

**AEC-2031**

## การเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน Combustion of Bituminous Coal in a Circulating Fluidized Bed Combustor

ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์ และ ฐานิตย์ เมธิยานนท์<sup>1,\*</sup>

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

\*ติดต่อ: E-mail:thanid\_m@yahoo.com, 029883655 ต่อ 3107

### **บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอผลการทดลองการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน พิกัด 50 kW<sub>th</sub> โดยศึกษาถึงผลกระทบของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศส่วนที่สองที่มีต่อคุณลักษณะ และสมรรถนะการเผาไหม้ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงถูกปรับเปลี่ยนในช่วง 6.7–13.4 kg/h ในขณะที่ปริมาณอากาศ ส่วนที่สองที่ใช้มีค่าในช่วง 60–414 L/min ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกินในช่วง 41–143% โดยผลการวัด การกระจายอุณหภูมิภายในเตาบ่งชี้ว่าปริมาณอากาศภายในเบดส่งผลให้ลักษณะการเผาไหม้ภายในเตา เปลี่ยนแปลงไป โดยหากปริมาณอากาศมีเพียงพอการเผาไหม้หลักจะเกิดขึ้นภายในเบด แต่หากไม่เพียงพอการเผา ไหม้จะเกิดขึ้นเหนือเบดตามความสูงท่อไรเซอร์ ในขณะที่การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ย ภายในเตาเพิ่มสูงขึ้น ส่วนการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สองส่งผลในทางกลับกัน นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณอากาศ ส่วนที่สองมีแนวโน้มให้แก๊ส CO และ NO<sub>x</sub> เพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าในช่วง 1115–2844 ppm และ 248–347 ppm (ที่ ระดับ O<sub>2</sub> 6%) ตามลำดับ

**คำหลัก:** แก๊สมลพิษ/ ถ่านหิน/ ฟลูอิดไคซ์เบด/ อากาศส่วนที่สอง

### **Abstract**

This paper presents the experimental results of bituminous coal combustion in a 50 kW<sub>th</sub>-circulating fluidized bed combustor. The effects of fuel feed rate as well as secondary air flow on the combustion characteristics and performances were investigated. The feed rates were varied in the range of 6.7–13.4 kg/h, while the secondary air flow rates were altered from 60 to 415 L/min, corresponding to the excess air ranging 41–143%. The temperature profiles inside the combustor indicated that the in-bed air flow affected the changes in combustion behaviors; the sufficient air flow caused the occurrence of main combustion in the bed excepted that the combustion would be appeared over the bed along the combustor height. The increased feed rates resulted in the elevated average temperatures, but the converse was true for the increments of secondary air flow. Moreover, the increased secondary air flows produced elevated CO and NO<sub>x</sub> tendencies, ranging 1115–2844 ppm and 248–347 ppm (at O<sub>2</sub> 6%) respectively.

**Keywords:** Coal/ Emissions/ Fluidized bed/ Secondary air

## AEC-2031

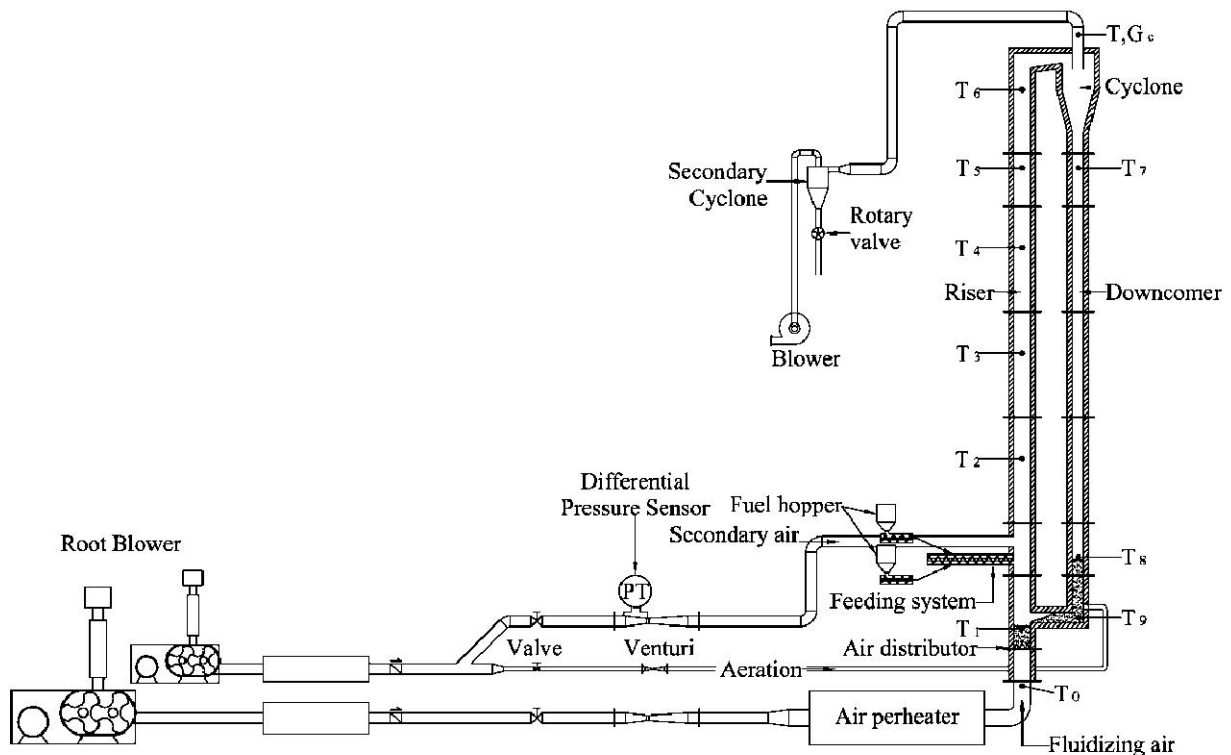
### 1. บทนำ

การแปลงรูปพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมีความจำเป็นต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาวะที่มีการแข่งขันสูงเช่นปัจจุบัน พลังงานปรมาณูและพลังงานความร้อนเป็นรูปแบบของพลังงานที่มีความต้องการใช้งานสูงสุดในภาคอุตสาหกรรม ถึงแม้ว่ากระบวนการผลิตความร้อนจากเชื้อเพลิงมีหลากหลายกระบวนการเช่น การเผาไหม้ตรง ไพโรไลซิส และแก๊สซิฟิเคชัน แต่กระบวนการเผาไหม้ตรงยังคงได้รับความนิยมสูงสุดเนื่องจากไม่ยุ่งยากซับซ้อนและมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงสุด [1] เทคโนโลยีการเผาไหม้ที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงและปลอดภัยมลพิษต่ำคือ การเผาไหม้แบบฟลูอิดไรซ์เบด [2] ซึ่งมาการใช้งานอยู่ 2 ลักษณะคือ ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed, BFB) และฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed, CFB) ทั้งนี้ CFB เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ ซึ่งทำงานที่ความเร็วแก๊สภายในเตา (Superficial velocity) ที่สูงกว่า BFB ทำให้เชื้อเพลิงถูกจุดให้ลอยไปตลอดความสูงเตา และถูกดักด้วยไซโคลนให้วนกลับไปเผาไหม้ซ้ำ

จึงทำให้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ BFB [3]

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

อย่างไรก็ตามงานวิจัยในด้าน CFB ของประเทศไทยนั้นยังค่อนข้างมีจำนวนจำกัดมาก ในขณะที่แนวโน้มของความต้องการนำเทคโนโลยี CFB มาใช้ในอนาคตเพิ่มสูงขึ้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องนำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ของเตา CFB ซึ่งในช่วงเวลาที่ผ่านมาคณะวิจัยได้ทำการทดลองเผาไหม้ถ่านไม้ในเตา CFB ขนาดพิกัด 50 kW ที่ก่อสร้างเสร็จในเบื้องต้น ซึ่งได้ศึกษาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายใน การปรับเปลี่ยนอัตราป้อนเชื้อเพลิง [13] ส่วนในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงคุณลักษณะและสมรรถนะการเผาไหม้ภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนถ่านหินและปริมาณอากาศส่วนที่สองที่ใช้ในการเผาไหม้



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์ของเตาเผาไหม้ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFBC)

## AEC-2031

### 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 2.1 เตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเซชันแบบหมุนเวียน (CFBC)

รูปที่ 1 ลักษณะของเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเซชันแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Combustor; CFBC) ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยท่อโรเซอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 mm สูง 6 m และท่อดาวน์คัมเมอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 mm โดยท่อทั้งสองนี้ได้มีการหล่อซีเมนต์ทนไฟหนา 5 cm เพื่อลดการสูญเสียความร้อนออกสู่อากาศภายนอก ท่อโรเซอร์และท่อดาวน์คัมเมอร์ถูกเชื่อมต่อกันทางด้านบนด้วยไซโคลนดักจับอนุภาคและท่อป้อนกลับเป็นแบบ L-valve และมีตำแหน่งท่อเติมอากาศ (Aeration tap) การจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้มีสามส่วนคือ 1) อากาศส่วนที่หนึ่งเป็นอากาศที่เป่าให้อนุภาคเบดเกิดการฟลูอิดไคเซชันซึ่งถูกจ่ายเข้าทางด้านล่างผ่านแผ่นกระจายอากาศ (Distributor) ซึ่งเป็นแบบหัวฉีดจำนวน 6 หัว 2) อากาศส่วนที่สองซึ่งถูกจ่ายในระดับความสูงประมาณ 0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศเพื่อช่วยในการเผาไหม้สารระเหยและแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น แก๊สไฮโดรคาร์บอน (HC) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นต้น และ 3) คืออากาศที่ท่อเติมอากาศเพื่อช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาคจากฝั่งดาวน์คัมเมอร์หมุนเวียนไปยังฝั่งโรเซอร์ได้อย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อเกิดการเผาไหม้แก๊สไอเสียจะถูกดูดออกด้วยพัดลมระบาย (Induced fan) ให้ไหลผ่านไซโคลนดักเก๊าลอยซึ่งด้านล่างมีชุดโรตารีเป็นตัวป้องกันอากาศรั่วไหลเข้า นอกจากนี้ชุดทดลองยังได้ถูกติดตั้งชุดขดลวดความร้อนซึ่งใช้สำหรับอุ่นอากาศและระบบให้อุณหภูมิสูง สำหรับทรายซึ่งใช้เป็นอนุภาคเบดมีขนาด 300  $\mu\text{m}$  ปริมาณ 20 kg ซึ่งมีระดับความสูงของเบดนี้ประมาณ 50 cm

#### 2.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ ถ่านหินบิทูมินัสที่มี โดยองค์ประกอบของเชื้อเพลิงโดยละเอียดสามารถแสดงในตารางที่ 1

### 2.3 การวัดและวิธีการทดลอง

การวัดปริมาณอากาศแต่ละส่วนที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้เวนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างกันซึ่งมีความคลาดเคลื่อน  $\pm 3\%$  ของย่านการวัด การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินจะใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ขับสกรูป้อนเชื้อเพลิง ส่วนการวัดอุณหภูมิ (T) ในการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเบิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลซึ่งมีความละเอียด  $\pm 0.1$   $^{\circ}\text{C}$  ซึ่งฝั่งท่อโรเซอร์ทำการวัดจำนวน 6 ตำแหน่งคือ 0.2, 1.7, 2.7, 3.7, 4.2, 5.2 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2

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

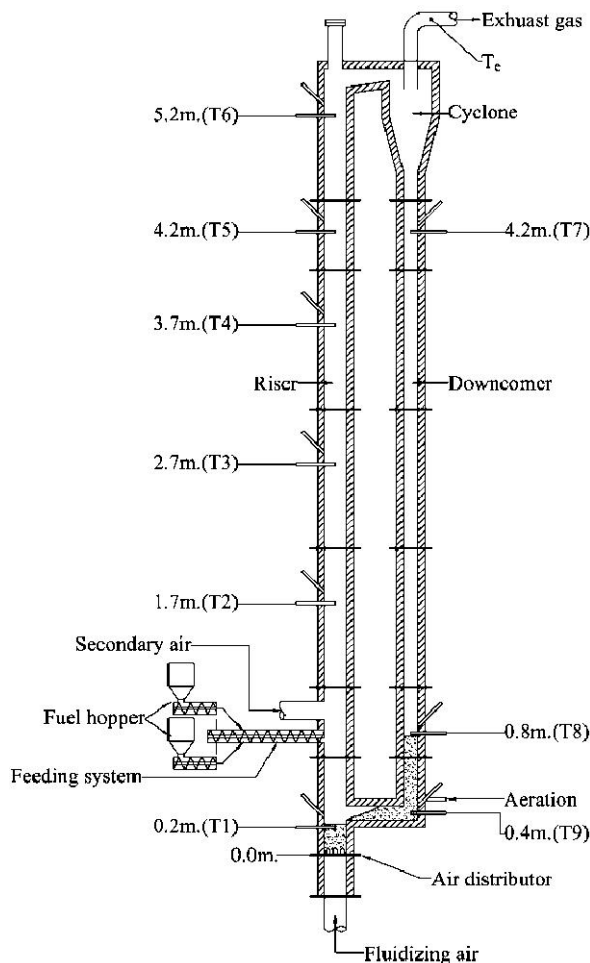
ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากบรรจุทรายปริมาณ 20 kg เข้าสู่เตาเผาไหม้จากนั้นปรับความเร็วอากาศส่วนที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไคเซชันที่ประมาณ 5 m/s เพื่อให้ทรายเกิดการฟุ้งกระจายและหมุนเวียนภายในเตาเผาไหม้ จากนั้นทำการอุ่นระบบเตาเผาไหม้โดยใช้ชุดขดลวดความร้อนซึ่งมีกำลังงาน 50 kW จนกระทั่งอุณหภูมิเบด (T1) สูงในช่วง 320-350 $^{\circ}\text{C}$  ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง แล้วจึงเริ่มป้อนถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงนำร่องในปริมาณน้อยเข้าสู่เตาเผาไหม้เพื่อให้เกิดการลุกติดไฟเอง

## AEC-2031

### ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

Testing conditions	Run number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Fluidizing velocity (m/s)*	2.4	2.4	2.4	3.1	3.1	3.1	2.7	2.7
Fluidizing air flow (m <sup>3</sup> /h)	1.17	1.17	1.17	1.48	1.48	1.48	1.3	1.3
Mass Fraction (-)	0.88	0.88	0.88	0.93	0.91	0.76	0.71	0.67
Second air flow (L/min)	96	96	96	<b>60</b>	<b>96</b>	<b>414</b>	<b>474</b>	<b>594</b>
Mass Fraction (-)	0.07	0.07	0.07	0.04	0.06	0.21	0.26	0.30
L-valve (L/min)	65	65	65	57.44	57.44	57.44	70	70
Mass Fraction (-)	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Excess Air (%)	127	74	55	99	104	143	41	50
Fuel feed rate (kg/hr)	<b>6.70</b>	<b>7.83</b>	<b>8.82</b>	8.3	8.3	8.3	<b>13.38</b>	<b>13.38</b>

\*พิจารณาที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิประมาณ 30 °C



รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของเตาเผาไหม้ฟลูอิดิซิงแบบหมุนเวียน (CFBC)

ซึ่งทำให้อุณหภูมิเบดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อด่านไม้ที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่องแล้ว

จนถึงอุณหภูมิประมาณ 650-700°C จึงเริ่มป้อนเชื้อเพลิงถ่านหินลงไปในอัตราที่ต้องการเข้าสู่เตาเผาไหม้และปรับความเร็วลมที่ใช้ของอากาศส่วนต่างๆ ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 2 เมื่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 300-360 นาทีแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าของอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาที่ระดับความสูงต่างๆ จำนวน 6 ตำแหน่ง (T0-T6) ดังรูปที่ 2 โดยบันทึกผลในทุกช่วงเวลา 10 นาที และในการบันทึกองค์ประกอบของแก๊สไอเสียโดยใช้เครื่อง Gas Analyzer รุ่น Testo 350 XL ซึ่งสามารถวัดแก๊ส O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> และ SO<sub>2</sub> ส่วน CO<sub>2</sub> นั้นได้มาจากการคำนวณย้อนกลับจากปริมาณ O<sub>2</sub> ของเครื่องวัดสามารถวัดที่ตำแหน่งทางออกของเตาเผาไหม้

### 3. ผลการทดลอง

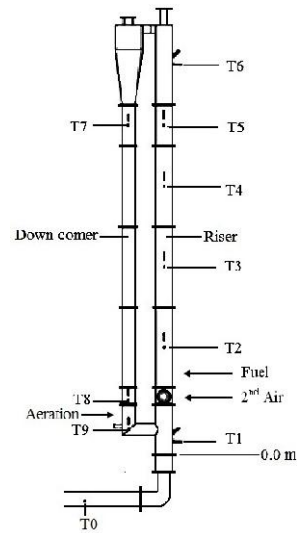
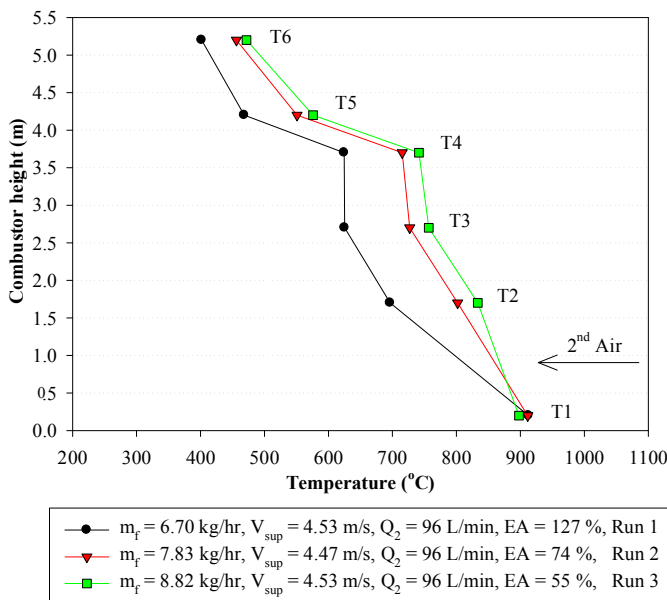
#### 3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูง

การกระจายอุณหภูมิตามระดับความสูงเตาภายใต้เงื่อนไขการปรับเปลี่ยนอัตราป้อนถ่านหินและปริมาณอากาศส่วนที่สองแสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ โดยพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้งสองกรณีมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ มีอุณหภูมิสูงสุดในเบดและมีแนวโน้มลดลงตามความสูง โดยในกรณีการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (Run no. 1-3) พบว่าอุณหภูมิในเบด (T1) มีค่าใกล้เคียงกันที่

## AEC-2031

900 °C (ดังรูปที่ 3) ส่วนการลดลงอย่างต่อเนื่องของอุณหภูมิตามความสูงท่อไรเซอร์ตั้งแต่ในเบด (T1 ความสูง 0.2 m) จนถึงระดับความสูง 2.7 m (T3) เป็นผลมาจากการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาสู่สิ่งแวดล้อม ในขณะที่การจ่ายอากาศส่วนที่สองซึ่งมีสัดส่วนอากาศเพียง 0.07 อาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้อุณหภูมิต่ำลง อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า อุณหภูมิในท่อไรเซอร์ในช่วงความสูง 2.7 ถึง 3.7 m (T3-T4) มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 600 °C ในกรณี Run no. 1 และ 700-720 °C สำหรับ Run no. 2-3 ในขณะที่ระดับความสูง 4.2 m (T5) มีอุณหภูมิต่ำลงประมาณ 150 °C ทั้งที่มีระยะต่างกันเพียง 50 cm ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่า ภายใต้การ

ทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (Run no. 1-3) การฟุ้งกระจายของเชื้อเพลิงที่ถูกจุดขึ้นมาจากเบดพร้อมกับแก๊สเผาไหม้ส่วนใหญ่จะลอยตัวถึงระดับ 3.7 m (T4) แล้วตกกลับไปสู่เบดจะเหลืออนุภาคบางส่วนที่จะไหลไปพร้อมกับแก๊สเผาไหม้เข้าสู่ไซโคลนและไหลเวียนกลับผ่านท่อดาวน์คัมเมอร์ จึงทำให้อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ระดับความสูง 4.2 m (T5) ลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การลดลงของอุณหภูมิที่ระดับ 5.2 m (T6) ก่อนเข้าไซโคลนนั้นได้รับผลจากการพาความร้อนของอากาศบริเวณดังกล่าว ซึ่งมีการเปิดพัดลมระบายความร้อนที่ติดตั้งเพื่อระบายอากาศให้กับเจ้าหน้าที่ที่บันทึกข้อมูลในบริเวณนั้น

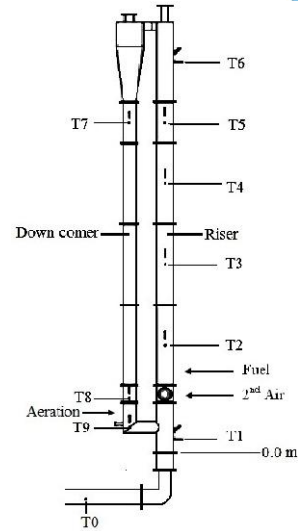
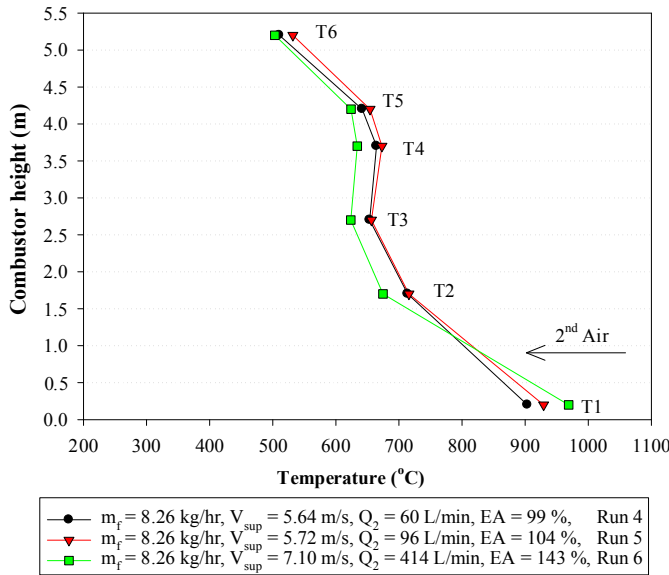


รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงของเตาเผาไหม้ภายใต้อัตราการป้อนเชื้อเพลิง

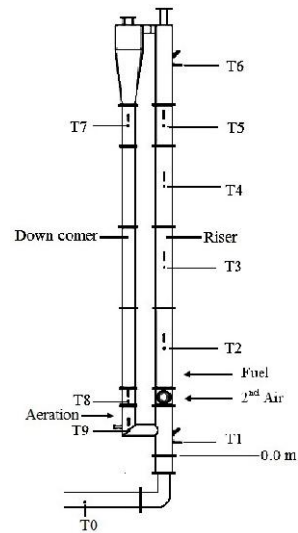
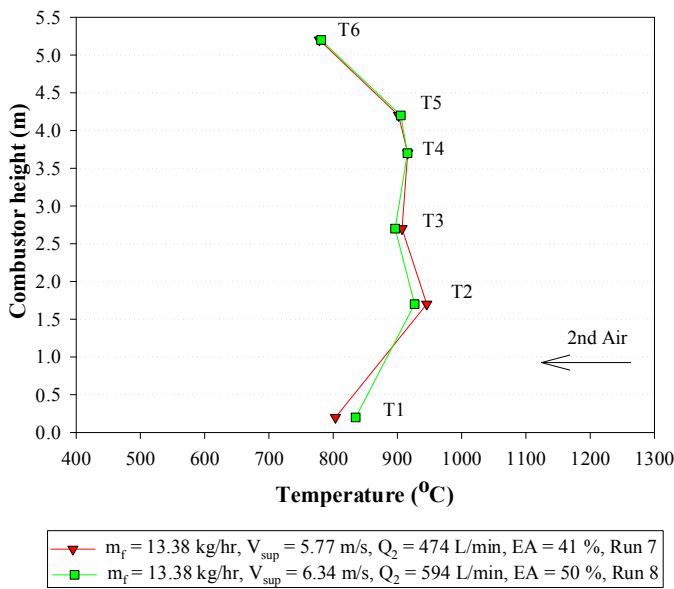
การกระจายอุณหภูมิภายในเตากรณีปรับเปลี่ยนอากาศส่วนที่สองในการทดลองที่ 4-6 (ดังรูปที่ 4) ซึ่งมีการใช้ความเร็วอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชัน (3.1 m/s) ที่สูงกว่าการทดลองที่ 1-3 (2.4 m/s) และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 8.26 kg/h พบว่าอุณหภูมิมิค่าสูงสุดในเบดในช่วง 900-980 °C ในขณะที่อุณหภูมิที่ระดับตั้งแต่ 2.7 ถึง 4.2 m (T3-T5) มีค่าใกล้เคียงกันระหว่าง 600-650 °C ซึ่งบ่งบอกถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอในช่วงดังกล่าว ทั้งนี้อุณหภูมิต่ำ

ใกล้เคียงกันที่ตำแหน่งที่ T4 และ T5 ในกรณี (Run no. 4-6) แตกต่างจากการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (Run no. 1-3) ซึ่งมีค่าลดลงนั้น คาดว่าเป็นผลของความเร็วแก๊สภายในเตา (Superficial velocity) ที่สูงขึ้นจากประมาณ 4-5 m/s เป็น 6-7 m/s ส่งผลให้อนุภาคเบดและเชื้อเพลิงที่กำลังเผาไหม้ถูกจุดให้ลอยขึ้นสูงถึงบริเวณดังกล่าว (T5) การเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สองส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาลดต่ำลง

**AEC-2031**



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงของเตาเผาไหม้ภายใต้ปริมาณอากาศส่วนที่สอง ( $m_f = 8.26 \text{ kg/h}$ )



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงของเตาเผาไหม้ภายใต้ปริมาณอากาศส่วนที่สอง ( $m_f = 13.38 \text{ kg/h}$ )

นอกจากนี้ เมื่อทำการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเป็น 13.4 kg/h (Run no. 7 and 8) ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนของอากาศส่วนที่หนึ่งต่อเชื้อเพลิง 8.0 kg-air/kg-fuel ซึ่งใกล้เคียงกับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ถ่านหินทางทฤษฎี (7.5 kg-air/kg-fuel) โดยมีปริมาณอากาศส่วนเกินโดยรวมในช่วง 41-50% พบว่าลักษณะการกระจายอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดคือ อุณหภูมิเบดมีค่าในช่วง 800-830 °C (ไม่ใช่ตำแหน่งสูงสุด) และมีค่า

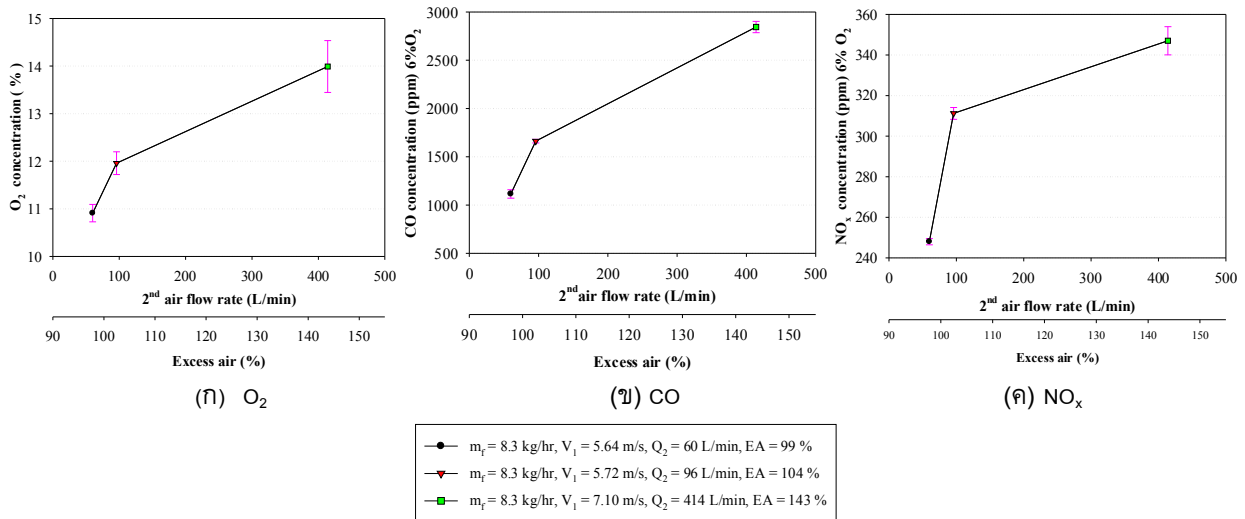
เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันในช่วงระดับความสูง 1.7 ถึง 4.2 m (T2-T5) โดยมีค่าในช่วง 850-930 °C ดังรูปที่ 5 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเบดที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากปริมาณอากาศส่วนเกินไม่เพียงพอ (11%) จึงทำให้เชื้อเพลิงลอยขึ้นไปเผาไหม้กับอากาศส่วนที่สองต่อภายในท่อไโรเซอร์ตลอดความสูงเตา การเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สองในกรณีนี้ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตามีแนวโน้มลดลงเช่นกัน

## AEC-2031

### 3.2 องค์ประกอบแก๊สมลพิษที่ทางออกเตา

องค์ประกอบแก๊สไอเสียของการทดลองปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนที่สอง (Run no. 4-6) แสดงดังรูปที่ 6 (ก)-(ค) ส่วนในการทดลองอื่นนั้นไม่ได้ทำการวัดและนำเสนอผลในบทความนี้ ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สองส่งผลให้ความเข้มข้นของ  $O_2$  ที่ทางออกเพิ่มสูงขึ้นจาก 10.9 เป็น 14% ดังรูปที่ 6 (ก) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สองยังส่งผลให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าจะปรับเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สองนี้เป็น 414 L/min ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนอากาศถึง 0.21 (21%) แล้วก็ตาม แต่เนื่องจากขนาดท่อจ่ายอากาศส่วนที่สองที่ค่อนข้างใหญ่ทำให้ความเร็วอากาศส่วนที่สองที่ไหลในท่อมียาค่าค่อนข้างต่ำเพียง 0.9 m/s

ซึ่งมีโมเมนต์ไม่เพียงพอที่จะทำให้กระแสเผาไหม้ในท่อโรเซอร์เกิดความปั่นป่วนในการเผาไหม้ หากแต่ได้แค่เพียงเข้าไปผสมกับแก๊สเผาไหม้แล้วทำให้อุณหภูมิต่ำลงและทำให้ความเร็วแก๊สในท่อโรเซอร์เพิ่มสูงขึ้น จนมีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่สั้นลง โดย CO ที่วัดได้มีค่าในช่วง 1115-2844 ppm ที่ระดับความเข้มข้นของ  $O_2$  ที่ 6% ดังรูปที่ 6(ข) สำหรับออกไซด์ของไนโตรเจน ( $NO_x$ ) พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศส่วนที่สองเช่นเดียวกัน โดยมีค่าในช่วง 248-347 ppm (ที่ 6%  $O_2$ ) ดังรูปที่ 6(ค) การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น  $NO_x$  ในไอเสียนั้น คาดว่าเกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากถ่านหินจำพวก HCN ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับ  $O_2$  กลายเป็น  $NO_x$  ได้ในที่สุด [14]



รูปที่ 5 องค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ภายใต้ปริมาณอากาศส่วนที่สอง

### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน ภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศส่วนที่สอง ซึ่งพิจารณาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นและแก๊สมลพิษที่ทางออกเตา สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเผาไหม้ถ่านหินเกิดขึ้นในเบดเป็นหลัก หากมีปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งซึ่งจ่ายในเบดที่เพียงพอ โดยการเพิ่มอัตราการป้อน

เชื้อเพลิงในกรณีนี้ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยในเตาเพิ่มสูงขึ้น

2. การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงสูงจนกระทั่งปริมาณอากาศในเบดไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ การเผาไหม้หลักเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดความสูงท่อโรเซอร์
3. การเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สองส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยในเตาลดลงในขณะที่ความเข้มข้นของ  $O_2$ , CO และ  $NO_x$  เพิ่มขึ้น โดยมีค่าของ  $O_2$  ในช่วง 10.9-14% สำหรับ

## AEC-2031

แก๊สมลพิษคือ CO และ NO<sub>x</sub> ที่ระดับความเข้มข้น O<sub>2</sub> 6% มีค่า 1115-2844 ppm และ 248-347 ppm ตามลำดับ

### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

### 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., Doğru, 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., Breerton, 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 สถิตเรืองศักดิ์ และฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2556). คุณลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน, *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัดนครนายก*
- [14] Zevenhoven R, Kilpinen P. (2002) Control of pollutants in flue gases and fuel gases. 2nd ed. Finland: Espoo/Turku.