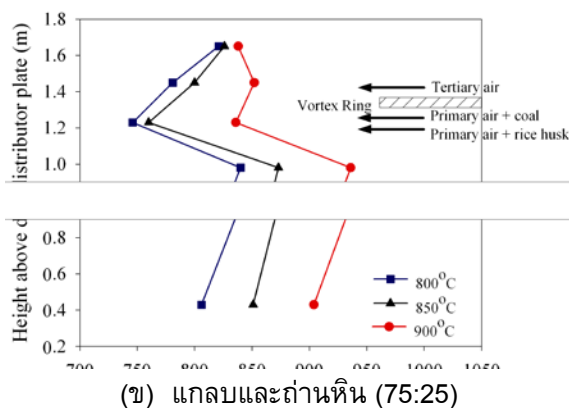
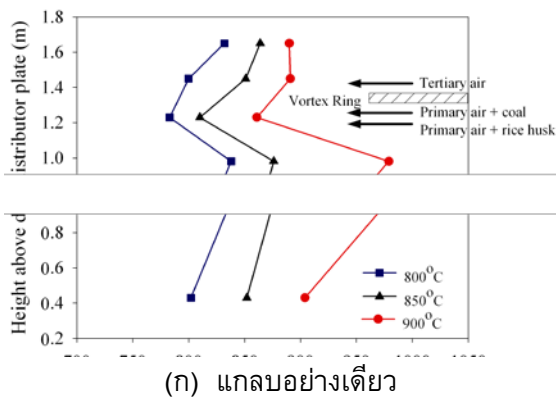
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การกระจายอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้

การกระจายอุณหภูมิในแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้ วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบดที่แต่ละระดับความสูงเหนือแผ่นกระจายอากาศภายใต้การเผาไหม้ที่อุณหภูมิเบด 800, 850 และ $900^{\circ}C$ ถูกแสดงดังรูปที่ 3

โดยแสดงว่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาของกรณีเผาไหม้แกลบอย่างเดียว (รูปที่ 3 (ก)) และกรณีเผาไหม้แกลบและถ่านหินในสัดส่วน 75:25 (รูปที่ 3 (ข)) มีลักษณะรูปแบบที่คล้ายคลึงกันและอุณหภูมิที่ระดับ 0.45 m สามารถควบคุมได้ตามเงื่อนไขด้วยการใช้ชุดท่อน้ำระบายความร้อน ทั้งนี้ จากรูปที่ 3 พบว่าอุณหภูมิที่ระดับ 0.98 m สูงกว่าที่ระดับ 0.43 m โดยมีค่าในช่วง $840-970^{\circ}C$ เนื่องจากที่ระดับ 0.43 m ความร้อนจากการเผาไหม้ถูกระบายออกโดยน้ำหล่อเย็น ประกอบกับที่ระดับความสูง 0.98 m นั้น จะเกิดการ

เผาไหม้อย่างต่อเนื่องของเชื้อเพลิงที่ถูกเป่าให้ฟุ้งกระจายทั่วทั้งเตาในระดับความสูงดังกล่าว ซึ่งแสดงถึงการคลุกเคล้าอย่างดี (well-mixed) เมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 1.23 m อุณหภูมิในทุกเงื่อนไขมีค่าลดลงในช่วง 780-860°C ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมกันของแก๊สไอเสียกับอากาศส่วนที่หนึ่งที่จ่ายแกลบและถ่านหินที่ตำแหน่งใต้วงแหวนวอร์เทค (สัดส่วนรวม = 0.73) ที่ระดับสูงกว่า 1.23 m อุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในกรณีที่เผาไหม้ภายใต้อุณหภูมิเบด 800 และ 850°C ยกเว้นกรณีอุณหภูมิเบด 900°C เนื่องจากในกรณีอุณหภูมิเบด 800 และ 850°C นั้น อาจยังมีแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หลุดลอยมากับแก๊สไอเสียมากจึงเกิดการเผาไหม้ต่อเนื่อง ส่วนกรณีอุณหภูมิเบดที่ 900°C นั้น พบว่าอุณหภูมิที่ระดับ 1.45 และ 1.65 m ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง เพราะการเผาไหม้เกิดขึ้นค่อนข้างสมบูรณ์ ซึ่งการลดลงเล็กน้อยในกรณีการเผาไหม้ร่วมที่ระดับนี้เป็นผลมาจากการสูญเสียความร้อนไปยังบรรยากาศภายนอก



รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีการเผาไหม้แกลบอย่างเดียวและการเผาไหม้ร่วมพบว่า ที่ระดับความสูงเดียวกันนั้น พบว่าอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาของกรณีเผาไหม้แกลบอย่างเดียวสูงกว่ากรณีการเผาไหม้ร่วมในทุกอุณหภูมิเบด ซึ่งเป็นผลมาจากแกลบสามารถเผาไหม้ได้ง่ายกว่าถ่านหิน จึงทำให้กรณีการเผาไหม้แกลบอย่างเดียวมีอุณหภูมิที่สูงกว่า

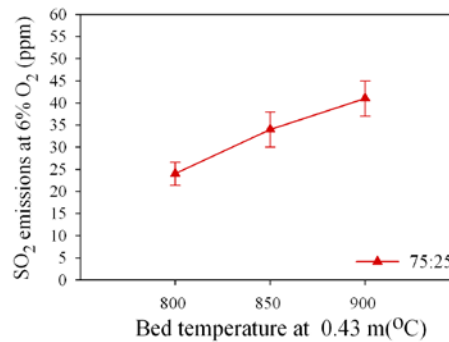
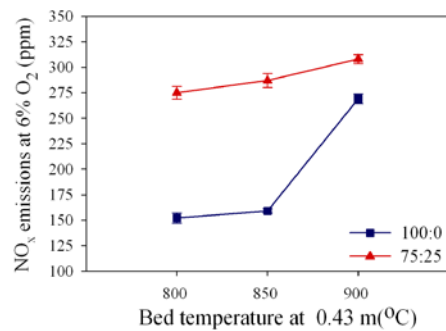
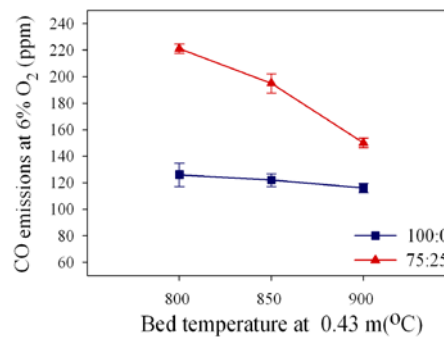
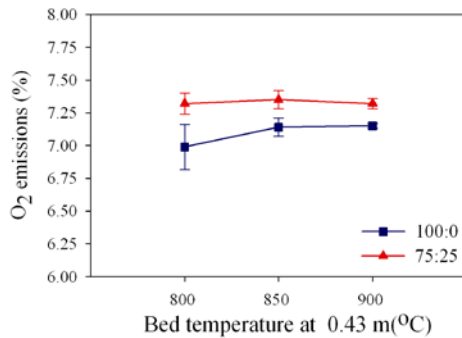
3.2 องค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ทางออกเตา

ผลกระทบของอุณหภูมิเบดในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบและเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหินสัดส่วน 75:25 (โดยพลังงาน) ที่มีต่อองค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ทางออกเตาถูกแสดงในรูปที่ 4 จากรูปที่ 4(ก) พบว่าปริมาณออกซิเจน (O_2) ที่เหลือในแก๊สไอเสียภายใต้อุณหภูมิเบดต่างๆ ของกรณีเผาไหม้แกลบอย่างเดียวมีค่าใกล้เคียงกัน (6.9-7.1%) เช่นเดียวกับกรณีการเผาไหม้ร่วม (ประมาณ 7.3%) เนื่องจากการเผาไหม้ของทั้งสองกรณีนี้เกิดขึ้นภายใต้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เท่ากันประมาณ 88% ในทุกเงื่อนไขอุณหภูมิเบด เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ O_2 ของทั้งสองกรณีภายใต้อุณหภูมิต่างๆ พบว่ากรณีการเผาไหม้ร่วมมีปริมาณ O_2 สูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากในกรณีนี้มีถ่านหินซึ่งเผาไหม้ได้ยากกว่าแกลบผสมอยู่ จึงอาจทำให้ O_2 สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้น้อยลงจึงมีปริมาณ O_2 เหลือมากกว่ากรณีการเผาไหม้แกลบอย่างเดียว

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในการเผาไหม้แกลบ และการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหิน ภายใต้อุณหภูมิเบดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเบดเผาไหม้ส่งผลให้ปริมาณ CO ลดลงทั้งสองกรณี โดยเฉพาะกรณีการเผาไหม้ร่วมซึ่ง CO ลดลงจาก 225 เหลือ 150 ppm (ที่ 6% O_2) ในขณะที่กรณีการเผาไหม้แกลบเพียงลำพัง CO มีค่าประมาณ 120 ppm (ที่ 6% O_2) โดยสาเหตุของการลดลง CO คือ อัตราการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเบดเผาไหม้ นอกจากนี้จากรูปที่ 4(ข) ยังพบอีกว่า CO ในกรณีการเผาไหม้แกลบและถ่านหินมีค่าสูงกว่าการเผาไหม้

แลกเปลี่ยนอย่างเดียวนในทุกเงื่อนไขของอุณหภูมิเบด เพราะการและการเผาไหม้ยากกว่าแลกเปลี่ยน จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาการเผาไหม้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของปริมาณ CO ของทั้งสองกรณีจะลดลงเมื่อ

เผาไหม้สถานะถ่านหินซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่า อุณหภูมิเบดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการเผาไหม้จะสูงขึ้นตามอุณหภูมิเบดเผาไหม้ [2-3] ซึ่งสามารถไปชดเชยกับการเผาไหม้สถานะถ่านหินที่ยากกว่าแลกเปลี่ยน



รูปที่ 4 องค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ภายใต้อุณหภูมิเบดต่างๆ

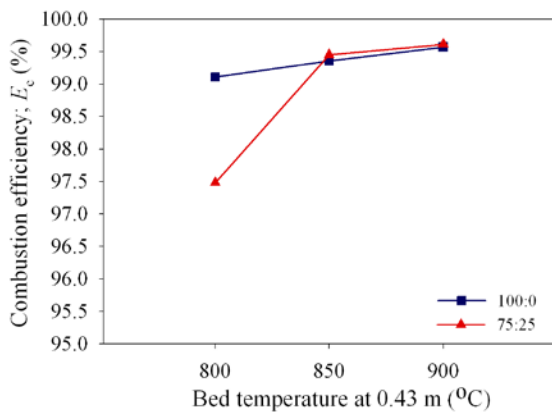
รูปที่ 4(ค) แสดงผลกระทบของอุณหภูมิเบดในการเผาไหม้ที่ระดับ 0.43 m ต่อปริมาณ NO_x ในแก๊สไอเสียของการเผาไหม้แลกเปลี่ยน 100% และการเผาไหม้ร่วมโดยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเบดที่ระดับ 0.43 m ส่งผลให้ ปริมาณ NO_x เพิ่มสูงขึ้นทั้งสองกรณีซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการทำปฏิกิริยาของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงกับ O₂ จากอากาศที่เพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิเบด โดยมีค่าระหว่าง 150-265 ppm (ที่ 6% O₂) สำหรับกรณีของแลกเปลี่ยน และ 275-305 ppm ในกรณีการเผาไหม้ร่วม นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ NO_x ของทั้งสองกรณีพบว่าในการเผาไหม้ร่วมนั้นมีปริมาณ NO_x สูงกว่าเพราะการผสมถ่านหินจะทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้ขณะจ่ายเชื้อเพลิงแลกเปลี่ยนและถ่านหินด้วยอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สามได้วงแหวนวอร์เทค ไนโตรเจนซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิงทั้งสองในรูปของสาร

ระเหย (NH₃) มาทำปฏิกิริยากับ O₂ จากอากาศสองส่วนข้างต้นแล้วกลายเป็น NO_x [14-15] ทั้งนี้ปรากฏการณ์นี้แตกต่างจากการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบห้องเผาไหม้สั้น [14] อีกทั้ง NO_x ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่างานวิจัยที่ผ่านมา [15]

การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ตามอุณหภูมิเบดเผาไหม้ที่ระดับ 0.43m ของการเผาไหม้ร่วมของแลกเปลี่ยนและถ่านหินในสัดส่วน 75:25 (โดยพลังงาน) ดังแสดงในรูปที่ 4(ง) พบว่าปริมาณ SO₂ เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเบดเผาไหม้เนื่องจากกำมะถันในเชื้อเพลิงถ่านหินทำปฏิกิริยาได้เพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเบด โดยในทุกเงื่อนไขมีปริมาณ SO₂ ในช่วง 23-40 ppm (ที่ 6% O₂) ทั้งนี้ เป็นที่น่าเสียดายว่าปริมาณ SO₂ ในกรณีของการเผาไหม้แลกเปลี่ยนเพียงอย่างเดียวมีค่าน้อยมากจึงไม่สามารถวัดค่าได้

3.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

รูปที่ 5 แสดงประสิทธิภาพการเผาไหม้ (E_c) ของการเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยวและการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหิน การให้อุณหภูมิเบตต่างๆ โดยพบว่า E_c มีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเบตที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งสองกรณี เนื่องจากอัตราการเผาไหม้ถูกเร่งให้สูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่ง E_c ที่ได้จากการทดลองส่วนใหญ่มีค่าในช่วง 99.0-99.6% อย่างไรก็ตาม จากที่ดูจากรูปที่ 5 ยังสังเกตเห็นว่า E_c ในกรณีการเผาไหม้ร่วมภายใต้อุณหภูมิเบตที่ 80°C มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 97.5% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเบตส่งผลต่อ E_c อย่างเห็นได้ชัด โดยสอดคล้องกับปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นสูงสุดดังรูป 4(ข)



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ได้จากการทดลอง

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเบตของการเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยวและการเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสซึ่งใช้ปริมาณส่วนเกินที่ 88% สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. อุณหภูมิที่ระดับ 0.98 m มีค่าสูงกว่าที่ระดับ 0.43 m ซึ่งถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ตามเงื่อนไขการทดลองแสดงให้เห็นถึงการคลุกเคล้าอย่างดีในการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้
2. ปริมาณ O_2 ในแก๊สไอเสียของกรณีเผาไหม้ร่วมมีค่าสูงกว่าการเผาไหม้แกลบเล็กน้อย เนื่องจากการเผาไหม้ของอนุภาคถ่านหินที่ยากกว่า

3. CO ลดลงตามอุณหภูมิเบตเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้น โดยกรณีของการเผาไหม้ร่วมมีค่ามากกว่าการเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยว โดยปริมาณ CO ที่ระดับความเข้มข้นของ O_2 ที่ 6% คือ ประมาณ 120 ppm สำหรับกรณีของแกลบและ 150-225 ppm ในกรณีของการเผาไหม้ร่วม

4. ปริมาณ NO_x และ SO_2 (ที่ O_2 6%) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเบตที่ใช้ในการเผาไหม้ซึ่งเป็นผลของอัตราการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มสูงขึ้น โดย NO_x มีค่าในช่วง 150-265 ppm ในกรณีของการเผาไหม้แกลบและ 275-305 ppm สำหรับการเผาไหม้ร่วม ส่วนปริมาณ SO_2 วัดได้เฉพาะกรณีของการเผาไหม้ร่วมเท่านั้น ซึ่งมีค่าระหว่าง 23 และ 40 ppm

5. ประสิทธิภาพการเผาไหม้ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 99% โดยในกรณีการเผาไหม้ร่วม ภายใต้อุณหภูมิเบต 800°C มีค่าต่ำสุดที่ 97.5%

6. เงื่อนไขอุณหภูมิเบตที่เหมาะสมในการเผาไหม้แกลบอย่างเดี่ยว คือ 800°C และ 850°C สำหรับการเผาไหม้ร่วม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย นอกจากนี้ยังขอขอบคุณ บริษัท ยูนิคไมนิ่ง เซอร์วิสเซส มหาชน จำกัด ที่ให้การสนับสนุนถ่านหินบิทูมินัสตลอดการทดลองในงานวิจัยนี้

7. 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., Piriyaungroj, N., Nathakarannakule, A., and Soponronnarit, S., 2004. Vortexing-fluidized Bed Combustor (VFBC): Part I Effects of primary Air on Performance of Combustor. Proc. of 18th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Khon Kaen, Thailand, 18th-20th October 2004, paper no. ETM14.
- [5] Madhiyanon, T., Piriyaungroj, N., Nathakarannakule, A., and Soponronnarit, S., 2004. Vortexing-Fluidized Bed Combustor (VFBC): Part II Effects of secondary Air on Performance of Combustor. Proc. of 18th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Khon Kaen, Thailand, 18th-20th October 2004, paper no. ETM15.
- [6] Madhiyanon, T., Lapirattanakun, A., and Soponronnarit, S., 2005. Vortexing-fluidized bed combustor: the performance and gas distributions within combustor. Proc. of 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Phuket, Thailand, 18th-20th October 2005, paper no. TFM065.
- [7] Madhiyanon, T., Lapirattanakun, A., Sathitruangsak, P., Soponronnarit, S., 2006 A novel cyclonic fluidized-bed combustor (Ψ -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] Gayan, P., Adanez, J., De Diego L.F., Gracia-Labiano, F., Cabanillas, A., Bahillo, A., Aho, M. and Veijonen, K. 2004. Circulating fluidised bed co-combustion of coal and biomass. *Fuel*, Vol. 83, pp. 277-286.
- [10] Amitay, A.T., Topal, H., 2004. Co-combustion of olive cake with lignite coal in circulating fluidized bed. *Fuel*, Vol. 83, pp. 859-867.
- [11] Philip, C.W., Wang, J.H. and Cheung, C.W. 2004. Effect of co-combustion of coal and rice husk on combustion performance and pollutant emissions. The seventh Asia-pacific international symposium on combustion and energy utilization. Hong Kong, Dec, 15-17.
- [12] Sami, M., Annamalai, K. and Wooldridge, M. 2001. Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Progress in energy and combustion science*, Vol. 27, pp. 171-214.
- [13] Madhiyanon, T., Lapirattanakun, A., and Soponronnarit, S., 2006. Co-combustion between rice husk and bituminous coal within a vortex-fluidized bed combustor. Proc. of 2nd Conference of energy Network of Thailand, Nakornrachasima, Thailand, 27-29th July 2006, paper no. ENETT49-101.
- [14] 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
- [15] Madhiyanon M, Sathitruangsak S, Soponronnarit S (2009), Co-combustion of rice husk with coal in a cyclonic fluidized-bed combustor (Ψ -FBC), *Fuel*, 88, pp. 132-138.