

อิทธิพลของการจ่ายอากาศทุติยภูมิที่มีต่อสมรรถนะของการเผาไหม้ไม้อัดเม็ด
ภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนInfluence of Secondary Air Injection on Combustion Performance of Wood
Pellets Firing in a Circulating Fluidized Bed Combustorธรรมณู อุดมมัน¹, ประสาน สติยต์เรืองศักดิ์² และฐานิตย์ เมธิยานนท์^{3*}^{1,2,3} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย
เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

*ติดต่อ: thanid_m@yahoo.com, 02-9883655 ต่อ 3107

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณอากาศทุติยภูมิที่จ่ายในการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อัตราการป้อนไม้อัดเม็ดที่ 13.8 kg/h และอัตราอากาศส่วนเกินปฐมภูมิ (λ_{PA}) เป็น 0.82 ในขณะที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินทุติยภูมิ (λ_{SA}) อยู่ระหว่าง 0.42-0.76 จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในเบดมีค่าในช่วง 825-837°C และการจ่ายอากาศทุติยภูมิส่งผลให้อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้หลังตำแหน่งที่ทำการจ่ายมีค่าลดลง การเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิมีแนวโน้มลดปริมาณ CO ได้ แต่ส่งผลให้ปริมาณ O₂ และ NO_x เพิ่มขึ้นด้วย โดยความเข้มข้นของ CO และ NO_x ที่ความเข้มข้นออกซิเจนส่วนเกิน 6% มีค่าอยู่ในช่วง 1,828-4,197 ppm และ 107 - 150 ppm ตามลำดับ นอกจากนี้ ประสิทธิภาพการแปลงสภาพคาร์บอนมีค่าสูงสุด 99% ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินทุติยภูมิ (λ_{SA}) เป็น 0.76

คำหลัก: แก๊สมลพิษ/ ไม้อัดเม็ด/ ฟลูอิดซ์เบด/ อากาศทุติยภูมิ

Abstract

In this study, the effects of secondary air injection on the combustion characteristics and performances of wood pellet in a circulating fluidized bed combustor were investigated. The fuel feed rates, primary excess air ratio (λ_{PA}) and secondary excess air ratio (λ_{SA}) were 13.8 kg/h, 0.82, 0.42-0.76, respectively. The results indicated that the bed temperature in a range of 825-837°C and temperature profiles along the riser became lower after the secondary air injection position. The increased excess air ratio seemed to reduce CO concentrations but magnify O₂ and NO_x tendencies. CO and NO_x corrected to 6% O₂ were ranged between 1,828 - 4,197 ppm and 107 - 150 ppm, respectively. Moreover, the maximum η_C of 99% was achieved at secondary excess air ratio of 0.76.

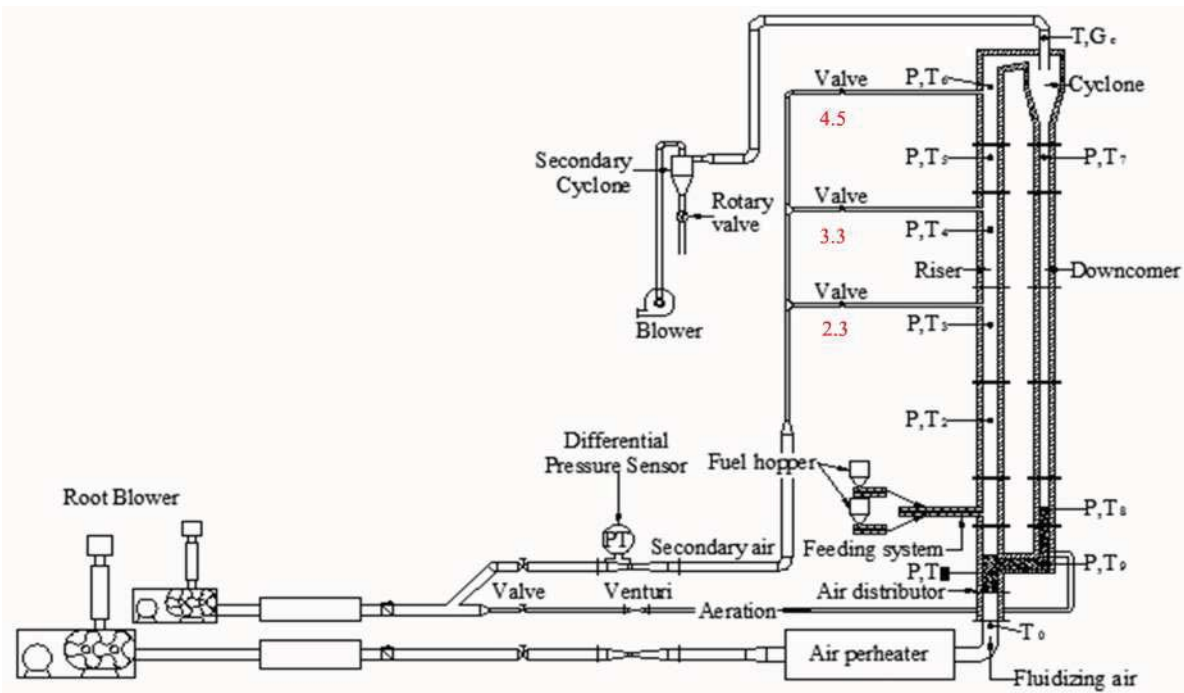
Keywords: Emission gases/ Wood pellet/ Fluidized bed/ Secondary air

1. บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยการผลิตพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม แต่ปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าเชื้อเพลิงและพลังงานจากต่างประเทศมากขึ้นในแต่ละปี ดังนั้นการเลือกใช้พลังงานทดแทนเพื่อความมั่นคงทางพลังงานจึงทำให้พลังงานจากชีวมวลซึ่งมีแหล่งพลังงานอยู่ภายในประเทศและมีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยได้ถูกนำมาใช้งานมากขึ้น สำหรับพลังงานชีวมวลจากไม้อัดเม็ด (Wood Pellets) ซึ่งมีปริมาณการใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้ามากขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งในและต่างประเทศ เพราะมีความหนาแน่นสูงจึงประหยัดค่าขนส่งและให้พลังงานความร้อนมากกว่าชีวมวลประเภทอื่น [1] เมื่อพิจารณาเทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปพลังงานในเชื้อเพลิงพบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรงเป็นได้รับความนิยมสูงสุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงสุดและไม่ยุ่งยากซับซ้อนซึ่งเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Combustor: CFBC) ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงและปลดปล่อยมลพิษต่ำ [2]

งานวิจัยในด้าน CFBC ในประเทศไทยยังมีการศึกษาค้นคว้าน้อยซึ่งส่วนใหญ่เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) จึงต้องพึ่งพาความรู้ด้านเทคโนโลยีนี้จากต่างประเทศ ทำให้มีความจำเป็นที่ต้องศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ของเตา CFBC เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศปฐมภูมิและปริมาณอากาศทุติยภูมิส่งผลต่อพฤติกรรมและการสมรรถนะการเผาไหม้ในแง่ของประสิทธิภาพการแปลงสภาพคาร์บอน [3] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการเผาไหม้แกลบที่มีเงื่อนไขที่เหมาะสมเมื่อค่าสัดส่วนอากาศปฐมภูมิต่อปริมาณอากาศทุติยภูมิเป็น 70 ต่อ 30 [4]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณอากาศทุติยภูมิที่จ่ายในการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดต่อพฤติกรรมและสมรรถนะของการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนระดับต้นแบบ (pilot scale) ในแง่ของการปลดปล่อยแก๊สมลพิษและประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์ของเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFBC)

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน

แผนผังอุปกรณ์ของเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานนี้แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยท่อโรเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 mm สูง 6 m และท่อดาวนคัมเมอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 mm โดยท่อทั้งสองนี้ได้มีการหล่อซีเมนต์ทนไฟหนา 5 cm เพื่อลดการสูญเสียความร้อนออกสู่อากาศภายนอก ซึ่งท่อโรเซอร์และท่อดาวนคัมเมอร์ถูกเชื่อมต่อกันทางด้านบนด้วยไซโคลนดักจับอนุภาค และเชื่อมต่อกันด้านล่างด้วยท่อป้อนกลับเป็นแบบแอล-วาล์ว (L-valve) สำหรับการจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้มีสามส่วนคือ 1) อากาศปฐมภูมิถูกจ่ายผ่านแผ่นกระจายอากาศ (Air distributor) แบบหัวฉีดจำนวน 6 หัว เพื่อให้อนุภาคเบดเกิดการฟลูอิดเซชัน 2) อากาศทุติยภูมิซึ่งถูกจ่ายในระดับความสูงประมาณ 3.3 m เหนือแผ่นกระจายอากาศเพื่อช่วยในการเผาไหม้สารระเหยและแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น 3) อากาศที่เพิ่มเติมอากาศเพื่อช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาคจากท่อดาวนคัมเมอร์หมุนเวียนไปยังท่อโรเซอร์ได้อย่างต่อเนื่อง แก๊สไอเสียจะถูกดูดออกด้วยพัดลมระบาย (Induced fan) ให้ไหลผ่านไซโคลนดักเก๊าลอยซึ่งด้านล่างมีชุดโรตารีเป็นตัวป้องกันอากาศรั่วไหลย้อนกลับ สำหรับการอุ่นอากาศ และทำระบบให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงเริ่มต้นการทดลองโดยใช้ชุดขดลวดความร้อน (Air preheater) อนุภาคเบดที่ใช้เป็นทรายที่มีขนาดเฉลี่ย 300 μm ปริมาณ 22 kg ทำให้มีระดับความสูงของเบดนี้ประมาณ 50 cm

2.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอยู่ระหว่าง 10-20 mm ซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงโดยละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเชื้อเพลิงไม้อัดเม็ด

Proximate analysis (wt.%)	
Fixed carbon	15.01
Volatile matter	80.10
Moisture	2.00
Ash	2.89
Ultimate analysis (wt.%)	
Carbon	44.00
Hydrogen	6.00
Oxygen	34.58
Nitrogen	0.30
Sulphur	0.06
Moisture	10.56
Ash	4.50
Higher heating value (MJ/kg)	16.00

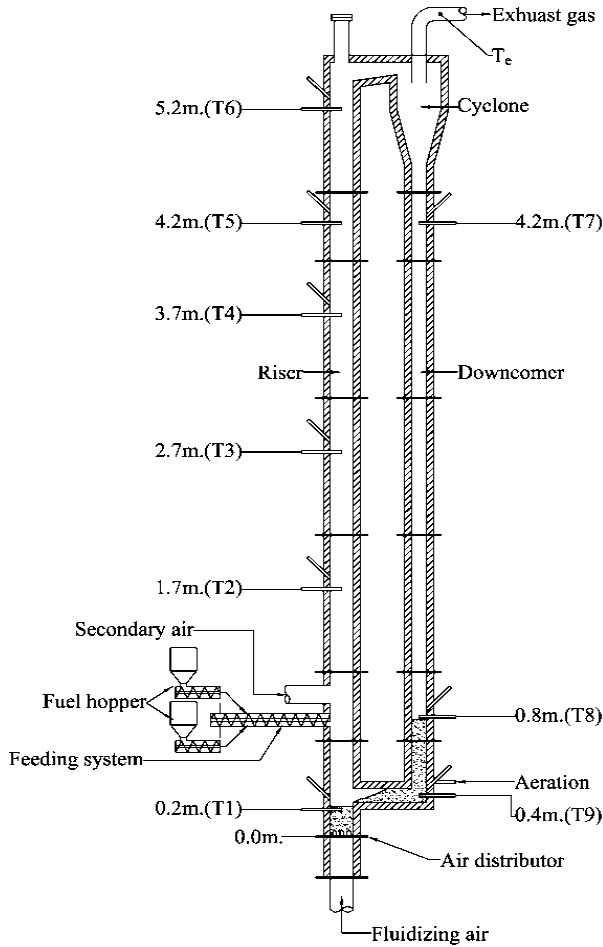
2.3 การวัดและวิธีการทดลอง

การวัดปริมาณอากาศแต่ละส่วนที่ใช้ในการทดลองใช้เวนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ ของย่านการวัด การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับสกรูป้อนเชื้อเพลิง ส่วนการวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผล ซึ่งฝั่งท่อโรเซอร์ทำการวัดจำนวน 6 ตำแหน่งคือ 0.2, 1.7, 2.7, 3.7, 4.2, 5.2 m เหนือแผ่นกระจายอากาศดังในรูปที่ 2 ส่วนเก้าอี้ที่ถูกดักจับได้จากไซโคลนถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน (η_c) ด้วยสมการที่ (1)

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

เมื่อ C_{ub} = สัดส่วนคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ในเก๊าลอยต่อหนึ่งกิโลกรัมเชื้อเพลิง ($\text{kg}_{Cub}/\text{kg}_{Fuel}$)

C_{Fuel} = สัดส่วนคาร์บอนต่อหนึ่งกิโลกรัมเชื้อเพลิง ($\text{kg}_C/\text{kg}_{Fuel}$)



รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของเตาเผาไหม้
ฟลูอิดเซตแบบหมุนเวียน (CFBC)

การทดลองเริ่มจากบรรจุทรายเข้าสู่เตาเผาไหม้แล้ว
จ่ายอากาศและปรับความเร็วอากาศส่วนที่ก่อให้เกิด
ฟลูอิดเซชันที่ประมาณ 5 m/s เพื่อให้ทรายเกิดการ
ฟุ้งกระจายและหมุนเวียนในเตาเผาไหม้ จากนั้นอุณหภูมิ
เตาเผาไหม้ด้วยชุดขดลวดความร้อนขนาด 50 kW
จนกระทั่งอุณหภูมิเบต (T1) สูงในช่วง 300°C ซึ่งใช้เวลา
ประมาณ 4 ชั่วโมง แล้วจึงเริ่มป้อนถ่านหินขนาด 3-5
mm อย่างต่อเนื่องที่ 8 kg/h เป็นเชื้อเพลิงนำร่องเข้าสู่
เตาเผาไหม้เพื่อให้เกิดการลุกติดไฟเองจนอุณหภูมิภายใน
เตาเผาไหม้ถึง 800°C จึงป้อนไม้อัดเม็ดในอัตราที่
ต้องการเข้าสู่เตาเผาไหม้และปรับปริมาณอากาศส่วน
ต่างๆ ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 2 แล้ว
ค่อยๆ ลดการให้ความร้อนจากชุดขดลวดความร้อน
เมื่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะ
คงตัวแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าของอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาที่

ระดับความสูงต่างๆ จำนวน 6 ตำแหน่ง (T0-T6) ดังรูปที่
2 โดยบันทึกผลในทุกช่วงเวลา 10 นาที และบันทึก
องค์ประกอบของแก๊สไอเสียโดยใช้เครื่องวิเคราะห์รุ่น
Testo350XL ซึ่งสามารถวัดแก๊ส O₂, CO และ NO_x ได้

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลอง	การทดลอง			
	1	2	3	4
อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (L/min)	930			
อัตราส่วนอากาศส่วนเกินปฐมภูมิ (λ _{PA})	0.82			
อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (L/min)	475	575	630	855
อัตราส่วนอากาศส่วนเกินทุติยภูมิ (λ _{SA})	0.42	0.51	0.56	0.76
อัตราการไหลของอากาศผ่าน L-valve (L/min)	55			
อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (λ _{total})	1.29	1.38	1.43	1.63
Superficial air velocity (m/s)*	4.97	5.40	5.55	6.17
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/h)	13.8			

*พิจารณาจากปริมาณอากาศรวมภายใต้อุณหภูมิเบต (T1) ของแต่ละการทดลอง

3. ผลการทดลอง

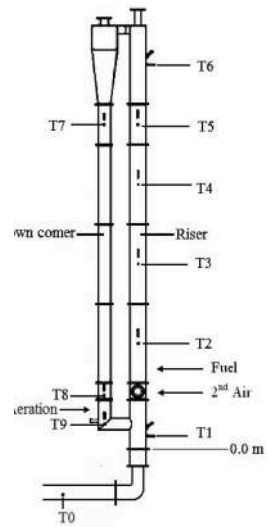
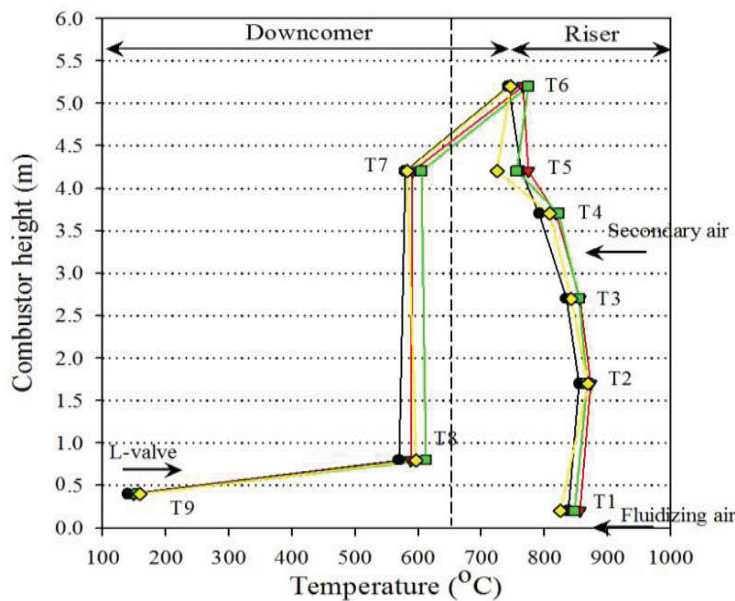
3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูง

การกระจายอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้ CFB
ตามแนวระดับความสูงแสดงถึงพฤติกรรมของการเผาไหม้
เชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดที่ศึกษาภายใต้เงื่อนไขที่ปริมาณอากาศ
ปฐมภูมิคงที่ (λ_{PA} = 0.82) และการปรับเปลี่ยนปริมาณ
อากาศทุติยภูมิ (λ_{SA} = 0.42, 0.51, 0.56, 0.76) ที่ระดับ
ความสูง 3.3 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ ซึ่งเมื่อคิดเป็น
อัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวม (λ_{total}) มีค่าอยู่ในช่วง
1.29-1.63 ดังรูปที่ 3

เมื่อพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิภายใน
ท่อไรเซอร์ตามระดับความสูง พบว่าอุณหภูมิเบตเหนือ
หัวฉีดกระจายอากาศ (T1) มีค่าอยู่ในช่วงแคบระหว่าง
825-837°C และอุณหภูมิภายในท่อไรเซอร์มีค่าใกล้เคียง
กันและสม่ำเสมอตลอดระดับความสูงในทุกระดับเงื่อนไขการ

ทดลองซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของการเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน โดยในช่วง T1-T2 มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อเชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดได้รับความร้อนแล้วจะปลดปล่อยสารระเหยที่มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 80 ดังตารางที่ 1 ออกมาและไหลขึ้นไปในท่อโรเซอร์พร้อมกับเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วจึงทำให้อุณหภูมิ T2 มีอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งพฤติกรรมการเผาไหม้ดังกล่าวแตกต่างจากการเผาไหม้ถ่านหินที่มีอุณหภูมิสูงสุดที่

ระดับความสูง T1 เพราะถ่านหินมีปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) สูงกว่าสารระเหยจึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่เบดหรือระดับความสูง 0.2 m เป็นหลัก [5] และแสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงส่วนใหญ่เกิดการเผาไหม้ที่ระดับความสูง 0.2-2.7 m (T1-T3) เพราะมีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งอื่นซึ่งเป็นผลมาจากอากาศปฐมภูมิที่เกิดการเผาไหม้กับเชื้อเพลิง



●	$\lambda_{PA} = 0.82, \lambda_{SA} = 0.42, \lambda_{LV} = 0.05, \lambda_{total} = 1.29, m_F = 13.8 \text{ kg/h}, H = 3.3 \text{ m}$
▼	$\lambda_{PA} = 0.82, \lambda_{SA} = 0.51, \lambda_{LV} = 0.05, \lambda_{total} = 1.38, m_F = 13.8 \text{ kg/h}, H = 3.3 \text{ m}$
■	$\lambda_{PA} = 0.82, \lambda_{SA} = 0.56, \lambda_{LV} = 0.05, \lambda_{total} = 1.43, m_F = 13.8 \text{ kg/h}, H = 3.3 \text{ m}$
◆	$\lambda_{PA} = 0.82, \lambda_{SA} = 0.76, \lambda_{LV} = 0.05, \lambda_{total} = 1.63, m_F = 13.8 \text{ kg/h}, H = 3.3 \text{ m}$

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงของเตาเผาไหม้ภายใต้ปริมาณอากาศหุติยภูมิต่างๆ

ในขณะที่อุณหภูมิในช่วง T3-T6 มีแนวโน้มลดลงซึ่งในช่วงนี้มีความหนาแน่นของอนุภาคเบดต่ำ และมีการจ่ายอากาศหุติยภูมิในช่วง T3-T4 โดยมีอุณหภูมิ ลดลงมากที่สุดที่ T5 เหตุผลที่อุณหภูมิในช่วง T3-T6 ลดลงอย่างต่อเนื่องเพราะปริมาณอากาศปฐมภูมิได้ถูกใช้ในการเผาไหม้ช่วง T1-T3 ไปเกือบหมดแล้วตามเงื่อนไขการทดลองที่ใช้ปริมาณอากาศปฐมภูมิต่ำกว่าปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี ($\lambda_{PA} = 0.82$) ถึงแม้ว่ามีการจ่ายอากาศหุติยภูมิเข้ามาในช่วง T3-T4 แต่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

อุณหภูมิภายในท่อโรเซอร์มากและอากาศหุติยภูมิที่ต้องใช้เวลาเพื่อให้เกิดการผสมคลุกเคล้า (mixing) เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่เหลือ ดังนั้น การลดลงของอุณหภูมิในช่วง T4-T5 จึงเป็นผลมาจาก cooling effect ของอากาศหุติยภูมิ สำหรับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T6 สูงขึ้นมากกว่า T5 เล็กน้อย คาดว่าเป็นผลมาจากเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์กับอากาศหุติยภูมิที่จ่ายเข้ามานั่นเอง

สำหรับฝั่งดาร์นคัมเมอร์พบว่าอุณหภูมิของแก๊สและอุณหภูมิของเบดที่เวียนกลับผ่านทางไซโคลนอยู่ในช่วง 570-620°C (T7-T8) ในทุกเงื่อนไขการทดลองซึ่งยังคงมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง นั้นแสดงให้เห็นว่ามีการอัตราการไหลเวียนกลับของอุณหภูมิของเบดและเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดที่ค่อนข้างสูง ส่วนที่ตำแหน่งแวลวาล์ว (L-valve) พบว่าอุณหภูมิในทุกเงื่อนไขมีค่าต่ำลงในช่วง 140-160°C เนื่องจากที่ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิของอากาศจำนวนหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เสมือนวาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับมาด้านท่อดาร์นคัมเมอร์และมีการจ่ายอากาศที่อุณหภูมิห้องจำนวนหนึ่งเข้ามาเพื่อเป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดการไหลของอุณหภูมิของเบดเข้าสู่ท่อโรเตอร์อย่างต่อเนื่องจึงทำให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ T9 ลดต่ำลงอย่างมาก

3.2 องค์ประกอบแก๊สมลพิษที่ทางออกเตาเผาไหม้

อย่างที่ทราบกันดีว่าปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบและปริมาณของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น อุณหภูมิของเบด อัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวม ปริมาณและตำแหน่งของอากาศหุติยภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิของแก๊สในไซโคลน เป็นต้น [6] โดยในงานนี้ได้การศึกษาผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศหุติยภูมิในการเผาไหม้ไม้อัดเม็ดในช่วงอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิ (λ_{SA}) ในช่วง 0.42-0.76 คิดเป็นอัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวม (λ_{total}) ในช่วง 1.29 - 1.63 แสดงดังรูปที่ 4 (ก)-(ค) โดยใช้แนวทางการจ่ายปริมาณอากาศปฐมภูมิต่ำกว่าปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี ($\lambda_{PA} = 0.82$) ซึ่งเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดในเบดที่ระดับความสูง 0.2-3.3 m ด้วยปริมาณอากาศที่จำกัดเพื่อที่จะลดโอกาสการเกิด NO_x จากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับไนโตรเจนในเชื้อเพลิง

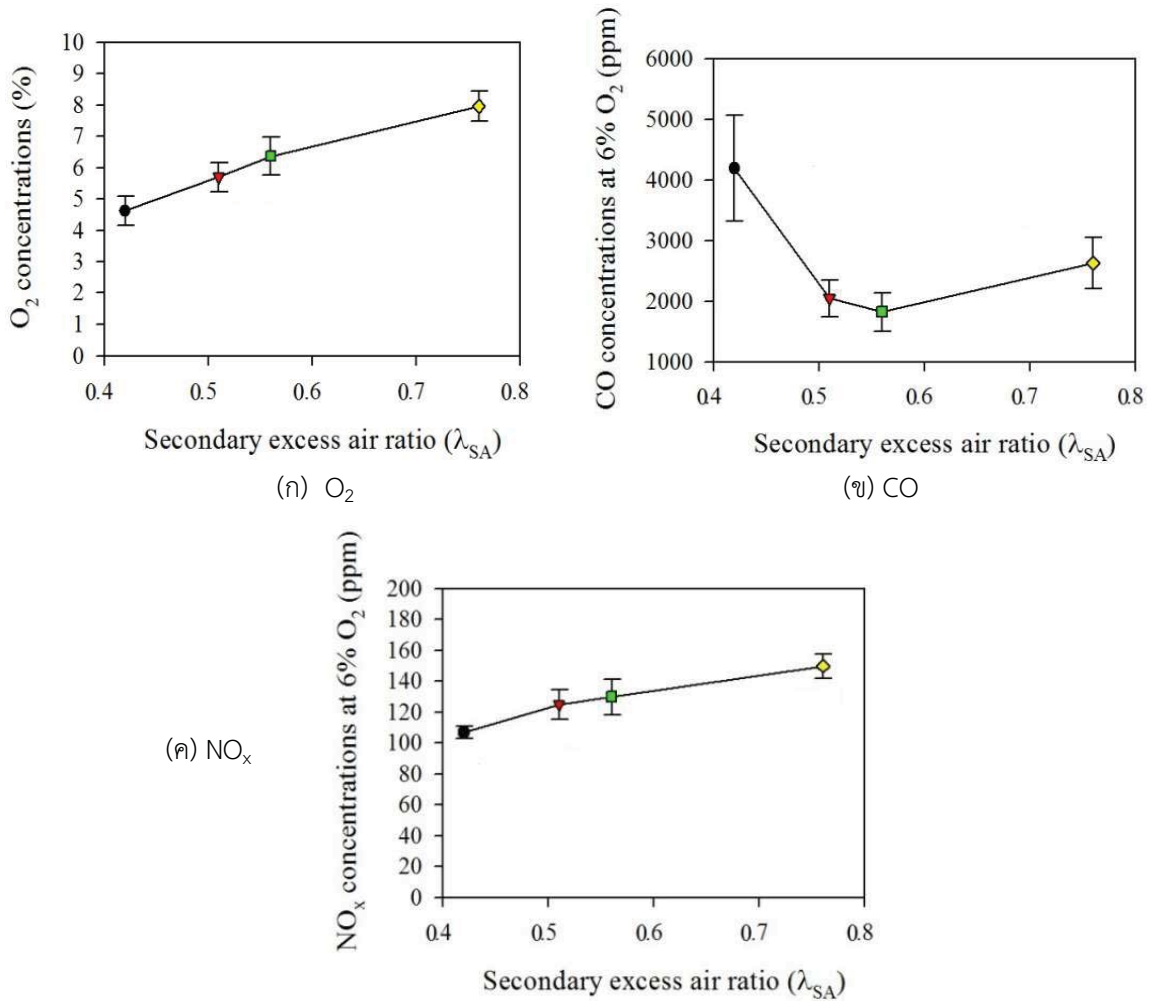
จากรูปที่ 4 (ก) พบว่าเมื่อเพิ่มการจ่ายของอากาศหุติยภูมิส่งผลให้ความเข้มข้นของ O_2 ในแก๊สเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นจาก 4.63% เป็น 7.90% และเป็นที่น่าสังเกตว่าการเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิในช่วง 0.42-0.56 ส่งผลให้ความเข้มข้นของ CO ลดต่ำลง

อย่างชัดเจนจาก 4,197 ppm เหลือเพียง 1,828 ppm (ที่ 6% O_2) ดังรูปที่ 4 (ข) เนื่องจากอุณหภูมิภายในท่อโรเตอร์ตามระดับความสูงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นความเข้มข้นของ CO ลดต่ำลงจึงเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณ O_2 ที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับการเผาไหม้และมีการไหลปั่นป่วนมากขึ้นตามปริมาณอากาศหุติยภูมิจึงทำให้เกิดการเผาไหม้เกิดอย่างสมบูรณ์มากขึ้น

แม้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิในช่วง 0.42-0.56 ส่งผลให้ความเข้มข้นของ CO ลดลง แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิสูงขึ้นในช่วง 0.56-0.76 พบว่าความเข้มข้นของ CO เพิ่มขึ้นไปเป็น 2,636 ppm (ที่ 6% O_2) ผลเช่นนี้คาดว่าเกิดจากอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ลดต่ำลงอย่างชัดเจนเมื่ออัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิเป็น 0.76 ดังรูปที่ 3 และระยะเวลาการเผาไหม้ภายในเตาสั้นลงเนื่องจากความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่มากขึ้นดังตารางที่ 2 [7]

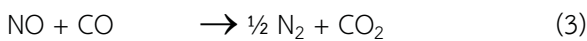
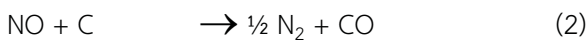
ผลกระทบของปริมาณอากาศหุติยภูมิต่อการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) แสดงดังรูปที่ 4(ค) โดยพบว่าความเข้มข้นของ NO_x มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศหุติยภูมิหรือในอีกด้านหนึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของ O_2 ให้มากขึ้น โดยเมื่ออัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิ (λ_{SA}) เพิ่มจาก 0.42 เป็น 0.76 มีผลทำให้ความเข้มข้นของ NO_x มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 107 ppm ไปเป็น 150 ppm (ที่ 6% O_2) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากไม้เช่นเดียวกัน [8]

นอกจากนี้ความเข้มข้นของ NO_x ในแก๊สเผาไหม้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิง และอุณหภูมิของเบด [8] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดในเบดที่ระดับความสูง 0.2-3.3 m ที่ใช้อัตราส่วนอากาศส่วนเกินปฐมภูมิ (λ_{PA}) เป็น 0.82 จึงเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้ในแก๊สเผาไหม้มีความเข้มข้นของ CO และเกิดปริมาณของชาร์ (char) สูงซึ่งเกิดเป็นบรรยากาศรีดิวซิง (Reducing atmosphere) ที่ส่งเสริมต่อปฏิกิริยาการสลายตัวของ NO_x ดังสมการที่ (2) และ (3) [8]



●	$\lambda_{PA} = 0.82, \lambda_{SA} = 0.42, \lambda_{LV} = 0.05, \lambda_{total} = 1.29, m_f = 13.8 \text{ kg/h}, H = 3.3 \text{ m}$
▼	$\lambda_{PA} = 0.82, \lambda_{SA} = 0.51, \lambda_{LV} = 0.05, \lambda_{total} = 1.38, m_f = 13.8 \text{ kg/h}, H = 3.3 \text{ m}$
■	$\lambda_{PA} = 0.82, \lambda_{SA} = 0.56, \lambda_{LV} = 0.05, \lambda_{total} = 1.43, m_f = 13.8 \text{ kg/h}, H = 3.3 \text{ m}$
◆	$\lambda_{PA} = 0.82, \lambda_{SA} = 0.76, \lambda_{LV} = 0.05, \lambda_{total} = 1.63, m_f = 13.8 \text{ kg/h}, H = 3.3 \text{ m}$

รูปที่ 4 องค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ไม้อัดเม็ดภายใต้การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศหุติยภูมิ



โดยปฏิกิริยาในสมการที่ (3) จะใช้พื้นผิวของชาร์ (char) สำหรับการเร่งปฏิกิริยา นั่นคือยิ่งมีชาร์เกิดขึ้นมาก ยิ่งช่วยเพิ่มอัตราเร็วการสลายตัว NO_x ได้ดียิ่งขึ้น

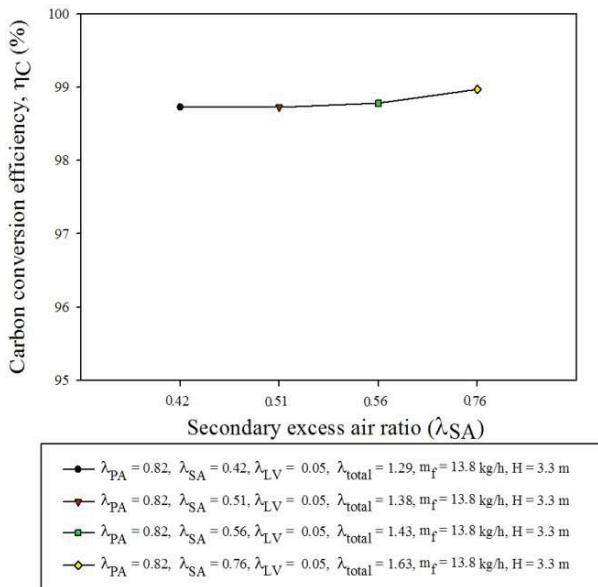
โดยภาพรวมการเพิ่มปริมาณอากาศด้วยการเพิ่มปริมาณอากาศหุติยภูมิ แม้ว่าส่งผลต่อการลด CO แต่ก็มิส่งผลให้ปริมาณของ NO_x เพิ่มสูงขึ้น

3.3 ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

สมรรถนะของการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้ CFBC ในงานนี้ใช้ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน (η_c) เป็นตัวแทนซึ่งหมายถึงสัดส่วนของคาร์บอนที่เหลือในถ้ำลอยจากการเผาไหม้เทียบกับสัดส่วนของคาร์บอนที่มีในเชื้อเพลิง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

พบว่า η_c มีค่าในช่วง 98.7–99.0% ดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิจาก 0.56 ไปจนถึง 0.76 ส่งผลให้ η_c เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากความเข้มข้น O₂ ที่เพิ่มมากขึ้นและการผสมของ

เชื้อเพลิงกับอากาศในเบดได้ดียิ่งขึ้นจึงช่วยให้มีการเผาไหม้คาร์บอนในเชื้อเพลิงและแก๊สที่เผาไหม้ได้ดีขึ้น แม้ว่าความเร็วแก๊สเผาไหม้ในท่อโรเซอร์ที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ระยะเวลาการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเบดน้อยลงแต่ยังคงเพียงพอสำหรับการเผาไหม้



รูปที่ 5 ผลกระทบของปริมาณอากาศหุติยภูมิต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศหุติยภูมิในการเผาไหม้ไม้อัดเม็ดในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนซึ่งพิจารณาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นและแก๊สมลพิษที่ทางออกเตาเผาไหม้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเผาไหม้เกิดขึ้นตลอดความสูงของท่อโรเซอร์โดยมีอุณหภูมิในช่วงเบดหนาแน่น (T1-T3) ในช่วง 825-837°C สม่าเสมอตลอดความสูง การเพิ่มปริมาณอากาศหุติยภูมิส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาที่ตำแหน่ง 3.3 m (T4-T5) ลดต่ำลง

2. การเพิ่มปริมาณอากาศหุติยภูมิส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ CO ในสองลักษณะ คือ มีค่าลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิในช่วง 0.42-0.56 และมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราส่วน

อากาศส่วนเกินหุติยภูมิ 0.56-0.76 ปริมาณอากาศหุติยภูมิที่ดีที่สุดในการศึกษานี้ ในแง่ของการปลดปล่อย CO ที่ต่ำสุดคืออัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิเท่ากับ 0.56

3. ความเข้มข้นของ NO_x มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการจ่ายอากาศหุติยภูมิเพิ่มมากขึ้นในทุกเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งมีค่าในช่วง 107-150 ppm ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานการปลดปล่อยแก๊สไอเสีย

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] ประสาน สถิตเรืองศักดิ์ และฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2556). การเผาไหม้ถ่านหินปิทูมินี่สในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 27, พัทยา จังหวัดชลบุรี
- [4] 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.
- [5] ปรัชญา บุญประสิทธิ์ และฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2558). อิทธิพลของปริมาณอากาศปฐุมภูมิต่อสมรรถนะของการเผาไหม้ถ่านหินภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 29, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจังหวัดนครราชสีมา



- [6] 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.
- [7] Varol, M. and Atimtay, AT. (2007) Combustion of olive cake and coal in a bubbling fluidized with secondary air injection, Fuel, Vol. 86, PP. 1430-1438.
- [8] Leckner, B. and Karlsson, M. (1993). Gaseous emissions from circulating fluidized bed combustion of wood, Biomass and Bioenergy, Vol. 4 (5), PP. 379–389.