

อิทธิพลของปริมาณอากาศปฐมภูมิที่มีต่อสมรรถนะของการเผาไหม้ถ่านหิน  
ภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน  
**Influence of Primary Air Flow on Combustion Performance of Coal Firing  
within a Circulating Fluidized Bed Combustor**

ปรัชญา บุญประสิทธิ์<sup>1</sup> และฐานิตย์ เมธียานนท์<sup>2,\*</sup>

<sup>1,2</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย  
เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

\*ติดต่อ: E-mail: thanid\_m@yahoo.com, 02-9883655 ต่อ 3107

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอผลการทดลองการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยศึกษาผลกระทบของปริมาณอากาศปฐมภูมิที่มีต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ ตลอดจนสมรรถนะการเผาไหม้ในแง่ของประสิทธิภาพการแปลงสภาพคาร์บอน ( $\eta_c$ ) และแก๊สไอเสียที่ทางออก การทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราอากาศไหลเชิงปริมาตรของอากาศปฐมภูมิในช่วง 0.0211-0.0347 m<sup>3</sup>/s คิดเป็นอัตราส่วนอากาศส่วนเกินปฐมภูมิ ( $\lambda_1$ ) ในช่วง 1.10-1.77 โดยผลการวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาบ่งชี้ว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นตลอดความสูงท่อไรเซอร์ และการเพิ่มปริมาณอากาศปฐมภูมิส่งผลให้อุณหภูมิภายในท่อไรเซอร์ลดลง เมื่อพิจารณาแก๊สไอเสียพบว่า การเพิ่มปริมาณอากาศปฐมภูมิส่งผลให้ความเข้มข้น O<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> เพิ่มขึ้น ในขณะที่ CO มีแนวโน้มลดต่ำลง โดย CO และ NO<sub>x</sub> มีค่าในช่วง 74-1,516 ppm และ 59-269 ppm ที่ระดับความเข้มข้น O<sub>2</sub> 6% ตามลำดับ นอกจากนี้  $\eta_c$  มีค่าสูงที่สุด 99.57% อัตราส่วนอากาศส่วนเกินปฐมภูมิที่เหมาะสมคือ 1.69

**คำหลัก:** แก๊สพิษ; ถ่านหิน; ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน; อากาศปฐมภูมิ

**Abstract**

This paper presents the experimental results of bituminous coal combustion in a circulating fluidized bed combustor (CFB). The effect of primary air on combustion behavior and combustor performances, in terms of carbon conversion efficiency ( $\eta_c$ ) and gaseous emissions were investigated. The primary air flow rates were varied in a range of 0.0211-0.0347 m<sup>3</sup>/s corresponding to the primary excess air ratios ( $\lambda_1$ ) of 1.10-1.77. The temperature profiles along combustor heights implied that the combustion took place continuously along the riser. Increased primary air flows caused temperatures in the combustor drops. In view of gaseous pollutants, increased primary excess air ratios seemed to magnify O<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> concentrations but could reduce CO emissions. CO and NO<sub>x</sub>, corrected to 6% O<sub>2</sub>, were ranged between 74 and 1,516 ppm and 59-269 ppm respectively. Moreover, the maximum  $\eta_c$  of 99.57% was achieved. The results concluded that the optimum  $\lambda_1$  was 1.69.

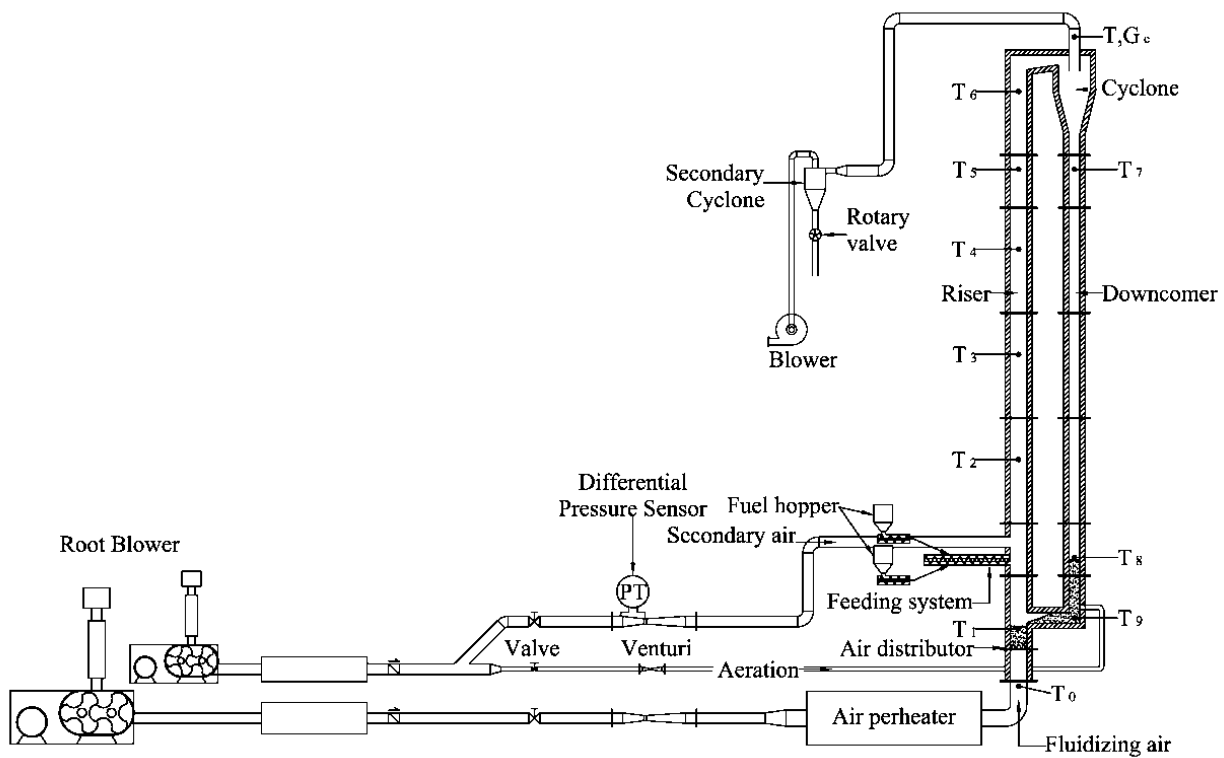
**Keywords:** Circulating fluidized bed; Coal; Emissions; Primary air

1. บทนำ

การแปลงรูปพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมีความจำเป็นต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาวะที่มีการแข่งขันสูงเช่นปัจจุบัน พลังงานปรมาณูและพลังงานความร้อนเป็นรูปแบบของพลังงานที่มีความต้องการใช้งานสูงสุดในภาคอุตสาหกรรม ถึงแม้ว่ากระบวนการผลิตความร้อนจากเชื้อเพลิงมีหลากหลายกระบวนการเช่น การเผาไหม้ตรงไพโรไลซิส และแก๊สซิฟิเคชัน แต่กระบวนการเผาไหม้ตรงยังคงได้รับความนิยมสูงสุด เนื่องจากไม่ยุ่งยากซับซ้อนและมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงสุด [1] เทคโนโลยีการเผาไหม้ที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงและปลอดภัยคือ การเผาไหม้แบบฟลูอิดไรซ์เบด [2] ซึ่งมาการใช้งานอยู่ 2 ลักษณะคือ ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed, BFB) และฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed, CFB) ทั้งนี้ CFB เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ซึ่งทำงานที่ความเร็วแก๊สภายในเตา (Superficial velocity) ที่สูงกว่า BFB ทำให้เชื้อเพลิงถูกจุดให้ลอยไปตลอดความสูงเตา และถูกดักด้วยไซโคลนให้วนกลับไปเผาไหม้ซ้ำ จึงทำให้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ BFB [3]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงการเผาไหม้ในเตา CFB โดยใช้ชีวมวลจำพวก ชี้เลื่อย และฟางข้าวสาลี [4] แกลบ [5] เปลือกฝ้าย [6] เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้งานถ่านหินชนิดต่างๆ [7-10] รวมไปถึงการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินกับชีวมวลเช่น เปลือกมะกอก [11] สลัดจ์ [12] และมูลสัตว์ปีก [3]

เมื่อพิจารณาถึงประเทศไทยนั้นพบว่างานวิจัยในด้าน CFB ยังค่อนข้างน้อย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศเป็นหลัก ในขณะที่แนวโน้มของความต้องการนำเทคโนโลยี CFB มาใช้ในอนาคตเพิ่มสูงขึ้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการศึกษารายละเอียดต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ของเตา CFB ซึ่งในช่วงเวลาที่ผ่านมามีงานวิจัยได้ทำการทดลองเผาไหม้ถ่านไม้ในเตา CFB [13] รวมถึงเริ่มศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสเพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้ขั้นต้นก่อนที่จะศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดอื่นในอนาคต [14] ส่วนในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาทดลองถึงคุณลักษณะและสมรรถนะการเผาไหม้ภายใต้การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศปรมาณูที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัส โดยไม่มีการจ่ายอากาศทุติยภูมิ



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์ของเตาเผาไหม้ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFBC)

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เตาเผาไหม้ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFBC)

เตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Combustor; CFBC) ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยท่อโรเตอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 mm สูง 6 m และท่อดาวนคัมเมอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 mm โดยท่อทั้งสองนี้ได้มีการหล่อซีเมนต์ทนไฟหนา 5 cm เพื่อลดการสูญเสียความร้อนออกสู่อากาศภายนอก ท่อโรเตอร์และท่อดาวนคัมเมอร์ถูกเชื่อมต่อกันทางด้านบนด้วยไซโคลนดักจับอนุภาคและท่อป้อนกลับเป็นแบบแอลวาล์ว (L-valve) และมีตำแหน่งท่อเติมอากาศ (Aeration tap) การจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้มีสามส่วนคือ 1) อากาศปฐมภูมิเป็นอากาศที่เป่าให้อุณหภูมิเกิดการฟลูอิดเซชันซึ่งถูกจ่ายเข้าทางด้านล่างผ่านแผ่นกระจายอากาศ (Distributor) ซึ่งเป็นแบบหัวฉีดจำนวน 6 หัว 2) อากาศทุติยภูมิซึ่งถูกจ่ายในระดับความสูงประมาณ 0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศเพื่อช่วยในการเผาไหม้สารระเหยและแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น แก๊สไฮโดรคาร์บอน(HC)และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นต้น และ 3) คืออากาศที่ท่อเติมอากาศเพื่อช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาคจากฝั่งดาวนคัมเมอร์หมุนเวียนไปยังฝั่งโรเตอร์ได้อย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อเกิดการเผาไหม้แก๊สไอเสียจะถูกดูดออกด้วยพัดลมระบาย (Induced fan) ให้ไหลผ่านไซโคลนดักเก็ลลอยซึ่งด้านล่างมีชุดโรตารีเป็นตัวป้องกันอากาศรั่วไหลเข้า นอกจากนี้ชุดทดลองยังได้ถูกติดตั้งชุดขดลวดความร้อนซึ่งใช้สำหรับอุ่นอากาศและระบบให้มีอุณหภูมิสูง สำหรับทรายซึ่งใช้เป็นอนุภาคเบดมีขนาด 300  $\mu\text{m}$  ปริมาณ 20 kg ซึ่งมีระดับความสูงของเบด หนึ่งประมาณ 50 cm

**2.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง**

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ ถ่านหินบิทูมินัสขนาดประมาณ 5 mm ซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงโดยละเอียดสามารถแสดงในตารางที่ 1

**2.3 การวัดและวิธีการทดลอง**

การวัดปริมาณอากาศแต่ละส่วนที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้เซนเซอร์ที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างกันซึ่งมีความคลาดเคลื่อน  $\pm 3\%$  ของย่านการวัด การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินจะใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ขับสกรูป้อนเชื้อเพลิง ส่วนการวัดอุณหภูมิ (T) ในการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผล

ซึ่งฝั่งท่อโรเตอร์ทำการวัดจำนวน 6 ตำแหน่งคือ 0.2, 1.7, 2.7, 3.7, 4.2, 5.2 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2 รวมถึงการวัดปริมาณแก๊สที่ดักได้จากไซโคลนเพื่อนำไปวิเคราะห์หาคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ โดยข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงสภาพคาร์บอน ได้ตามสมการที่ (1)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเชื้อเพลิงถ่านหินบิทูมินัส

Proximate analysis (wt.%)	
Fixed carbon	20.1
Volatile matter	55.6
Moisture	10.3
Ash	14.0
Ultimate analysis (wt.%)	
Carbon	57.15
Hydrogen	3.29
Oxygen	14.18
Nitrogen	1.20
Sulphur	1.28
Moisture	17.49
Ash	5.41
Higher heating value (MJ/kg)	24.78

$$\eta_c = \left[ 1 - \frac{C_{ub}}{C_{fuel}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

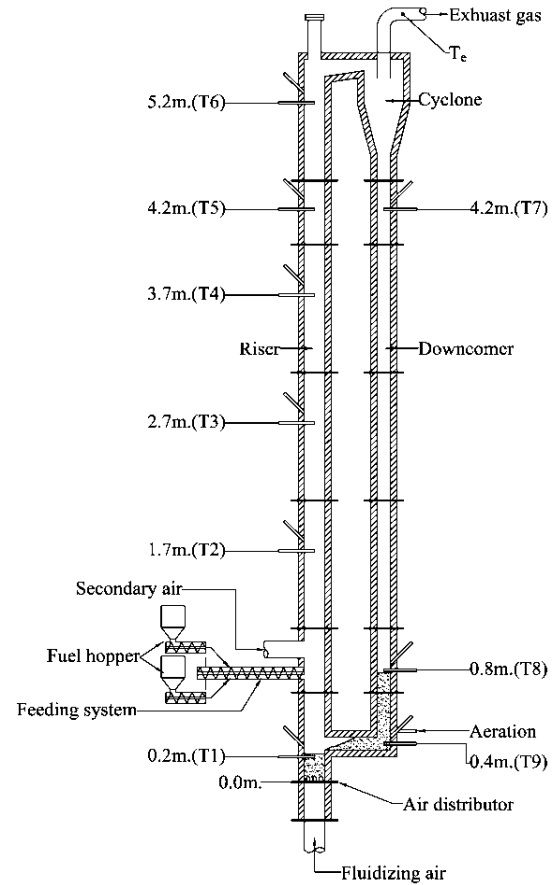
โดย

$C_{ub}$  = สัดส่วนคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ในแก๊ลลอยที่ดักได้ต่อหนึ่งกิโลกรัมเชื้อเพลิง (kg<sub>Cub</sub>/kg<sub>Fuel</sub>)

$C_{Fuel}$  = สัดส่วนคาร์บอนต่อหนึ่งกิโลกรัมเชื้อเพลิง (kg<sub>C</sub>/kg<sub>Fuel</sub>)

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากบรรจุทรายปริมาณ 20 kg เข้าสู่เตาเผาไหม้จากนั้นปรับความเร็วอากาศส่วนที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ประมาณ 5 m/s เพื่อให้ทรายเกิดการฟุ้งกระจายและหมุนเวียนภายในเตาเผาไหม้ จากนั้นทำการอุ่นระบบเตาเผาไหม้ โดยใช้ชุดขดลวดความร้อนซึ่งมีกำลังงาน 50 kW จนกระทั่งอุณหภูมิเบด (T1) สูงในช่วง 320-350°C ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง แล้วจึงเริ่มป้อนเศษถ่านหินขนาดเล็ก (< 2 mm) เป็นเชื้อเพลิงนำร่องใน

ปริมาณน้อยเข้าสู่เตาเผาไหม้เพื่อให้เกิดการลุกติดไฟเอง ซึ่งทำให้อุณหภูมิเบดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเศษถ่านหินที่บ้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ลุกไหม้ได้เองอย่างต่อเนื่องแล้ว จนถึงอุณหภูมิประมาณ 650-700°C จึงเริ่มบ้อนเชื้อเพลิง ถ่านหินขนาด 5 mm ลงไปในอัตราที่ต้องการเข้าสู่เตาเผาไหม้และปรับปริมาณอากาศส่วนต่างๆ ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 2 เมื่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 300-360 นาทีแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าของอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาที่ระดับความสูงต่างๆ จำนวน 6 ตำแหน่ง (T0-T6) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยบันทึกผลในทุกช่วงเวลา 10 นาที และในการบันทึกองค์ประกอบของแก๊สไอเสียโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสียรุ่น Testo 350 XL ซึ่งสามารถวัดแก๊ส O<sub>2</sub>, CO, และ NO<sub>x</sub>



รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน (CFBC)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

Testing conditions		Run number					
		1	2	3	4	5	6
Fluidizing air flow rate	(L/min)	1,266	1,362	1,556	1,751	1,945	2,046
	(m <sup>3</sup> /s)	0.0211	0.0227	0.0259	0.0292	0.0324	0.0341
Primary excess air ratio ( $\lambda_1$ )		1.10	1.18	1.35	1.52	1.69	1.77
Secondary air flow rate (L/min)		<b>without</b>					
L-valve (m <sup>3</sup> /s)		<b>0.001</b>					
excess air ratio ( $\lambda_{total}$ )		1.10	1.18	1.35	1.52	1.69	1.77
Superficial air velocity (m/s)*		4.68	4.80	5.48	5.62	6.37	6.73
Fuel feed rate (kg/h)		<b>11.27</b>					

\*พิจารณาจากปริมาณอากาศรวมภายใต้อุณหภูมิเบด (T1) ของแต่ละการทดลอง

3. ผลการทดลอง

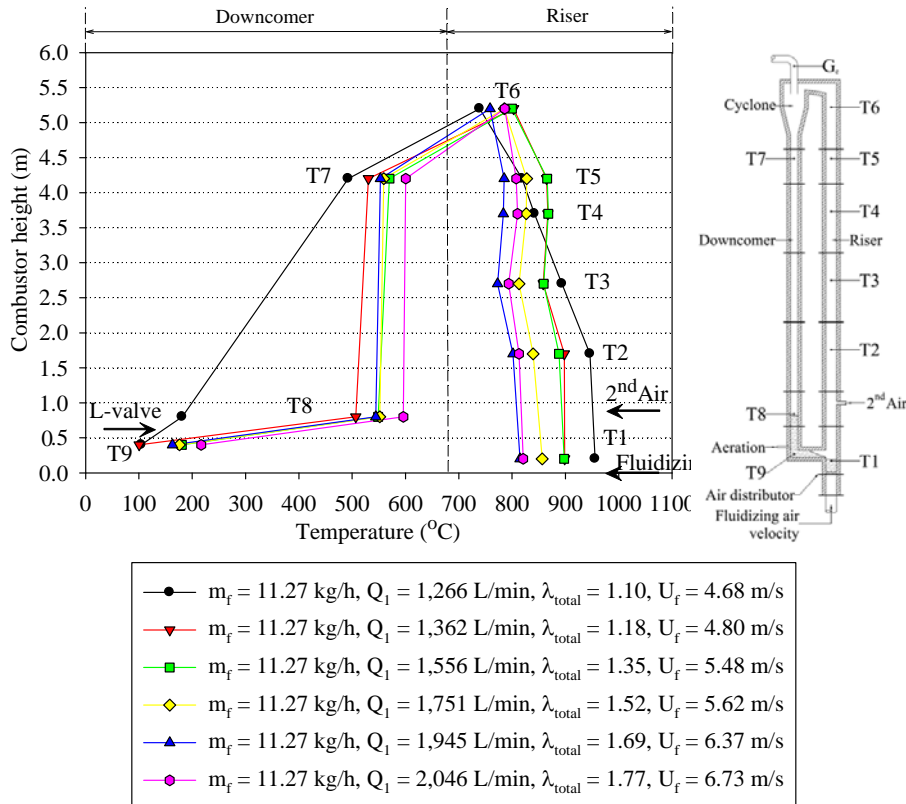
3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูง

รูปที่ 3 แสดงการกระจายอุณหภูมิแนวตั้งกลางเตาเผาไหม้ CFB ตามแนวระดับความสูงภายใต้การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศป้อนในขณะที่มีอัตราส่วนอากาศส่วนเกินป้อน ( $\lambda_1$ ) ในช่วง 1.10-1.77 พบว่าอุณหภูมิในท่อไรเซอร์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความสูงของเตาในเกือบทุกเงื่อนไข ยกเว้นในกรณีที่มีการจ่ายอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศป้อนที่ต่ำสุด ( $\lambda_1=1.10$ ) อุณหภูมิเบคเหนื่อหัวฉีดกระจายอากาศในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าในช่วง 820-955°C โดยมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณอากาศป้อนที่เพิ่มขึ้นจาก 1,266 – 2,046 L/min หรือ 0.0211-0.0341 m<sup>3</sup>/s ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนอากาศส่วนเกินป้อน ( $\lambda_1$ ) ในช่วง 1.10 – 1.77 การลดลงของอุณหภูมิเบคที่เกิดขึ้นนั้น เป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคเบคไปยังอากาศป้อนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอบ่งบอกได้ถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่าง

สม่ำเสมอตลอดความสูงของเตาเผาไหม้ ซึ่งเป็นคุณลักษณะของเผาไหม้ฟลูอิ-ไดซ์แบบหมุนเวียน

ส่วนการลดลงของอุณหภูมิตามความสูงเตาในกรณีที่มีการจ่ายปริมาณอากาศป้อนที่ต่ำนั้น เกิดจากมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ค่อนข้างน้อย ( $\lambda_{total} = \lambda_1 = 1.10$ ) ดังนั้น การเผาไหม้ส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นในบริเวณเบคหนาแน่น (เบคด้านล่าง) ทำให้เหลือปริมาณ O<sub>2</sub> ไม่เพียงพอที่จะเผาไหม้ CO ที่เกิดขึ้นและลอยสู่ด้านบนของท่อไรเซอร์ สอดคล้องกับปริมาณ CO ในแก๊สไอเสียที่ทางออกที่สูง (ดังรูปที่ 4(ก))

เมื่อพิจารณาฝั่งท่อदान์คัมเมอร์พบว่า อุณหภูมิของบริเวณด้านล่างของไซโคลนมีค่าในช่วง 492-600°C (T7) แสดงว่ามีการเวียนกลับของอนุภาคเบคและอนุภาคเชื้อเพลิงบางส่วนจากฝั่งท่อไรเซอร์มายังท่อदान์คัมเมอร์ ทั้งนี้ ที่จุดวัดอุณหภูมิ T8 พบว่าในกรณีที่จ่ายอากาศป้อนที่ต่ำ ( $\lambda_1=1.10$ ) นั้น พบว่ามีอุณหภูมิต่ำกว่าเงื่อนไขอื่นๆ ซึ่งอาจเกิดจากการเวียนกลับของอนุภาคเบคและอนุภาคเชื้อเพลิงในปริมาณที่น้อย



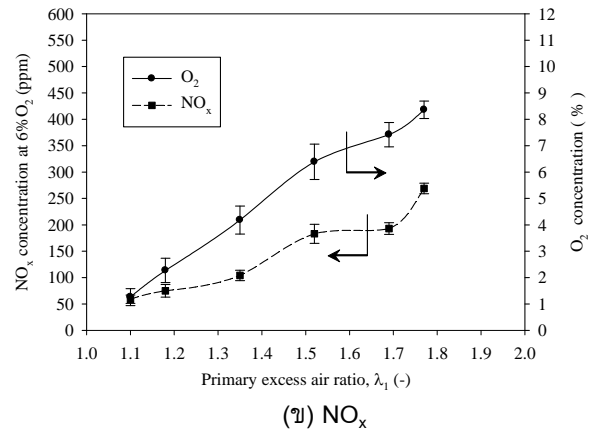
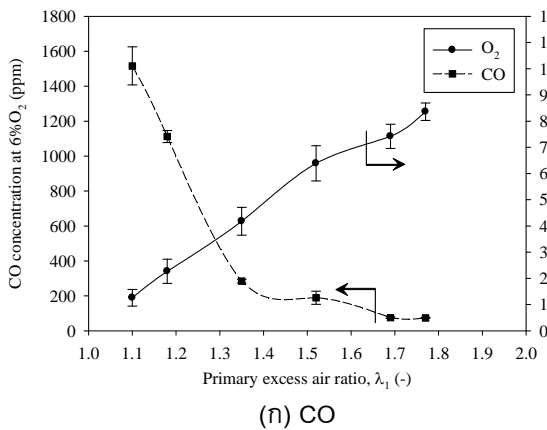
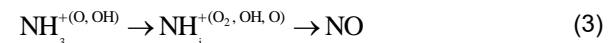
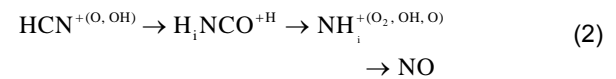
รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงของเตาเผาไหม้ภายใต้ปริมาณอากาศป้อนต่างๆ

3.2 องค์ประกอบแก๊สมลพิษที่ทางออกเตา

ผลกระทบของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศปฐมภูมิที่มีต่อการปลดปล่อยแก๊สไอเสียที่ทางออกเตาคือ CO และ NO<sub>x</sub> ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก)-(ข) โดยพบว่าการเพิ่มปริมาณอากาศปฐมภูมิซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนอากาศส่วนเกินปฐมภูมิ ( $\lambda_1$ ) ที่เพิ่มขึ้นจาก 1.10 เป็น 1.77 ส่งผลให้ความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> มีค่าเพิ่มขึ้น 1.26% เป็น 8.36% ในขณะที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าลดลงจาก 1,516 เหลือเพียง 74 ppm (ที่ 6% O<sub>2</sub>) ดังรูปที่ 4(ก) ซึ่งมีเหตุผลมาจากปัจจัยหลัก 2 ประการคือ 1) ปริมาณ O<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศ ( $\lambda_1$ ) ซึ่งจะช่วยให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์และ 2) ปริมาณอากาศที่สูงขึ้นนี้ส่งผลให้ความเร็วของการเกิดฟลูอิดไอเซชันเพิ่มสูงขึ้นซึ่งทำให้อนุภาคเบดและเชื้อเพลิงในเบดเกิดการปั่นป่วนที่รุนแรงขึ้น อันเป็นเหตุให้เกิดการคลุกเคล้า (Mixing) ซึ่งจะช่วยให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ได้ดียิ่งขึ้น โดยผลของปริมาณอากาศปฐมภูมิต่อการลดลงของ CO นอกจากนี้ยังมีประเด็นที่น่าสนใจก็คือ ในการเพิ่มปริมาณอากาศปฐมภูมินั้นจะส่งผลให้อุณหภูมิเบดลดต่ำลงด้วย แต่ก็ยังทำให้ CO ลดต่ำลง เป็นเพราะว่าอุณหภูมิเบดในการทดลองที่

ต่ำสุดยังคงมีค่าสูงกว่า 800°C ซึ่งจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันยังคงเกิดได้ดี ดังนั้น ปัจจัยของอุณหภูมิจึงมีผลน้อยกว่าความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ที่มีค่าสูง และการคลุกเคล้าที่ดีขึ้น

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกไซด์ไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ที่ปลดปล่อยตามปริมาณอากาศปฐมภูมิ ( $\lambda_1$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4(ข) ซึ่งพบว่าปริมาณ NO<sub>x</sub> ในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าความเข้มข้นในช่วง 59-269 ppm (ที่ 6%O<sub>2</sub>) และเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณอากาศปฐมภูมิ ( $\lambda_1$ ) โดยการเพิ่มปริมาณอากาศปฐมภูมินั้นส่งผลให้ความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ที่เข้ามาทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในเชื้อเพลิง (Fuel-N) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะกลายเป็น NO<sub>x</sub> ตามสมการปฏิกิริยาเนื้อเดียว (homogeneous reaction) และปฏิกิริยาเนื้อผสม (heterogeneous reaction) ของการเกิด NO<sub>x</sub> ที่ (2) - (4) [15]



รูปที่ 4 องค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ถ่านหินภายใต้การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศปฐมภูมิ

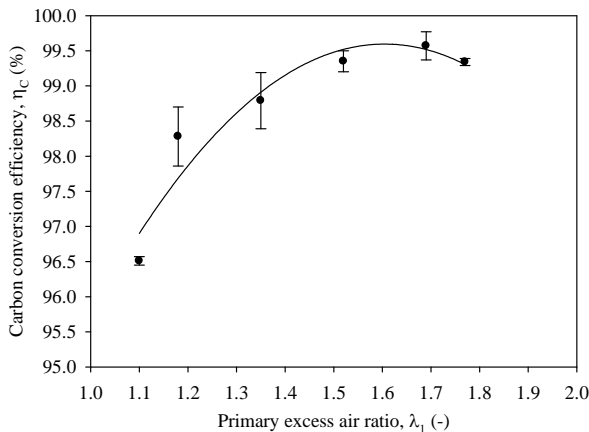
อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ NO<sub>x</sub> นั้นไม่ได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณอากาศปฐมภูมิส่งผลให้อุณหภูมิเบดต่ำลงจาก 955 เหลือ 820 °C กลับไม่ได้ส่งผลให้ความเข้มข้นของ NO<sub>x</sub> ลดลง เป็นเพราะว่าในการ

ทดลองเหล่านี้ O<sub>2</sub> ส่วนเกินมีปริมาณน้อยถึงปานกลาง คือ อยู่ระหว่าง 1.26 - 8.36% ในขณะที่อุณหภูมิเบดมีค่าค่อนข้างสูงอยู่แล้วในทุกเงื่อนไข (820 - 955°C) ดังนั้น NO<sub>x</sub> จึงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> มากกว่าอุณหภูมิเบด ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา [16]



3.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

ในแง่ของสมรรถนะของการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้ CFB ในการศึกษานี้ได้นำเสนอในเทอมของประสิทธิภาพการแปลงสภาพคาร์บอนในเชื้อเพลิง ( $\eta_c$ ) ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณอากาศปฐมภูมิถูกแสดงดังรูป 5 ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณอากาศปฐมภูมิ จากค่า  $\lambda_1=1.10$  เป็น 1.52 ส่งผลให้  $\eta_c$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 96.5 เป็น 99.57% ในขณะที่การเพิ่ม  $\lambda_1$  ไปจนกระทั่งมีค่า 1.72 นั้นมีแนวโน้มที่จะมีค่า  $\eta_c$  ลดต่ำลงเล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของ  $\eta_c$  ตาม  $\lambda_1$  ที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากปริมาณ  $O_2$  ที่เพิ่มมากขึ้น และการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงในเบดที่ดีขึ้นตามปริมาณอากาศปฐมภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง  $\lambda_1=1.10 - 1.52$  ส่วนแนวโน้มการลดลงของ  $\eta_c$  นั้นเกิดจากความเร็วอากาศปฐมภูมิที่สูงขึ้นตามปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการหลุดลอยของเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดออกนอกท่อไรเซอร์อย่างรวดเร็ว จึงทำให้มีระยะเวลาในการเผาไหม้ที่สั้นลง ควบคู่กับการลดต่ำลงของอุณหภูมิเบด ซึ่งจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่ำลง ทั้งนี้ ผลกระทบของอุณหภูมิเบด และความเร็วอากาศปฐมภูมิที่เกิดขึ้นนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [17-20]



รูปที่ 5 ผลกระทบของปริมาณอากาศปฐมภูมิต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศปฐมภูมิในการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียนซึ่งพิจารณาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นและแก๊สมลพิษที่ทางออกเตา สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การกระจายอุณหภูมิภายในเตาแบ่งชี้ว่าการเผาไหม้ถ่านหินเกิดขึ้นตลอดความสูงของท่อไรเซอร์
2. การเพิ่มปริมาณอากาศปฐมภูมิส่งผลให้อุณหภูมิเบดและอุณหภูมิภายในท่อไรเซอร์ลดต่ำลง
3. การเพิ่มปริมาณอากาศปฐมภูมิส่งผลให้ความเข้มข้นของ  $O_2$  และ  $NO_x$  เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่  $CO$  มีแนวโน้มลดต่ำลง โดยมีค่าของ  $O_2$  ในช่วง 1.26-8.36% สำหรับแก๊สมลพิษคือ  $CO$  และ  $NO_x$  ที่ระดับความเข้มข้น  $O_2$  6% มีค่า 74-1,516 ppm และ 59-269 ppm ตามลำดับ
4. การเพิ่มปริมาณอากาศปฐมภูมิ ( $\lambda_1$ ) จาก 1.10 เป็น 1.77 ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนเพิ่มขึ้นแต่จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อ  $\lambda_1$  มีค่ามากกว่านี้
5. อัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิที่เหมาะสมจากการศึกษานี้ในแง่ของ  $CO$  และ  $NO_x$  คือ 1.69

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Natarajan, E., Nordin, A., Rao, A.N. (1998). Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors, Biomass and Bioenergy, Vol. 14, PP. 533 – 546.

[2] Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., Cabanillas, A., Otero, J. (2002). Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed, Biomass and Bioenergy, Vol. 23, PP. 171 – 179.

[3] Jia, L., Anthony, E.J. (2011). Combustion of poultry-derived fuel in a coal-fired pilot-scale circulating fluidized bed combustor”, Fuel Processing Technology, Vol. 92, PP.2138-2144.

[4] M.A.Youssef, S.S. Wahid, M.A. Mohamed, A.A. Askalany (2009). “Experimental study on Egyptian biomass combustion in circulating fluidized bed”, Applied Energy, Vol. 86, PP. 2644-2650.

- [5] M. Fang, L. Yang, G. Chen, Z. Shi, Z. Lou and K. Cen (2004). "Experimental study on rice husk in combustion in a circulating fluidized bed", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 85, PP. 1273-1282.
- [6] Sun, Z-A., Jin, B-S., Zhang, M-Y., Liu, R-P. and Zhang, Y. (2008). Experimental study on cotton stalk combustion in a circulating fluidized bed", *Applied Energy*, Vol. 85, PP. 1027-1040.
- [7] Özkan, G., Dong, G. (2002). Combustion of a high ash and sulfur containing lignite in a pilot circulating fluidized bed combustor and its pollution characteristics, *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 41, PP. 11-15.
- [8] Lee, J.M., Kim, D.W., Kim, J.S. (2011). Characteristics of co-combustion of anthracite with bituminous coal in a 200-MWe circulating fluidized bed boiler, *Energy*, Vol. 36, PP. 5703-5709.
- [9] Wu, Y., Wang, C., Tan, Y., Jia, L., Anthony, E.J. (2011). Characterization of ashes from a 100 kWth pilot-scale circulating fluidized bed with oxy-fuel combustion, *Applied Energy*, Vol. 88, PP. 2940-2948.
- [10] Julien, S., Brereton, C.M.H., Lim, C.J., Grace, J.R. and Anthony, E.J. (1996). The effect of halies on emissions from circulating fluidized bed combustion of fossil fuel, *Fuel*, Vol. 75 (14), PP. 1655-1663.
- [11] Atimtay, A.T. and Topal, H. (2004) Co-combustion of olive cake with coal in a circulating fluidized bed, *Fuel*, Vol. 83, PP. 859-867.
- [12] Leckner, B., Amand, L.-E., Lucke, K. and Werther, J. (2004). Gaseous emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed, *Fuel*, Vol. 83(14), PP. 477-486.
- [13] ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์และฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2556). คุณลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัดนครนายก
- [14] ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์และฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2556). การเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 27, พัทยา จังหวัดชลบุรี
- [15] Zevenhoven R, Kilpinen P. (2002) Control of pollutants in flue gases and fuel gases. 2nd ed. Finland: Espoo/Turku.
- [16] Lyngfelt, A. and Leckner, B. (1999) Combustion of wood-chip in circulating fluidized bed boilers- NO and CO emissions as function of temperature and air staging, *Fuel*, Vol. 78, PP. 1065-1072.
- [17] Madhiyanon, T., Lapidattanakun, A., Sathitruangsak, P. and Soponronnarit, S. (2006) A novel cyclonic fluidized-bed combustor ( $\psi$ -FBC) Combustion and thermal efficiency, temperature distributions, combustion intensity, and emission of pollutants, *Combustion and Flame*, vol. 146, pp. 232-245.
- [18] Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P. and Soponronnarit, S. (2009) Co-combustion of rice husk with coal in a cyclonic fluidized-bed combustor ( $\psi$ -FBC), *Fuel*, vol. 88, pp.132-138.
- [19] Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P. and Soponronnarit, S. (2010) Combustion characteristics of rice-husk in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC), *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 347-353.
- [20] Sathitruangsak, P., Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. (2009) Rice husk co-firing with coal in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC), *Fuel*, vol. 88, pp.1394-1402.