



ผลกระทบของอัตราส่วนอากาศเผาไหม้และการจ่ายอากาศทุติยภูมิแบบขั้นต่อแก๊สมลพิษ  
จากการเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาไหม้ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน

Effects of Combustion Air Ratio and Multiple-stage Secondary Air Injection on  
Gaseous Emission from Coal Combustion in A Circulating Fluidized Bed  
Combustor (CFBC)

ธรรมนุญ อุดมมัน<sup>1</sup>, ประสาน สติยต์เรืองศักดิ์<sup>1\*</sup>, และ ฐานิตย์ เมธิยานนท์<sup>1</sup>

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

\*ติดต่อ: prasan\_mut@yahoo.com, 02-988-3655 ต่อ 3106, 02-988-3666

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสัดส่วนการจ่ายอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิ และตำแหน่งการจ่ายอากาศทุติยภูมิที่มีต่อองค์ประกอบแก๊สมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสใน CFBC โดยใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 11.7 kg/h และปริมาณอากาศเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศรวม ( $\lambda_{total}$ ) 1.27 ซึ่งใช้อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ ( $\lambda_{pA}$ ) ในช่วง 0.9-1.1 และอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิ ( $\lambda_{sA}$ ) ในช่วง 0.1-0.3 อากาศทุติยภูมิถูกจ่ายที่ระดับ 0.9 m และการจ่ายสองระดับคือ 0.9 และ 3.3 m พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ ส่งผลให้อุณหภูมิในเบดลดต่ำลงเล็กน้อยโดยอยู่ในช่วง 850-870°C แต่ทำให้ออกไซด์ของไนโตรเจน ( $NO_x$ ) ถูกปลดปล่อยเพิ่มมากขึ้น การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิเป็น 1.0 ในกรณีของตำแหน่งการจ่ายอากาศทุติยภูมิ พบว่าการจ่ายอากาศทุติยภูมิสองระดับ (0.9 และ 3.3 m) มีการปลดปล่อย  $NO_x$  ต่ำกว่าการจ่ายเพียงระดับเดียว (0.9 m)

**คำหลัก:** การเผาไหม้; ถ่านหิน; ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน; อากาศทุติยภูมิแบบขั้น

**Abstract**

The effects of combustion air ratio and multiple-stage secondary air injection on gaseous emission from bituminous coal combustion in a circulating fluidized bed combustor were investigated. The fuel feed rates, total excess air ratio, primary excess air ratio ( $\lambda_{pA}$ ) and secondary excess air ratio ( $\lambda_{sA}$ ) were 11.7 kg/h, 1.27, 0.9-1.1 and 0.1-0.3, respectively. Secondary air was supplied to the combustor at 0.9 m, and at both 0.9 m and 3.3 m. It was found that increasing primary excess air ratio had a cooling effect on the bed temperature which is in the range of 850-870°C and increased  $NO_x$  emission tendency. The minimum CO emission was achieved at primary excess air ratio of 1.0. In case of secondary air injection location, secondary air injection at both 0.9 m and 3.3 m released lower  $NO_x$  emission than secondary air injection at 0.9 m only.

**Keywords:** Combustion; Coal; Circulating fluidized bed; Multiple-stage secondary air.

## 1. บทนำ

ถ่านหินยังคงเป็นเชื้อเพลิงที่มีบทบาทสำคัญในการนำมาใช้เผาไหม้เพื่อผลิตเป็นความร้อนหรือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ภาคอุตสาหกรรมไปจนถึงโรงไฟฟ้า เนื่องจากถ่านหินมีปริมาณสำรองที่พอเพียงที่จะใช้ไปได้อีกเป็นระยะเวลานานกว่า 150 ปี โดยเทคโนโลยีการเผาไหม้ด้วยเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed; CFB) เพราะมีประสิทธิภาพการควบคุมการปลดปล่อยมลพิษสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แต่อย่างไรก็ตามต้องมีการปรับสภาวะการปฏิบัติงาน เช่น อุณหภูมิของเบด ปริมาณอากาศในการเผาไหม้ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง และสมบัติของเชื้อเพลิงให้เหมาะสมจากปัจจัยข้างต้นการปรับสภาวะของอากาศในการเผาไหม้สามารถทำได้ค่อนข้างสะดวกซึ่งได้มีการศึกษาในหลายรูปแบบและเชื้อเพลิงหลายชนิด โดยในการเผาไหม้ไม้ซิป (Wood-chips) ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนขนาด 12 MW ที่มีท่อโรเซอร์สูง 13.5 m ใช้อัตราส่วนอากาศรวม ( $\lambda_{\text{total}}$ ) 1.20 โดยการจ่ายอากาศหุตุยภูมิแบบขั้น (Air-staging) ที่ระดับ 2.2 m และ/หรือที่ไซโคลนสามารถลดการปลดปล่อย  $\text{NO}_x$  และ CO ได้ดี [1] ในขณะที่การศึกษาการเผาไหม้ชาร์ (Char) ของถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) ที่ได้จากการไพโรไลซิสแล้ว ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนขนาด 2 MW ที่มีท่อโรเซอร์สูง 15 m ใช้อัตราส่วนอากาศรวม 1.05-1.20 โดยการจ่ายอากาศหุตุยภูมิแบบขั้นที่ระดับ 1.5 m + 2.3 m และ 1.5 m + 3.9 m พบว่าการเพิ่มสัดส่วนและความสูงของตำแหน่งการจ่ายอากาศหุตุยภูมิทำให้การปลดปล่อย  $\text{NO}_x$  ลดลง [2] ส่วนผลการศึกษาการเผาไหม้ร่วมของลิกไนต์ (Lignite) และไม้ซิปในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนขนาด 30  $\text{kW}_{\text{th}}$  ที่มีท่อโรเซอร์สูง 6 m โดยการจ่ายอากาศหุตุยภูมิที่ระดับ 142, 233, 324 และ 415 cm พบว่าการเผาไหม้ที่มีไม้ซิปร้อยละ 30 เมื่อเพิ่มสัดส่วนอากาศหุตุยภูมิส่งผลให้มี

การปลดปล่อย CO มากขึ้น แต่  $\text{NO}_x$  ลดลงเล็กน้อย โดยความสูงของตำแหน่งการจ่ายอากาศหุตุยภูมิที่ทำให้การปลดปล่อยต่ำที่สุดคือ 142 cm แต่เมื่อใช้เชื้อเพลิงที่มีไม้ซิปเป็นร้อยละ 50 ต้องจ่ายอากาศหุตุยภูมิที่มีความสูงของ 324 cm เพื่อให้การปลดปล่อยมลพิษต่ำที่สุด [3]

จากผลการวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการควบคุมการปลดปล่อยมลพิษจากเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนต้องมีการทดลองเพื่อหาสภาวะการปฏิบัติงานที่เหมาะสมเพื่อให้มีการปลดปล่อยมลพิษเป็นไปตามกฎหมาย อีกทั้งยังไม่มีแนวทางหรือสภาวะการเผาไหม้ที่เฉพาะเจาะจง เพราะลักษณะการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่มีความหลากหลาย และปริมาณและลักษณะการจ่ายอากาศในการเผาไหม้เป็นหลักนั่นเอง

สำหรับประเทศไทยนั้นมิงงานวิจัยในด้าน CFBC ค่อนข้างน้อยทำให้ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศเป็นหลัก แต่แนวโน้มของความต้องการนำ CFBC มาใช้ในภาคอุตสาหกรรมเพิ่มสูงขึ้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ต่อการเผาไหม้ใน CFBC โดยคณะวิจัยได้ทำการวิจัยอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับการเผาไหม้ใน CFBC โดยใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น ไม้อัดเม็ด [4] และถ่านหินบิทูมินัส [5] สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงคุณลักษณะและสมรรถนะการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนอากาศหุตุยภูมิแบบขั้น โดยปริมาณอากาศเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศรวม ( $\lambda_{\text{total}}$ ) คงที่ต่อองค์ประกอบแก๊สมลพิษ

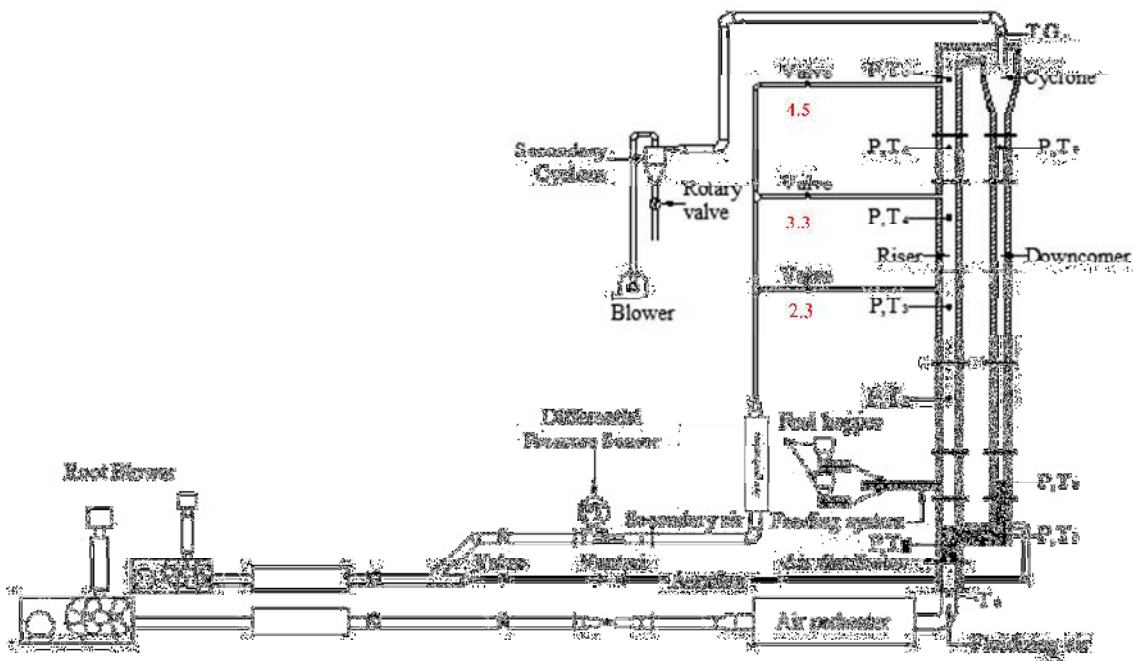
## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 เตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน

แผนผังอุปกรณ์ของเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยท่อโรเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 mm สูง 6 m และท่อดาวนคัมเมอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100

mm โดยท่อทั้งสองนี้ได้มีการหล่อซีเมนต์ทนไฟหนา 5 cm เพื่อลดการสูญเสียความร้อนออกสู่อากาศภายนอก ซึ่งท่อไรเซอร์และท่อดาวนคัมเมอร์ถูกเชื่อมต่อกันทางด้านบนด้วยไซโคลนดักจับอนุภาค และเชื่อมต่อกันด้านล่างด้วยท่อป้อนกลับเป็นแบบแอล-วาล์ว (L-valve) สำหรับการจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้มีสามส่วนคือ 1) อากาศปฐมภูมิถูกจ่ายผ่านแผ่นกระจายอากาศ (Air distributor) แบบหัวฉีดจำนวน 6 หัว เพื่อทำให้อนุภาคเบดเกิดการฟลูอิดเซชัน

ลมระบาย (Induced fan) ให้ไหลผ่านไซโคลนดักเก็บถ่าน ซึ่งด้านล่างมีชุดโรตารีเป็นตัวป้องกันอากาศรั่วไหลย้อนกลับ สำหรับการอุ่นอากาศ และทำระบบให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงเริ่มต้นการทดลองโดยใช้ชุดลดความร้อน (Air preheater) อนุภาคเบดที่ใช้เป็นทรายที่มีขนาดเฉลี่ย 300  $\mu\text{m}$  ปริมาณ 16 kg ทำให้มีระดับความสูงของเบดนิ่งประมาณ 40 cm



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์ของเตาเผาไหม้ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียน (CFBC)

2) อากาศทุติยภูมิซึ่งถูกจ่ายที่ระดับความสูงประมาณ 0.9 m และ 3.3 m เหนือแผ่น 3) อากาศที่ท่อเติมอากาศเพื่อช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาคจากท่อดาวนคัมเมอร์หมุนเวียนไปยังท่อไรเซอร์ได้อย่างต่อเนื่อง แก๊สไอเสียจะถูกดูดออกกระจายอากาศเพื่อช่วยในการเผาไหม้สารระเหยและแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น ด้วยพัด

## 2.2. องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ ถ่านหินบิทูมินัส ขนาดประมาณ 3-5 mm ซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงโดยละเอียดสามารถแสดงในตารางที่ 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

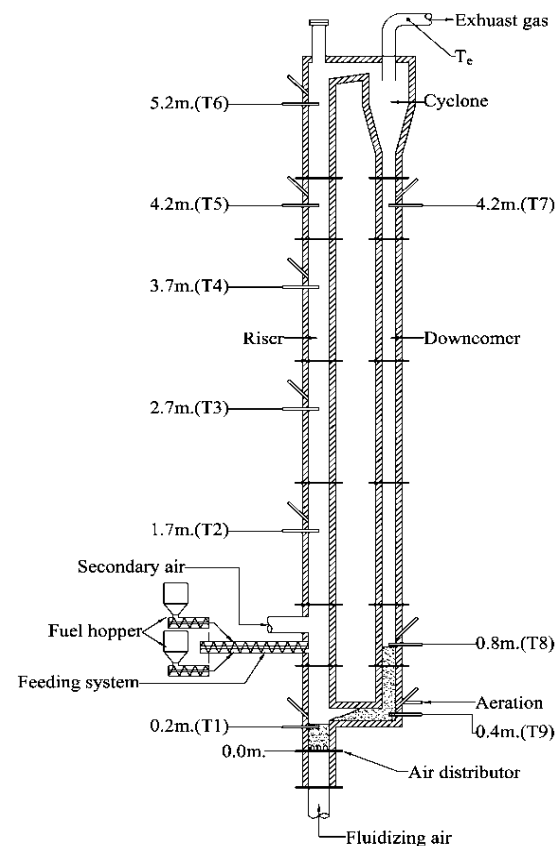
### 2.3 การวัดและวิธีการทดลอง

การวัดปริมาณอากาศแต่ละส่วนที่ใช้ในการทดลองใช้ เวนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างกันซึ่งมีความคลาดเคลื่อน  $\pm 3\%$  ของย่านการวัด

การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับสกรูป้อนเชื้อเพลิง ส่วนการวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเบิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผล ซึ่งฝั่งท่อไรเซอร์ทำการวัดจำนวน 6 ตำแหน่งคือ 0.2, 1.7, 2.7, 3.7, 4.2, 5.2 m เหนือแผ่นกระจายอากาศดังในรูปที่ 2

การทดลองเริ่มจากบรรจุทรายเข้าสู่เตาเผาไหม้แล้วจ่ายอากาศและปรับความเร็วอากาศส่วนที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ประมาณ 5 m/s เพื่อให้ทรายเกิดการฟุ้งกระจายและหมุนเวียนในเตาเผาไหม้ จากนั้นอุ่นระบบเตาเผาไหม้ด้วยชุดขดลวดความร้อนขนาด 50 kW จนกระทั่งอุณหภูมิเบด (T1) สูงในช่วง 300°C แล้วจึงเริ่มป้อนถ่านหินบิทูมินัสขนาด 3-5 mm อย่างต่อเนื่องที่ 8 kg/h เป็นเชื้อเพลิงนำร่องเข้าสู่เตาเผาไหม้เพื่อให้เกิดการ

ลุกติดไฟเองจนอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้ถึง 800°C จึงป้อนถ่านหินบิทูมินัสในอัตราที่ต้องการเข้าสู่เตาเผาไหม้และปรับปริมาณอากาศส่วนต่างๆ ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลอง แล้วค่อยๆ ลดการให้ความร้อนจากชุดขดลวดความร้อน เมื่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าของอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาที่ระดับความสูงต่างๆ จำนวน 6 ตำแหน่ง (T0-T6) ดังรูปที่ 2 โดยบันทึกผลในทุกช่วงเวลา 10 นาที และบันทึกองค์ประกอบของแก๊สไอเสียโดยใช้เครื่องวิเคราะห์รุ่น Testo350XL ซึ่งสามารถวัดแก๊ส  $O_2$ , CO และ  $NO_x$  ได้



รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของเตาเผาไหม้ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียน (CFBC)

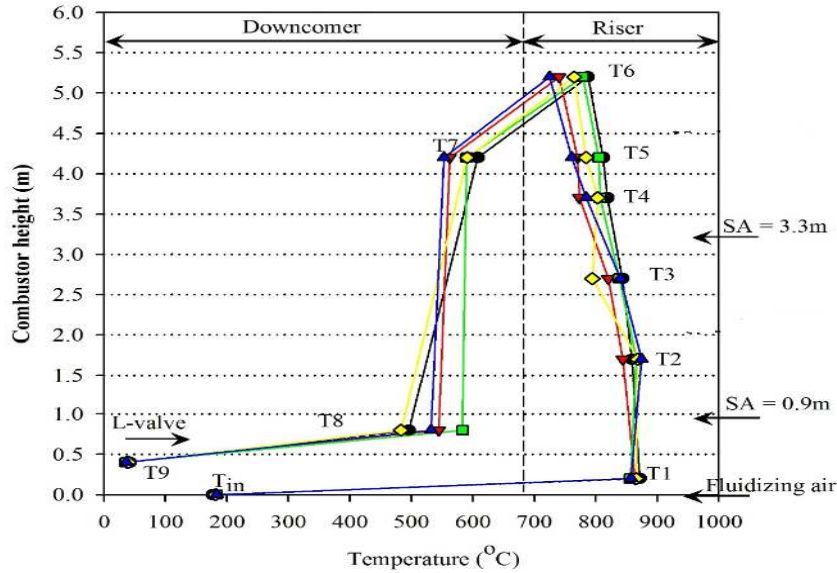
3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงของ CFBC

การกระจายอุณหภูมิแนวกึ่งกลาง CFBC ตามแนวระดับความสูงแสดงถึงพฤติกรรมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินบิทูมินัสที่ศึกษาภายใต้เงื่อนไขที่ปริมาณอากาศเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศรวม ( $\lambda_{total}$ ) 1.27 ซึ่งใช้อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ ( $\lambda_{PA}$ ) ในช่วง 0.9-1.1 และอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิ ( $\lambda_{SA}$ ) ในช่วง 0.1-0.3 ที่อากาศทุติยภูมิถูกจ่ายที่ระดับ 0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศและการจ่ายสองระดับคือ 0.9 และ 3.3 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ ดังรูปที่ 3

เมื่อพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิภายในท่อโรเซอร์ตามระดับความสูง พบว่าอุณหภูมิเบดเหนือหัวฉีดกระจายอากาศ (T1) มีค่าอยู่ในช่วงแคบๆ ระหว่าง 850-870°C โดยอุณหภูมิภายในท่อโรเซอร์ตลอดความสูงมีค่า

ใกล้เคียงกันและสม่ำเสมอตลอดระดับความสูงในทุกเงื่อนไขการทดลองซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของการเผาไหม้ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยในช่วง T1-T2 มีอุณหภูมิใกล้เคียงกันเนื่องจากเมื่อเชื้อเพลิงถ่านหินบิทูมินัสได้รับความร้อนแล้วจะเผาไหม้คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ที่เบดเป็นหลักและปลดปล่อยสารระเหยได้ที่แสดงในตารางที่ 1 มาเผาไหม้ในช่วงความสูงที่วัดอุณหภูมิ T1-T2 ซึ่งพฤติกรรมของการเผาไหม้ดังกล่าวแตกต่างจากการเผาไหม้ชีวมวลที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดที่ระดับความสูง T2 เพราะชีวมวลมีปริมาณสารระเหยได้สูงมากกว่าคาร์บอนคงตัวอย่างมากจึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่เหนือเบดเป็นหลัก [4] และแสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงส่วนใหญ่เกิดการเผาไหม้ที่ระดับความสูง 0.2-1.5 m (T1-T2) เพราะมีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งอื่นซึ่งเป็นผลมาจากอากาศปฐมภูมิที่เกิดการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงนั่นเอง



●	Lab 1: $\lambda_{PA} = 1.0, \lambda_{SA} = 0.2, \lambda_{LV} = 0.07, \lambda_{total} = 1.27, SA \text{ pos.} = 0.9 \text{ m}$
▼	Lab 2: $\lambda_{PA} = 0.9, \lambda_{SA} = 0.3, \lambda_{LV} = 0.07, \lambda_{total} = 1.27, SA \text{ pos.} = 0.9 \text{ m}$
■	Lab 3: $\lambda_{PA} = 1.1, \lambda_{SA} = 0.1, \lambda_{LV} = 0.07, \lambda_{total} = 1.27, SA \text{ pos.} = 0.9+2.3 \text{ m}$
◆	Lab 4: $\lambda_{PA} = 1.0, \lambda_{SA} = 0.2, \lambda_{LV} = 0.07, \lambda_{total} = 1.27, SA \text{ pos.} = 0.9+2.3 \text{ m}$
▲	Lab 5: $\lambda_{PA} = 0.9, \lambda_{SA} = 0.3, \lambda_{LV} = 0.07, \lambda_{total} = 1.27, SA \text{ pos.} = 0.9+2.3 \text{ m}$

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงของเตาเผาไหม้ของการทดลอง



ขณะที่อุณหภูมิในช่วง T2-T6 มีแนวโน้มลดลงซึ่งในช่วงนี้มีความหนาแน่นของอนุภาคเบตต่ำ (Dilute phase) และอุณหภูมิลดลงมาต่ำสุดที่ T6 เหตุผลที่อุณหภูมิในช่วง T2-T6 ลดลงอย่างต่อเนื่องเพราะปริมาณอากาศปฐมภูมิได้ถูกใช้ในการเผาไหม้ช่วง T1-T2 ไปเกือบหมดแล้วตามเงื่อนไขการทดลองที่ใช้อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ ( $\lambda_{PA}$ ) ในช่วง 0.9-1.1 ถึงแม้ว่าจะมีการจ่ายอากาศทุติยภูมิเข้ามาแต่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิภายในท่อโรเซอร์มากและอากาศทุติยภูมิที่ต้องใช้เวลาเพื่อให้เกิดการผสมคลุกเคล้า (mixing) เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่เหลือ ดังนั้น การลดลงของอุณหภูมิในช่วง T2-T6 จึงเป็นผลจาก cooling effect ของอากาศทุติยภูมิ

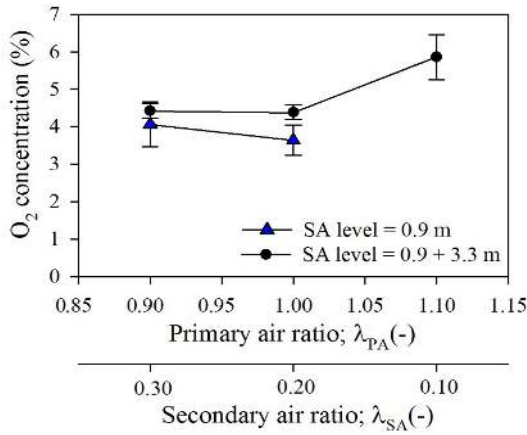
สำหรับฝั่งดาวน์คัมเมอร์พบว่าอุณหภูมิของแก๊สและอนุภาคเบตที่เวียนกลับผ่านทางไซโคลนอยู่ในช่วง 480-620°C (T7-T8) ในทุกเงื่อนไขการทดลองซึ่งยังคงมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง นั้นแสดงให้เห็นว่ามีการอัตราการไหลเวียนกลับของอนุภาคเบตและเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดที่ค่อนข้างสูง ส่วนที่ตำแหน่งแวลวาล์ว (L-valve) พบว่าอุณหภูมิในทุกเงื่อนไขต่ำลงอย่างชัดเจนเนื่องจากที่ตำแหน่งนี้มีอนุภาคทรายจำนวนหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เสมือนวาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับมาด้านท่อดาวน์คัมเมอร์และมีการจ่ายอากาศที่อุณหภูมิห้องจำนวนหนึ่งเข้ามาเพื่อเป็นช่วยควบคุมให้เกิดการไหลของอนุภาคเบตเข้าสู่ท่อโรเซอร์อย่างต่อเนื่องจึงทำให้เห็นว่าอุณหภูมิ T9 ลดลงต่ำอย่างมาก

เมื่อพิจารณาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศทุติยภูมิแบบขั้นต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงของเตาเผาไหม้จากรูปที่ 3 โดยกรณีที่ใช้อัตราส่วนอากาศทุติยภูมิ ( $\lambda_{SA}$ ) เป็น 0.2 (Lab 1) และ 0.3 (Lab 2) ที่ถูกจ่ายที่ระดับ 0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ จะเห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิตามความสูงของเตาเผาไหม้ที่ใช้  $\lambda_{SA}$  เป็น 0.2 สูงกว่าการใช้  $\lambda_{SA}$  เป็น 0.3 แม้ว่าจะมีอุณหภูมิที่เบต (T1) ใกล้เคียงกันก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิทำให้ความหนาแน่นอนุภาค

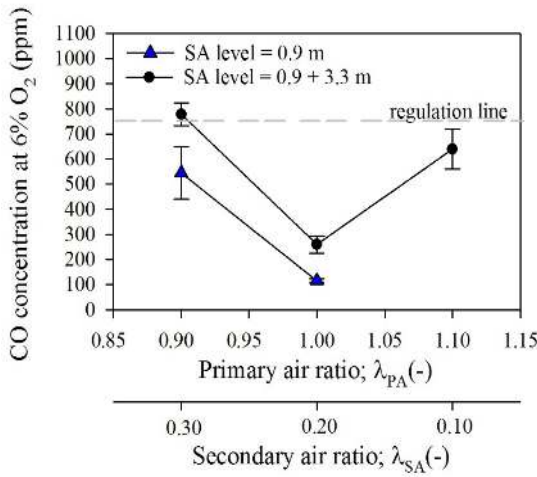
เบตที่มีอุณหภูมิสูงตามความสูงเตาเผาไหม้ลดลงหรืออัตราการไหลเวียนกลับของอนุภาคเบตที่มีอุณหภูมิสูงลดลง [6] และเป็นที่น่าสังเกตว่าการเพิ่มอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิหรืออัตราส่วนอากาศปฐมภูมิลดลงไม่ได้เพิ่มอุณหภูมิในช่วงอนุภาคเบตหนาแน่น (dense phase) หรือที่ระดับความสูง 0.2-1.5 m (T1-T2) แต่กลับแสดงผลของ cooling effect ของอากาศทุติยภูมิอย่างไรก็ตามยิ่งเพิ่มอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิทำให้อุณหภูมิในช่วงอนุภาคเบตเจือจาง (dilute phase) หรือที่ระดับความสูงในช่วง T2-T6 ยิ่งลดลง เพราะว่าทำให้ความหนาแน่นอนุภาคเบตในช่วง dense phase สูงมากขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นอนุภาคเบตในช่วง dilute phase ยิ่งลดลง [3] ส่วนกรณีการทดลองที่ใช้อัตราส่วนอากาศทุติยภูมิ ( $\lambda_{SA}$ ) ในช่วง 0.1 (Lab 3), 0.2 (Lab 4) และ 0.3 (Lab 5) ที่อากาศทุติยภูมิถูกจ่ายสองระดับคือ 0.9 และ 3.3 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ ก็ให้ผลที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือการเพิ่ม  $\lambda_{SA}$  ทำให้อุณหภูมิตามความสูงเตาเผาไหม้ลดลงมากกว่าเช่นเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกรณีที่ใช้  $\lambda_{SA}$  เท่ากัน พบว่าการจ่ายอากาศทุติยภูมิแบบสองระดับคือ 0.9 และ 3.3 m มีอุณหภูมิตามความสูงเตาเผาไหม้ในช่วง dilute phase ต่ำกว่าการจ่ายอากาศทุติยภูมิที่ 0.9 m

### 3.2 องค์ประกอบแก๊สมลพิษที่ออกจากเตาเผาไหม้

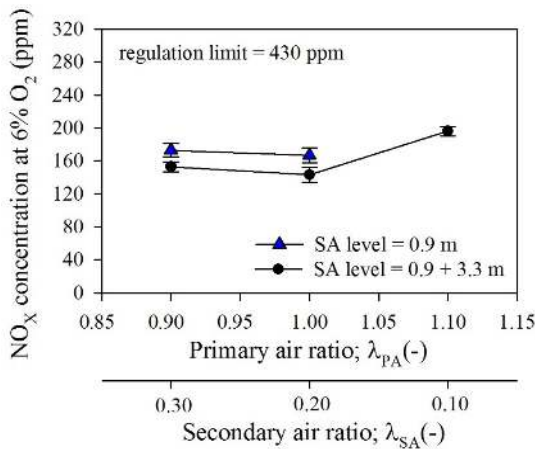
ผลกระทบการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิ ( $\lambda_{SA}$ ) ในช่วง 0.1-0.3 ของการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสต่อองค์ประกอบแก๊สมลพิษที่ออกจากเตาเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 4 (ก)-(ค) โดยใช้แนวทางการจ่ายอากาศทุติยภูมิแบบสองระดับคือ 0.9 และ 3.3 m เทียบกับการจ่ายอากาศทุติยภูมิที่ระดับ 0.9 m เพียงอย่างเดียว ซึ่งเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเบตที่ระดับความสูง 0.2-1.5 m ด้วยปริมาณอากาศที่จำกัดเพื่อที่จะลดโอกาสการเกิด  $\text{NO}_x$  จากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับไนโตรเจนในเชื้อเพลิง



(ก) O<sub>2</sub>



(ข) CO



(ค) NO<sub>x</sub>

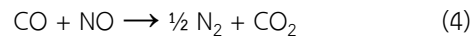
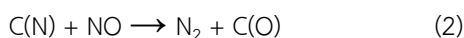
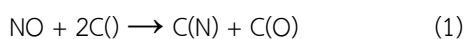
รูปที่ 4 องค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ถ่านหิน  
 บิทูมินัสภายใต้การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศหตุติภูมิ

จากรูปที่ 4 (ก) พบว่าการใช้อัตราส่วนของอากาศหตุติภูมิ ( $\lambda_{SA}$ ) ในช่วง 0.2-0.3 ที่การจ่ายอากาศหตุติภูมิแบบสองระดับคือ 0.9 และ 3.3 m มีความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ในแก๊สเผาไหม้มีเกือบคงที่ แต่การลดอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหตุติภูมิจาก 0.2 เป็น 0.1 ส่งผลให้ความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ในแก๊สเผาไหม้เพิ่มขึ้น เนื่องจาก  $\lambda_{SA}$  ในช่วง 0.2-0.3 มีความเร็วการไหลของแก๊สเผาไหม้ต่ำกว่าการใช้  $\lambda_{SA}$  เป็น 0.1 จึงมีระยะเวลาในการเผาไหม้นานกว่าทำให้สามารถใช้ออกซิเจนเพื่อเผาไหม้ได้ดีกว่า และยังเห็นได้ว่าการจ่ายอากาศหตุติภูมิแบบสองระดับคือ 0.9 และ 3.3 m มีความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ในแก๊สเผาไหม้สูงกว่าการจ่ายอากาศหตุติภูมิที่ระดับ 0.9 m เพียงอย่างเดียว เพราะว่าการจ่ายอากาศหตุติภูมิที่ระดับ 0.9 m เพียงอย่างเดียวมีระยะเวลาออกซิเจนเกิดการผสมและเกิดการเผาไหม้นานกว่า อีกทั้งการจ่ายอากาศหตุติภูมิแบบสองระดับที่ความสูงคือ 0.9 และ 3.3 m โดยเฉพาะที่ความสูง 3.3 m ทำให้มีระยะเวลาการเผาไหม้ที่น้อยกว่าและผลจาก cooling effect ของอากาศหตุติภูมิ

จากรูปที่ 4 (ข) แสดงความเข้มข้นของ CO ในแก๊สเผาไหม้ สำหรับการจ่ายอากาศหตุติภูมิแบบสองระดับคือ 0.9 และ 3.3 m เป็นที่น่าสังเกตว่าความเข้มข้นของ CO ในแก๊สต่ำสุดเมื่อใช้อัตราส่วนอากาศส่วนเกินหตุติภูมิเป็น 0.2 หรืออัตราส่วนอากาศส่วนเกินปฐมภูมิเป็น 1.0 นั่นคือเมื่อลดอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหตุติภูมิจาก 0.3 เป็น 0.2 แม้ว่าความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ในแก๊สเผาไหม้ลดลงเล็กน้อย และอุณหภูมิภายในท่อโรเซอร์ตามระดับความสูงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ส่งผลให้ความเข้มข้นของ CO ลดต่ำลงอย่างชัดเจนจาก 779 ppm เหลือเพียง 259 ppm (ที่ 6% O<sub>2</sub>) ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการใช้  $\lambda_{SA}$  เป็น 0.3 หรือ  $\lambda_{PA}$  เป็น 0.9 ซึ่งต่ำกว่าปริมาณที่เชื้อเพลิงต้องการสำหรับการเผาไหม้จึงทำให้เกิด CO จำนวนมากในช่วงความสูง 0.2-1.5 m ถึงแม้ว่าจะมีการจ่ายอากาศหตุติภูมิที่ระดับความสูง 0.9 และ 3.3 m แต่การจ่ายอากาศหตุติภูมิที่ความสูง 0.9 m อยู่ในช่วงอนุภาคเบด

หนาแน่นส่งผลให้การผสมเข้ากัน (Mixing) ของ CO ในแก๊สเผาไหม้กับอากาศหตุยภูมิไม่ผสมเข้ากันได้ดีพอ ส่วนการจ่ายอากาศหตุยภูมิที่ความสูง 3.3 m มีระยะเวลาการเผาไหม้ CO กับอากาศหตุยภูมิที่น้อยเกินไป แต่อย่างไรก็ตามการลดอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหตุยภูมิจาก 0.2 เป็น 0.1 ทำให้ความเข้มข้นของ CO เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 259 ppm เป็น 640 ppm (ที่ 6% O<sub>2</sub>) ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ในแก๊สเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากไม่ได้ถูกใช้เพื่อการเผาไหม้ เพราะว่าการใช้  $\lambda_{SA}$  เป็น 0.1 หรือ  $\lambda_{PA}$  เป็น 1.1 ส่งผลให้ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่เพิ่มสูงขึ้นตาม  $\lambda_{PA}$  ซึ่งทำให้ระยะเวลาการเผาไหม้ภายในเตาสั้นลงนั่นเอง สำหรับกรณีการจ่ายอากาศหตุยภูมิที่ระดับ 0.9 m เพียงอย่างเดียว แสดงแนวโน้มเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ที่  $\lambda_{SA}$  เท่ากันมีความเข้มข้นของ CO ต่ำกว่า เพราะมีระยะเวลาที่อากาศจะเกิดการเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้ได้นานกว่า

ผลกระทบของปริมาณอากาศหตุยภูมิต่อการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) แสดงดังรูปที่ 4 (ค) พบว่าความเข้มข้นของ NO<sub>x</sub> ในแก๊สเผาไหม้มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม  $\lambda_{SA}$  ในอีกด้านหนึ่งคือการลด  $\lambda_{PA}$  ซึ่งเป็นการลดความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> ให้ลดลงในช่วงการเผาไหม้ที่ระดับความสูง 0.2-1.5 m ซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิสูงสุด โดยเมื่อ  $\lambda_{SA}$  เพิ่มจาก 0.1 เป็น 0.3 มีผลทำให้ความเข้มข้นของ NO<sub>x</sub> มีค่าลดลงจาก 196 ppm เป็น 170 ppm (ที่ 6% O<sub>2</sub>) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน [2-3,5] เช่นเดียวกัน การที่  $\lambda_{SA}$  ในช่วง 0.2-0.3 มีความเข้มข้นของ NO<sub>x</sub> ในแก๊สเผาไหม้ต่ำกว่าที่  $\lambda_{SA}$  เท่ากับ 0.1 อาจเนื่องมาจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ [2] คือ การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ NO กับถ่านชาร์ ดังสมการที่ (1)-(3) และปฏิกิริยารีดักชัน NO โดย CO บนผิวของถ่านชาร์ ดังสมการที่ (4)



โดย C(), C(N) และ C(O) คือตำแหน่งบนผิวของถ่านชาร์ ตำแหน่งบนผิวของถ่านชาร์ที่มีไนโตรเจน และตำแหน่งบนผิวของถ่านชาร์ที่มีออกซิเจน ตามลำดับ

นอกจากปริมาณออกซิเจนแล้วความเข้มข้นของ NO<sub>x</sub> ในแก๊สเผาไหม้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิง และอุณหภูมิของเบด [2] เมื่อพิจารณาการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินบิทูมินัสในเบดที่ใช้  $\lambda_{PA}$  ในช่วง 0.9-1.0 อาจมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ยังไม่สมบูรณ์ส่งผลให้ในแก๊สเผาไหม้มีความเข้มข้นของ CO และเกิดปริมาณของชาร์ (Char) สูงซึ่งเกิดเป็นบรรยากาศรีดิวซิง (Reducing atmosphere) ที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของ NO<sub>x</sub> ดังสมการที่ (1)-(4) ได้ สำหรับกรณีการจ่ายอากาศหตุยภูมิที่ระดับ 0.9 m เพียงอย่างเดียว มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับข้างต้น โดยเมื่อเทียบที่  $\lambda_{SA}$  เท่ากันมีความเข้มข้นของ NO<sub>x</sub> ในแก๊สเผาไหม้ที่สูงกว่า

#### 4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศหตุยภูมิของการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียนภายใต้การปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศหตุยภูมิแบบขั้นต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นและแก๊สมลพิษที่ทางออกเตาเผาไหม้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเผาไหม้เกิดขึ้นตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ โดยมีอุณหภูมิในช่วงเบดหนาแน่น (T1-T2) ในช่วง 850-870°C สม่าเสมอตลอดความสูง การเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหตุยภูมิส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาช่วง T2-T6 ลดต่ำลง

2. การเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหตุยภูมิส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ CO ในสองลักษณะคือ มีค่าลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหตุยภูมิในช่วง 0.1-0.2 และมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราส่วน





อากาศส่วนเกินหุติยภูมิ 0.2-0.3 โดยอัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิที่ดีที่สุดในการศึกษานี้ ในแง่ของการปลดปล่อย CO ที่ต่ำสุดคือ  $\lambda_{SA}$  เป็น 0.2

3. ความเข้มข้นของ  $NO_x$  มีแนวโน้มลดลงขึ้น เมื่ออัตราส่วนอากาศส่วนเกินหุติยภูมิเพิ่มมากขึ้นในทุกเงื่อนไขการทดลองซึ่งมีค่า 153-196 ppm ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานการปลดปล่อยแก๊สไอเสีย

### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Lyngfelt A. and Leckner B. (1999). Combustion of wood-chips in circulating fluidized bed boilers-NO and CO emissions as functions of temperature and air-staging, *Fuel*, vol. 78, pp. 1065–1072.

[2] Zhiqiang Gong, Zhicheng Liu, Tuo Zhou, Qinggang Lu, and Yunkai Sun (2015). Combustion and NO Emission of Shenmu Char in a 2 MW Circulating Fluidized Bed, *Energy Fuels*, vol. 29(2), pp. 1219–1226.

[3] Murat Varol, T. Atimtay Aysel and Hayati Olgun. (2014). Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high sulfur-lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor: Part 2. Effect of secondary air and its location, *Fuel*, vol. 130, pp. 1–9.

[4] ประสาน สติตย์เรืองศักดิ์และฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2556). คุณลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุม

วิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัดนครนายก

[5] ประสาน สติตย์เรืองศักดิ์และฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2556). การเผาไหม้ถ่านหินปิทิมินส์ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 27, พัทยา จังหวัดชลบุรี

[6] Ersoy, L.E., Golriz, M.R., Koksai, M. and Hamdullahpur F. (2004). Circulating fluidized bed hydrodynamics with air staging: an experimental study, *Powder Technology*, vol. 145, pp. 25-33.