

อิทธิพลของการจ่ายอากาศทุติยภูมิที่มีต่อสมรรถนะของการเผาไหม้ถ่านหิน
ภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไชด์แบบหมุนเวียน
Influence of Secondary Air Injection on Combustion Performance of Coal Firing
within a Circulating Fluidized Bed Combustor

ประสาน สติภัยเรืองศักดิ์^{1,*} ปรัชญา บุญประสิทธิ์² และฐานิตย์ เมธิยานนท์³

^{1, 2, 3} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย
เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

*ติดต่อ: E-mail: prasan_mut@yahoo.com, 02-9883655 ต่อ 3107

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไชด์แบบหมุนเวียน (CFB) ตลอดจนสมรรถนะการเผาไหม้ในแง่ของประสิทธิภาพการแปลงสภาพคาร์บอน (η_c) และแก๊สไอเสียที่ทางออกเตา การทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศทุติยภูมิในช่วง 0–990 L/min ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนอากาศส่วนเกินทุติยภูมิ (λ_2) ในช่วง 0–0.86 โดยผลการวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาบ่งชี้ว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นตลอดความสูงท่อโรเซอร์ และการเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิส่งผลให้อุณหภูมิภายในท่อโรเซอร์ลดต่ำลง ในแง่ของ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าในช่วง 50–1555 ppm และ 75–337 ppm (ที่ระดับ O_2 6%) ตามลำดับ นอกจากนี้ η_c มีค่าสูงสุดที่ 99.5% อัตราส่วนอากาศส่วนเกินทุติยภูมิ (λ_2) ที่เหมาะสมในการศึกษานี้คือ 0.37

คำหลัก: แก๊สมลพิษ; ถ่านหิน; ฟลูอิดไชด์แบบหมุนเวียน; อากาศทุติยภูมิ

Abstract

This paper presents the combustion characteristics of bituminous coal fired in the circulating fluidized bed combustor (CFB) as well as combustion performance in terms of carbon conversion efficiency (η_c) and gaseous emissions. The secondary air flow rates were varied in a range of 0-990 L/min corresponding to the secondary excess air ratios (λ_2) of 0-0.86. The temperature profiles inside the combustor implied that the combustion occurred continuously along the riser. Increasing secondary air flows caused a drop in temperature along the riser height. In view of gaseous pollutants, increased secondary excess air ratio could lower CO emissions, but seemed to intensify NO_x emissions. CO and NO_x , corrected to 6% O_2 , were ranged between 50–1555 ppm and 75–337 ppm respectively. Moreover, the maximum η_c of 99.5% was achieved. The experimental results concluded that the optimum λ_2 was 0.37.

Keywords: Circulating fluidized bed; Coal; Emissions; Secondary air

AEC-95

1. บทนำ

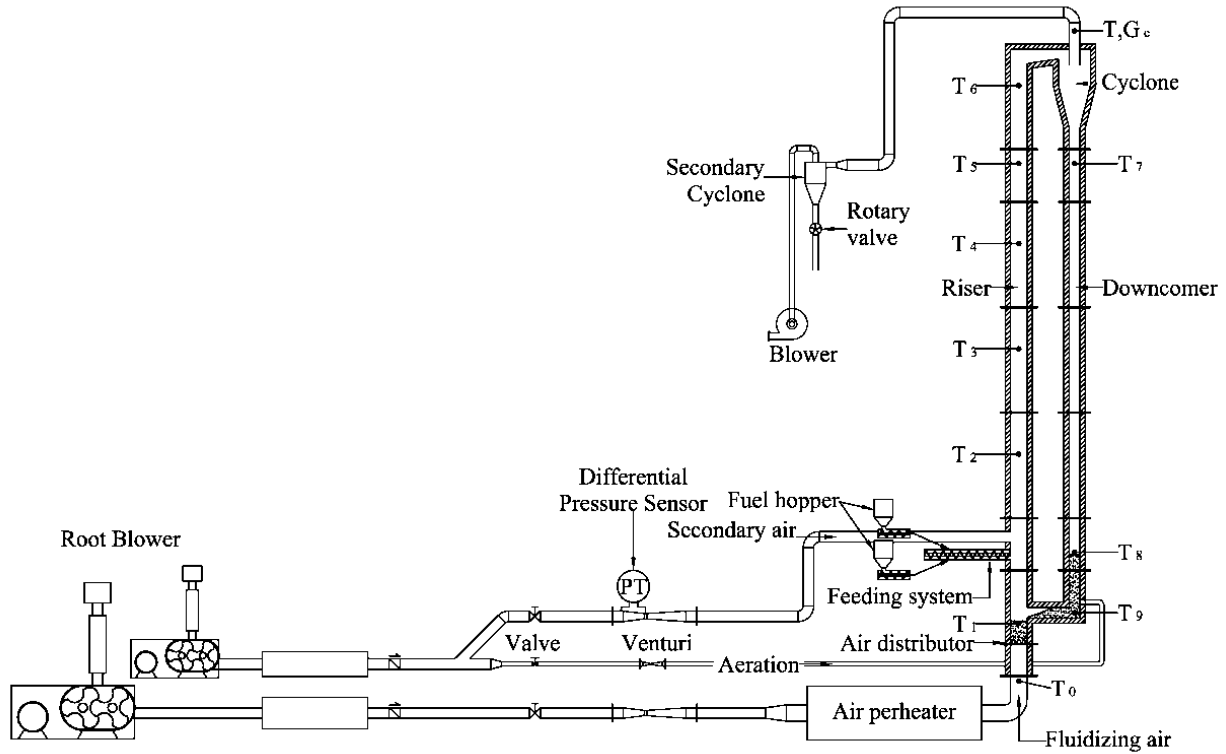
ในสภาวะการแข่งขันทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมในเวทีระดับนานาชาติที่ค่อนข้างสูงเฉกเช่นปัจจุบัน จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้และการเปลี่ยนรูปพลังงานในภาคอุตสาหกรรมให้สูงขึ้นเพื่อที่จะลดต้นทุนการผลิตซึ่งจะสามารถเพิ่มโอกาสการแข่งขันการค้าขายในตลาดโลกได้มากยิ่งขึ้น พลังงานปฏิกิริยาหรือพลังงานความร้อนเป็นรูปแบบของพลังงานที่มีความต้องการใช้งานสูงสุดในภาคอุตสาหกรรม โดยการเผาไหม้ตรงเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานในเชื้อเพลิงได้รับความนิยมสูงสุด เนื่องจากไม่ยุ่งยากซับซ้อนและมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงสุด [1] ส่วนเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบันว่ามีประสิทธิภาพสูงและปลดปล่อยมลพิษต่ำคือ การเผาไหม้แบบฟลูอิดไรซ์เบด [2] ซึ่งมีการใช้งานอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed, BFB) และฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed, CFB) ทั้งนี้ CFB เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ ซึ่งทำงานที่ความเร็วแก๊สภายในเตา (Superficial velocity) ที่สูงกว่า BFB ทำให้เชื้อเพลิงถูกจุดให้ลอยไปตลอดความสูงเตา และถูกดักด้วยไซโคลอนให้วนกลับไปเผาไหม้ซ้ำ

จึงทำให้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ BFB [3]

ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ทำการศึกษาถึงการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ ในเตา CFB เช่น ชีวมวลจำพวก ชี้อ้อย และฟางข้าวสาลี [4] แกลบ [5] เปลือกฝ้าย [6] เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้งานถ่านหินชนิดต่างๆ [7-10] รวมไปถึงการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินกับชีวมวลเช่น เปลือกมะกอก [11] สลัดจ์ [12] และมูลสัตว์ปีก [3]

เมื่อพิจารณาถึงประเทศไทยนั้นพบว่างานวิจัยในด้าน CFB ยังค่อนข้างน้อย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศเป็นหลัก ในขณะที่แนวโน้มของความต้องการนำเทคโนโลยี CFB มาใช้ในอนาคตเพิ่มสูงขึ้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการศึกษาวิจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ของเตา CFB ซึ่งในช่วงเวลาที่ผ่านมาคณะวิจัยได้ทำการทดลองเผาไหม้ถ่านไม้ในเตา CFB [13] รวมถึงเริ่มศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสเพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้ขั้นต้นก่อนที่จะศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดอื่นในอนาคต [14] ส่วนในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดูถึงคุณลักษณะและสมรรถนะการเผาไหม้ภายใต้การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศหุติยภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้

AEC-95



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์ของเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFBC)

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFBC)

เตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Combustor; CFBC) ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยท่อโรเตอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 mm สูง 6 m และท่อดาวน์คัมเมอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 mm โดยท่อทั้งสองนี้ได้มีการหล่อซีเมนต์ทนไฟหนา 5 cm เพื่อลดการสูญเสียความร้อนออกสู่อากาศภายนอก ท่อโรเตอร์และท่อดาวน์คัมเมอร์ถูกเชื่อมต่อกันทางด้านบนด้วยไซโคลนดักจับอนุภาคและท่อป้อนกลับเป็นแบบแอล-วาล์ว (L-valve) และมีตำแหน่งท่อเติมอากาศ (Aeration tap) การจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้มีสามส่วนคือ 1) อากาศปฐมภูมิเป็นอากาศที่เป่าให้อนุภาคเบดเกิดการฟลูอิดไคซ์ชันซึ่งถูกจ่ายเข้าทางด้านล่างผ่านแผ่นกระจายอากาศ (Distributor) ซึ่งเป็นแบบหัวฉีดจำนวน 6 หัว 2) อากาศทุติยภูมิซึ่งถูกจ่ายในระดับความสูงประมาณ

0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศเพื่อช่วยในการเผาไหม้สารระเหยและแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น แก๊สไฮโดรคาร์บอน(HC)และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นต้น และ 3) คืออากาศที่ท้อเติมอากาศเพื่อช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาคจากฝั่งดาวนคัมเมอร์หมุนเวียนไปยังฝั่งโรเตอร์ได้อย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อเกิดการเผาไหม้แก๊สไอเสียจะถูกดูดออกด้วยพัดลมระบาย (Induced fan) ให้ไหลผ่านไซโคลนดักเก็ลลอยซึ่งด้านล่างมีชุดโรตารีเป็นตัวป้องกันอากาศรั่วไหลเข้า นอกจากนี้ชุดทดลองยังได้ถูกติดตั้งชุดขดลวดความร้อนซึ่งใช้สำหรับอุ่นอากาศและระบบให้มีอุณหภูมิสูง สำหรับทรายซึ่งใช้เป็นอนุภาคเบดมีขนาด 300 μm ปริมาณ 20 kg ซึ่งมีระดับความสูงของเบดนิ่งประมาณ 50 cm

2.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่เลือกในงานวิจัยนี้คือ ถ่านหินบิทูมินัสขนาดประมาณ 5 mm ซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงโดยละเอียดสามารถแสดงในตารางที่ 1

2.3 การวัดและวิธีการทดลอง

AEC-95

การวัดปริมาณอากาศแต่ละส่วนที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้เวนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างกันซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ ของย่านการวัด การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงผ่านหิ้นจะใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ขับสกรูป้อนเชื้อเพลิง ส่วนการวัดอุณหภูมิ (T) ในการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเบิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผล ซึ่งฝั่งท่อโรเซอร์ทำการวัดจำนวน 6 ตำแหน่งคือ 0.2, 1.7, 2.7, 3.7, 4.2, 5.2 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2 รวมถึงการวัดปริมาณเถ้าที่ตกได้จากไซโคลน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ โดยข้อมูลที่ได้อาจจะนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงสภาพคาร์บอน ได้ตามสมการที่ (1)

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

โดย

C_{ub} = สัดส่วนคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ในเถ้าลอยที่ตกได้ต่อหนึ่งกิโลกรัมเชื้อเพลิง ($kg_{C_{ub}}/kg_{Fuel}$)

C_{fuel} = สัดส่วนคาร์บอนต่อหนึ่งกิโลกรัมเชื้อเพลิง (kg_C/kg_{Fuel})

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเชื้อเพลิงถ่านหินบิทูมินัส

Proximate analysis (wt.%)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

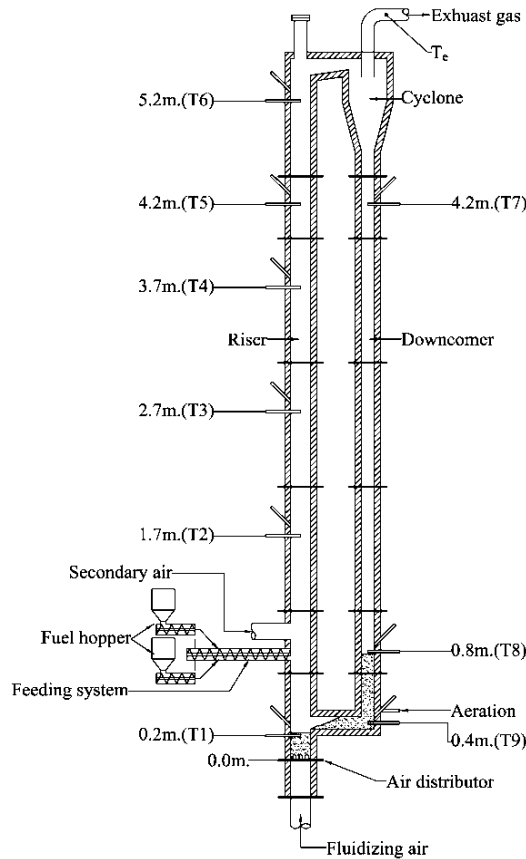
Testing conditions	Run number						
	1	2	3	4	5	6	7
Fluidizing air flow rate (L/min)	1266						
Primary excess air ratio (λ_1)	1.10						
Secondary air flow rate (L/min)	0	120	256	426	608	817	990
Secondary excess air ratio (λ_2)	0	0.10	0.22	0.37	0.53	0.71	0.86
L-valve (L/min)	60						
excess air ratio (λ_{total})	1.10	1.20	1.32	1.47	1.62	1.81	1.96
Superficial air velocity (m/s)*	4.68	4.80	5.62	6.20	6.94	7.24	7.78
Fuel feed rate (kg/hr)	11.27						

*พิจารณาจากปริมาณอากาศรวมภายใต้อุณหภูมิเบด (T1) ของแต่ละการทดลอง

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

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

AEC-95



รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของเตาเผาไหม้ฟลูอิ-ไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFBC)

ซึ่งทำให้อุณหภูมิเบดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเศษถ่านหินที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ลุกไหม้ได้เองอย่างต่อเนื่องแล้วจนถึงอุณหภูมิประมาณ $650-700^{\circ}\text{C}$ จึงเริ่มป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินขนาด 5 mm ลงไปในอัตราที่ต้องการเข้าสู่เตาเผาไหม้และปรับปริมาณอากาศส่วนต่างๆ ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 2 เมื่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 300-360 นาทีแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าของอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาที่ระดับความสูงต่างๆ จำนวน 6 ตำแหน่ง (T0-T6) ดังรูปที่ 2 โดยบันทึกผลในทุกช่วงเวลา 10 นาที และในการบันทึกองค์ประกอบของแก๊สไอเสียโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสียรุ่น Testo 350 XL ซึ่งสามารถวัดแก๊ส O_2 , CO , และ NO_x

3. ผลการทดลอง

3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูง

รูปที่ 3 แสดงการกระจายอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้ CFB ตามแนวระดับความสูงภายใต้การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศชุดิยภูมิซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวม (λ_{total}) เปลี่ยนแปลงในช่วง 1.10 – 1.96 เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิฝั่งท่อไรเซอร์ พบว่าอุณหภูมิเบดเหนือหัวฉีดกระจายอากาศมีค่าในช่วง $740-950^{\circ}\text{C}$ โดยมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอากาศชุดิยภูมิที่เพิ่มจาก 0-990 L/min หรือคิดเป็นอัตราส่วนอากาศส่วนเกินชุดิยภูมิ (λ_2) ในช่วง 0-0.86 บ่งชี้เป็นนัยว่าอากาศชุดิยภูมิที่ถูกจ่ายเข้าส่วนหนึ่งเกิดการกระจายลงมาในเบดด้านล่างจึงทำให้อุณหภูมิเบดลดต่ำลง อย่างไรก็ตาม การกระจายอุณหภูมิตามความสูงท่อไรเซอร์ค่อนข้างสม่ำเสมอแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องตลอดความสูงเตา ยกเว้นกรณีที่ไม่มีการจ่ายอากาศชุดิยภูมิซึ่งการเผาไหม้จะถูกจำกัดให้เกิดขึ้นในเบด เนื่องจากใน

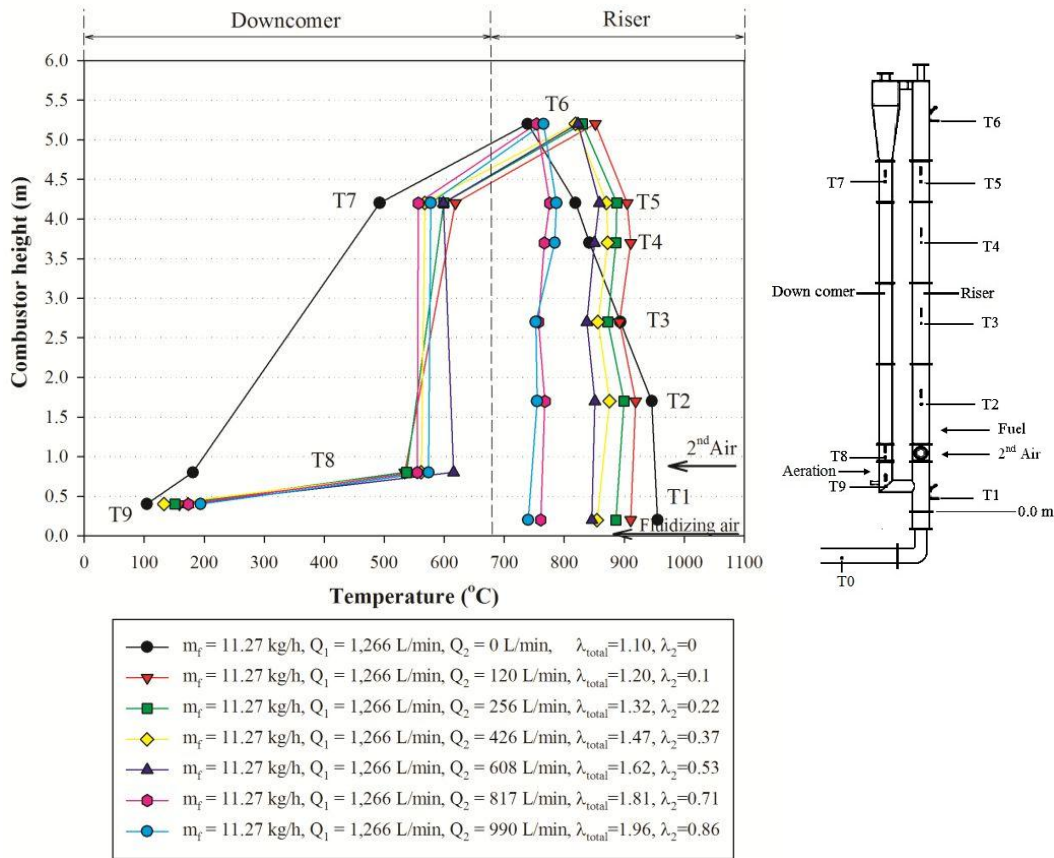
AEC-95

ทุกการทดลองได้พยายามจ่ายอากาศปฐมภูมิหรืออากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันใกล้เคียงกับปริมาณอากาศทางทฤษฎี ($\lambda_1 \approx 1.0$) เพื่อที่จะจำกัดการปฏิกิริยาของออกซิเจนกับไนโตรเจนในเชื้อเพลิงซึ่งจะนำมาสู่การเกิด NO_x โดยเห็นได้ว่าในกรณีที่มีการจ่ายปฐมภูมิเพียงอย่างเดียวนั้นเมื่ออัตราส่วนอากาศส่วนเกินต่ำเพียง 1.10 เท่านั้น จึงทำให้ในกรณีที่ไม่มีการจ่ายอากาศทุติยภูมิมีปริมาณ O_2 ที่ไม่เพียงพอที่จะเผาไหม้แก๊สที่เผาไหม้ได้ จำพวก CO หรือสารระเหยจากเชื้อเพลิงตามความสูงเตาแล้วนำมาสู่การลดต่ำลงของอุณหภูมิตามความสูงท่อไรเซอร์ทำให้มีความเข้มข้นของ CO ที่ทางออกเตามีค่าค่อนข้างสูง (ดังรูปที่ 4(ก)) นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิมากขึ้น อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ในท่อไรเซอร์มีค่าต่ำลงซึ่งเป็นผลมาจากการผสมของอากาศทุติยภูมิกับแก๊สเผาไหม้ในเตา

เมื่อพิจารณาฝั่งดาวนคัมเมอร์พบว่าอุณหภูมิของแก๊สและอนุภาคที่เวียนกลับผ่านทางไซโคลนมีค่าในช่วง $530-620^\circ\text{C}$ (T7 และ T8) ในทุกการทดลองที่มีการจ่ายอากาศทุติยภูมิ ซึ่งมีอุณหภูมิที่ยังคงมีค่าสูง

ในฝั่งดาวนคัมเมอร์ บ่งชี้ให้เห็นว่ามีการเวียนกลับของเชื้อเพลิงและอนุภาคเบตในอัตราที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนถูกเผาไหม้ในท่อดาวนคัมเมอร์ ทั้งนี้ ในกรณีที่ไม่ทำการจ่ายอากาศทุติยภูมิพบว่าอุณหภูมิในฝั่งดาวนคัมเมอร์ก็มีค่าต่ำกว่าเงื่อนไขอื่นๆ เช่นเดียวกันซึ่งมีค่าในช่วง $180-500^\circ\text{C}$ (T7 และ T8) โดยคาดว่าในกรณีนี้ความเร็วแก๊สเผาไหม้ในท่อไรเซอร์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะมีปริมาณแก๊สเผาไหม้รวมที่น้อยที่สุด ส่งผลให้การจุดอนุภาคเบตและเชื้อเพลิงให้หมุนเวียนมายังฝั่งดาวนคัมเมอร์เกิดขึ้นน้อยจึงทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนที่ตำแหน่งแวลวาล์ว (L-valve) พบว่าอุณหภูมิในทุกเงื่อนไขมีค่าต่ำลงเหลือในช่วง $100-200^\circ\text{C}$ เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวจะมีอนุภาครายจำนวนหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เสมือนวาล์วป้องกันกรไหลย้อนกลับท่อดาวนคัมเมอร์ และมีการจ่ายอากาศเพื่อผลักดันให้เกิดการไหลของทรายเข้าสู่ท่อไรเซอร์ ดังนั้น การถ่ายเทความร้อนของอนุภาครายที่ไหลผ่านไซโคลนดักอนุภาคไปยังอนุภาครายอื่นซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าและการจ่ายอากาศที่ L-valve นี้เป็นสาเหตุของการต่ำลงของอุณหภูมิ

AEC-95



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงของเตาเผาไหม้ภายใต้ปริมาณอากาศชุดุติภูมิต่างๆ

3.2 องค์ประกอบแก๊สมลพิษที่ทางออกเตา

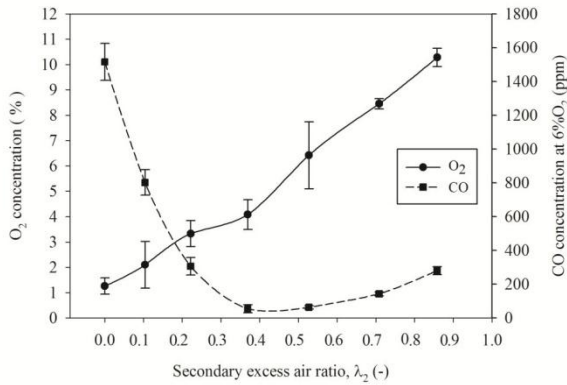
ผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศชุดุติภูมิในการเผาไหม้ถ่านหินซึ่งปรับเปลี่ยนในช่วงอัตราส่วนอากาศส่วนเกินชุดุติภูมิ (λ_2) ในช่วง 0–0.86 และอัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวม (λ_{total}) ในช่วง 1.10 – 1.96 แสดงดังรูปที่ 4 (ก)-(ข) โดยพบว่าการเพิ่มปริมาณอากาศชุดุติภูมิส่งผลให้ความเข้มข้นของ O_2 ที่ทางออกมีค่าสูงขึ้นจาก 1.3% เป็น 10% ดังรูปที่ 4(ก) และที่สำคัญคือ การเพิ่มปริมาณอากาศชุดุติภูมินี้ยังส่งผลให้ความเข้มข้นของ CO ลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการเพิ่มปริมาณอากาศชุดุติภูมิในช่วงที่ส่งผลให้ λ_2 เพิ่มขึ้นจาก 0–0.37 CO มีค่าลดต่ำลงจาก 1555 ppm เหลือ 50 ppm (ที่ 6% O_2) ดังรูปที่ 4(ก) เนื่องจากปริมาณ O_2 ที่เพิ่มมากขึ้นในการเผาไหม้ควบคู่กับการคลุกเคล้า (Mixing) ที่รุนแรงขึ้นตามปริมาณอากาศชุดุติภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลให้

การเผาไหม้เกิดอย่างสมบูรณ์มากขึ้น อย่างไรก็ตามถึงแม้การเพิ่มปริมาณอากาศชุดุติภูมิในช่วง 0–0.37 ส่งผลให้ CO มีค่าลดลง ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้อุณหภูมิในเตามีค่าลดลงจาก 950 เหลือ 860°C ซึ่งยังคงมีค่าในช่วงที่สูงพอที่จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศชุดุติภูมิสูงขึ้นตั้งแต่ $\lambda_2 = 0.53$ –0.86 พบว่า CO เริ่มมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นไปเป็น 300 ppm (ที่ 6% O_2) โดยมีเหตุผลมาจากอุณหภูมิเบตที่ลดต่ำลงเหลือ 820°C และความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณอากาศชุดุติภูมิซึ่งทำให้ระยะเวลาการเผาไหม้ภายในเตาเหลือสั้นลง

ผลกระทบของปริมาณอากาศชุดุติภูมิต่อการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) แสดงดังรูปที่ 4(ข) ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศชุดุติภูมิซึ่งแสดงในรูปของความเข้มข้น

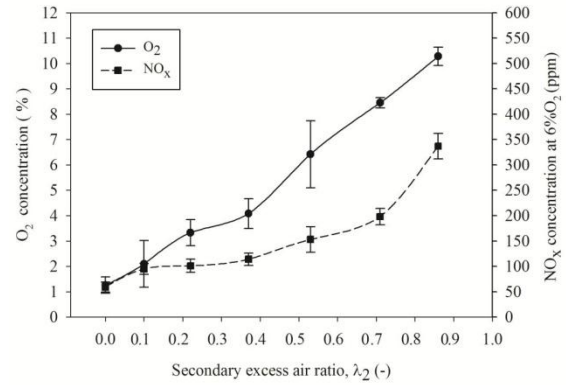
AEC-95

O₂ ที่เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นของ NO_x มีค่าในช่วง



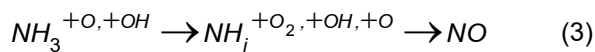
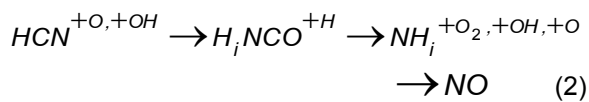
(ก) CO

75–337 ppm (ที่ 6% O₂)

(ข) NO_x

รูปที่ 4 องค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ถ่านหินภายใต้การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศชุดฤกษ์

ทั้งนี้ เป็นที่น่าสังเกตว่าในช่วงการเพิ่มปริมาณอากาศชุดฤกษ์ (λ_2) ในช่วง 0–0.37 นั้น ส่งผลให้ NO_x มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 75 เป็น 120 ppm แต่เมื่อเพิ่ม λ_2 ไปจนถึง 0.86 นั้นพบว่า NO_x มีความเข้มข้นเพิ่มสูงอย่างมากเป็น 337 ppm การเพิ่มของ NO_x อย่างต่อเนื่องตามปริมาณอากาศชุดฤกษ์นั้นแสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาการก่อเกิด NO_x ระหว่างไนโตรเจนในเชื้อเพลิงและ O₂ จากอากาศ โดยไนโตรเจนของเชื้อเพลิงซึ่งถูกปลดปล่อยมาจากสารระเหยของถ่านหินที่มีสัดส่วนที่มากกว่า 30% wt. ในรูปของ NH₃ และ HCN เมื่อทำปฏิกิริยากับ O₂ จึงทำให้ก่อตัวเป็น NO_x ผ่านปฏิกิริยาต่างๆ ดังสมการที่ (2)-(3) [15]



ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น O₂ จึงทำให้ NO_x เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ การใช้ปริมาณอากาศปฐมฤกษ์ที่มากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีซึ่งทำให้ไม่มีบริเวณที่เกิดบรรยากาศรีดิวซิง (Reducing atmosphere) ที่เอื้อต่อการทำปฏิกิริยาสลาย NO_x จึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งของการเพิ่มขึ้นของ NO_x จากการ

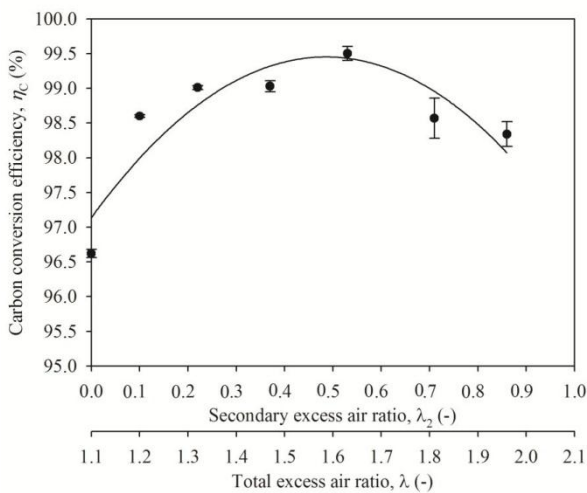
เผาไหม้ [15] เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการเกิด NO_x คืออุณหภูมิเบดและความเข้มข้นของ O₂ นั้นพบว่าปริมาณอากาศชุดฤกษ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิเบดลดต่ำลง (ดังรูปที่ 3) ไม่ได้ส่งผลต่อการเกิด NO_x อย่างชัดเจน เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับทั้งจลนพลศาสตร์ทางเคมีซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจน อย่างไรก็ตามผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [16]

3.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

ในแง่ของสมรรถนะของการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้ CFB ในการศึกษาที่ได้นำเสนอในเทอมของประสิทธิภาพการแปลงสภาพคาร์บอน (η_c) ซึ่งหมายถึงสัดส่วนของคาร์บอนที่เหลือในเถ้าจากการเผาไหม้เทียบกับสัดส่วนของคาร์บอนที่มีในเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) นั้นพบว่า η_c มีค่าในช่วง 96.5–99.5% ดังรูปที่ 5 โดยการเพิ่มปริมาณอากาศชุดฤกษ์จากค่า λ_2 ไปจนถึง 0.53 นั้นส่งผลให้ η_c เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณ O₂ ที่เพิ่มมากขึ้น ควบคู่กับการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงในเบดที่ดียิ่งขึ้น จึงช่วยให้มีการเผาไหม้คาร์บอนในเชื้อเพลิงและแก๊สที่เผาไหม้ได้ต่างๆ รวมไปถึง CO ดียิ่งขึ้น (ดังรูปที่ 4(ข)) อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มปริมาณอากาศชุดฤกษ์สูงขึ้นเป็น λ_2 ในช่วง 0.53–0.86 จะส่งผลให้ η_c มีแนวโน้มลดต่ำลงเหลือ 98.3% โดยเป็น

AEC-95

ผลมาจากอุณหภูมิเบดที่ต่ำลงเหลือ 730°C และความเร็วแก๊สเผาไหม้ในท่อไรเซอร์ที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งจะพัดพาเอาอนุภาคถ่านภายในเบดขึ้นสู่ด้านบนของท่อไรเซอร์เร็วขึ้น แล้วส่งผลให้ระยะเวลาการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเบดลดต่ำลง ทั้งนี้ การใช้สัดส่วนอากาศหุติยภูมิที่ค่อนข้างสูงจนเกินไปอาจก่อให้เกิดปัญหาการทดลองนี้ อาจจะไม่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงแข็งบางชนิดที่มีปริมาณสารระเหยต่ำและมีคาร์บอนคงตัวสูง เพราะจะทำให้ปริมาณอากาศที่ต้องการใช้เพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงในเบดไม่เพียงพอ



รูปที่ 5 ผลกระทบของปริมาณอากาศหุติยภูมิต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศหุติยภูมิในการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไรเซชันแบบหมุนเวียนซึ่งพิจารณาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นและแก๊สมลพิษที่ทางออกเตา สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การกระจายอุณหภูมิภายในเตาบ่งชี้ว่าการเผาไหม้ถ่านหินเกิดขึ้นตลอดความสูงของท่อไรเซอร์
2. การเพิ่มปริมาณอากาศหุติยภูมิส่งผลให้อุณหภูมิเบดและอุณหภูมิภายในท่อไรเซอร์ลดต่ำลง นอกจากนี้กรณีที่ไม่จ่ายอากาศหุติยภูมิอุณหภูมิในท่อ

ดาวนั้คมเมอร์มีค่าต่ำเพราะการเวียนกลับของอนุภาคที่เบาบาง

3. การเพิ่มปริมาณอากาศหุติยภูมิส่งผลให้ความเข้มข้นของ O_2 และ NO_x เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ CO มีแนวโน้มลดต่ำลง โดยมีค่าของ O_2 ในช่วง 1.3-10% สำหรับแก๊สมลพิษคือ CO และ NO_x ที่ระดับความเข้มข้น O_2 6% มีค่า 50-1555 ppm และ 75-337 ppm ตามลำดับ

4. การเพิ่มปริมาณอากาศหุติยภูมิ (λ_2) จาก 0 เป็น 0.53 ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนเพิ่มขึ้นแต่จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อ λ_2 มีค่ามากกว่านี้

5. อัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิที่เหมาะสมจากการศึกษานี้ในแง่ของ CO และ NO_x คือ 0.37

6. อัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิที่ค่อนข้างสูงอาจไม่เหมาะสมกับการใช้กับเชื้อเพลิงที่มีสารระเหยต่ำและมีคาร์บอนคงตัวสูง

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.

AEC-95

- [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). คุณลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัดนครนายก
- [14] ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์และฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2556). การเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน, 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.