

อิทธิพลของอากาศทุติยภูมิในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน Influence of Secondary Air in Firing Various Fuels in a Circulating Fluidized Bed combustor

ประสาน สติธย์เรืองศักดิ์^{1*}, พิชิต แก้วโกสุม¹, ธรรมบุญ อุดมมัน², และ ฐานิตย์ เมธียนนท์¹

¹ ภาควิศวกรรมเครื่องกล, ² ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถนน เชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530
*ติดต่อ: prasan_mut@yahoo.com, 02-988-3655 ต่อ 3106, 02-988-3666

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการเผาไหม้เชื้อเพลิงเดี่ยวชนิดต่างๆ คือ ถ่านหินบิทูมินัส กะลาปาล์ม และไม้ยางพารา สับในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อโรเซอร์ 150 mm ความสูง 6 m ผลกระทบของการจ่ายอากาศทุติยภูมิ (SA) ต่อลักษณะการเผาไหม้และองค์ประกอบแก๊สไอเสียได้ถูกนำเสนอ ในทุกการทดลองใช้อัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวม (λ_{total}) คงที่ 1.27 อากาศทุติยภูมิซึ่งถูกแบ่งมาจากอากาศปฐมภูมิ (PA) ได้ทำการจ่ายแบบขั้นที่ระดับความสูง 0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ โดยมีอัตราส่วนอากาศเกินทุติยภูมิ (λ_{SA}) ในช่วง 0.22-0.30 ผลการทดลองพบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงทุกชนิดเกิดขึ้นค่อนข้างต่อเนื่องตลอดความสูงของท่อโรเซอร์โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่า 800°C และการแบ่งอากาศ PA มาจ่ายเป็น SA ส่งผลให้อุณหภูมิเบดเพิ่มสูงขึ้น ในแง่ขององค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ความเข้มข้นออกซิเจนส่วนเกิน 6% พบว่าการเผาไหม้ถ่านหินมีค่า CO ต่ำที่สุดในช่วง 193-354 ppm ในขณะที่การเผาไหม้ไม้ยางพาราสับมีค่าสูงมาก 1,917-22,300 ppm ส่วนกะลาปาล์มมีค่าในช่วง 712-830 ppm NO_x จากการเผาไหม้ถ่านหินมีค่าสูงสุดในช่วง 150-215 ppm ส่วน NO_x จากกรณีไม้ยางพาราสับและกะลาปาล์มมีค่าในช่วง 146-164 ppm และ 177-188 ppm ตามลำดับ ทั้งนี้การ SA แบบขั้นส่งผลให้ NO_x ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาสรุปได้ว่าการจ่าย SA ที่ระดับ 0.9 m เป็นสิ่งจำเป็นต่อการกำจัด CO แต่ส่งผลเสียต่อ NO_x ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทั้งสองชนิด

คำหลัก: กะลาปาล์ม; ถ่านหิน; ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน; ไม้ยางพาราสับ; อากาศทุติยภูมิ

Abstract

In this study, mono combustion of bituminous coal, para-woodchips, and palm shell were carried out in a circulating fluidized-bed combustor, 150 mm inside diameter and 6 m long of the riser. Effect of secondary air (SA) injection on combustion characteristics and gaseous emissions was also investigated. The total excess air ratio (λ_{total}) of 1.27 was held constant. The SA split from primary air (PA) was supplied as staged air at 0.9 m above the air distributor with the secondary air ratio (λ_{SA}) in the range 0.22-0.30. The results showed that all fuels were combusted continuously in the riser with the bed temperatures above 800 °C SA injection cases resulted in higher bed temperatures. In view of gaseous emission at 6% excess O₂, CO was the lowest for coal combustion, ranging 193-354 ppm. Para-woodchips derived CO in the range 1,917-22,300 ppm, while in the cases of palm shell were found in the range 712-830 ppm. NO_x released from coal combustion was the highest, ranging 150-215 ppm. NO_x in cases of woodchips and palm shell were in the ranges 146-164 ppm and 177-188 ppm respectively. Staged SA injection caused NO_x increment of biomass firing. The results concluded that SA injection at 0.9 m was requisite for CO reduction, but it was damaged for NO_x in firing both biomass fuels.

Keywords: Circulating fluidized bed; Coal; Para-woodchips; Palm shell; Secondary air

1. บทนำ

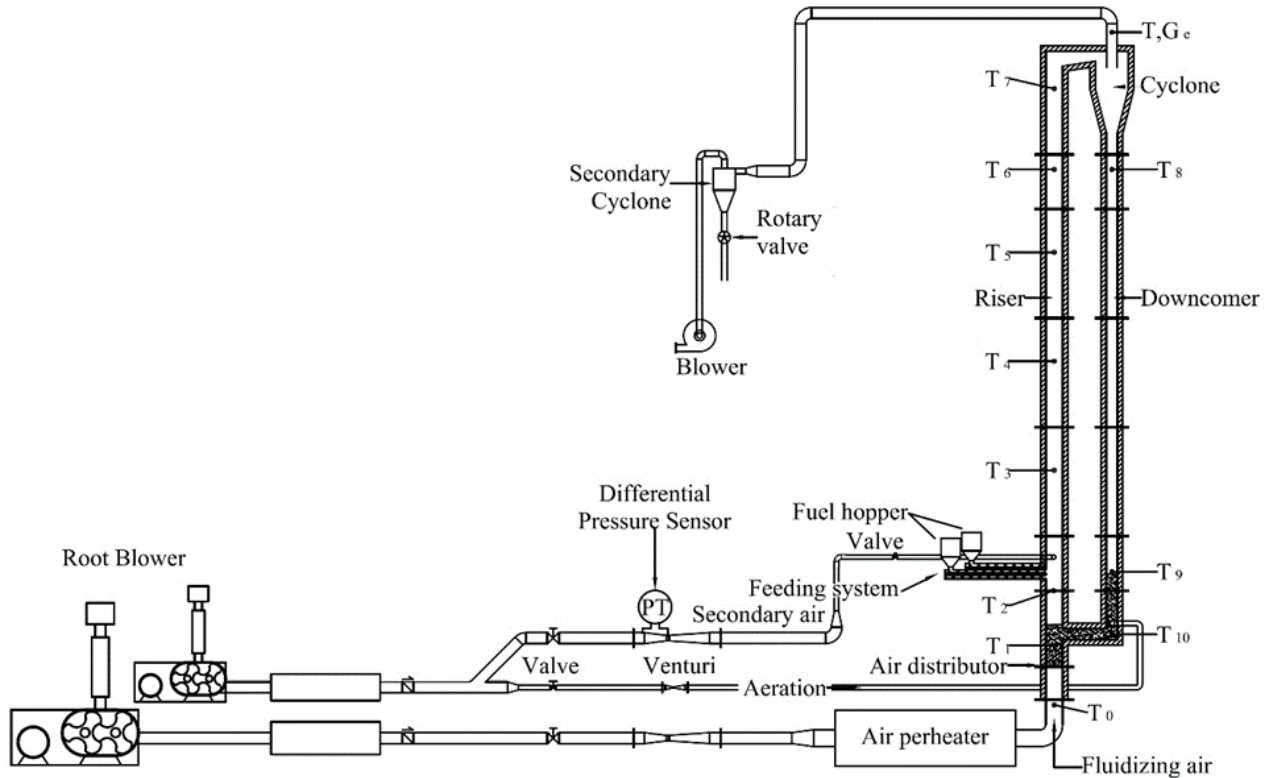
เทคโนโลยีการเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Combustion; CFBC) เป็นเทคโนโลยีเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง และปลดปล่อยมลพิษค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการเผาไหม้อื่นๆ เช่นเตาแบบตะกรับ เตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองแก๊ส และอีกมาก นอกจากนี้ยังสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งได้หลากหลายชนิดเช่น ถ่านหินประเภทต่างๆ และชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จากคุณสมบัติที่โดดเด่นของเทคโนโลยีการเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนจึงทำให้มีการใช้งานเทคโนโลยีดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่สองทศวรรษที่ผ่านมาและมีแนวโน้มที่จะใช้งานเพิ่มมากขึ้นในอนาคต [1,2] ประเทศเกษตรกรรมอย่างเช่นประเทศไทยมีเศษวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรจำนวนมากที่มีศักยภาพในเชิงพลังงานที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตความร้อนและไฟฟ้า โดยที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดจากจำนวนมาก เช่น ถ่านหินบิทูมินัส [3] เปลือกถั่ว [4] พางข้าว [5] เปลือกไม้ยูคาลิปตัส [6] แกลบ [7] และการเผาไหม้ร่วมของถ่านหินกับเปลือกมะกอก [8] ทั้งนี้ ตลอดระยะเวลา 9 ปีที่ผ่านมา คณะผู้วิจัยได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยี CFBC ทั้งด้านพฤติกรรมทางไฮโดรไดนามิกส์ในแง่ของปริมาณอากาศและอนุภาคเบด [9] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาอัตราส่วนอากาศของการเผาไหม้และการจ่ายอากาศแบบชั้น [10] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงประเทศไทย ชีวมวลที่มีศักยภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้คือเศษวัสดุจากกระบวนการแปรรูปทางการเกษตรต่างๆ เช่นปาล์มน้ำมัน และไม้ยางพารา ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้ทำการศึกษาทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ คือ ถ่านหินบิทูมินัส กะลาปาล์มและเชื้อเพลิงไม้ยางพาราสับภายใต้อัตราการผลิตความร้อน 100 kW_{th} ในเตาเผาไหม้ CFBC โดยทำการศึกษาผลกระทบของการแบ่งอากาศปฐมภูมิ (PA) ไปจ่ายเป็นอากาศทุติยภูมิ (SA) ที่ระดับความสูง 0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ โดยคงที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวม

(λ_{total}) 1.27 ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและการปลดปล่อยแก๊สไอเสีย

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFB)

ชุดทดลองเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้คือพัดลมจ่ายอากาศความดันสูง (Root blower) 2 ตัว ชุดชุดอุ่นอากาศแบบขดลวดทำความร้อน (Air preheater) ป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรูลำเลียง พัดลมระบาย (Induced fan) สำหรับส่วนประกอบหลักของเตาเผาไหม้ CFB ประกอบด้วยท่อไรเซอร์ (Riser) ไซโคลนตัวแรก (Primary cyclone) และท่อดาวนคัมเมอร์ (Downcomer) และวาล์วควบคุมการเวียนกลับแบบแอลวาล์ว (L-valve) โดยท่อไรเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 mm มีฉนวนกันความร้อนหนา 2.5 cm ความสูง 6.4 m ฝังดาวนคัมเมอร์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 mm โดยทั้งสองท่อจะมีการหล่อปูนทนไฟหนา 5 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน นอกจากนี้ท่อดาวนคัมเมอร์จะเชื่อมต่อกับไซโคลนตัวแรกเพื่อดักอนุภาคเบดและเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดให้เวียนกลับไปยังท่อเข้าท่อไรเซอร์อีกครั้งด้วยวาล์วควบคุมการเวียนกลับแบบแอลวาล์วซึ่งมีท่อเติมอากาศ (Aeration tap) ทั้งนี้ อากาศที่จ่ายเข้าสู่เตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) อากาศปฐมภูมิ (Primary air; PA) เป็นอากาศที่ก่อให้เกิดสถานะฟลูอิดเซชัน โดยอากาศถูกจ่ายผ่านด้านล่างแผ่นกระจายอากาศแบบหัวฉีด (Nozzle-type distributor-plate) จำนวน 6 หัว โดยอ้างอิงตำแหน่งต่างๆ จากแผ่นกระจายอากาศ 2) อากาศทุติยภูมิ (Secondary air; SA) เป็นอากาศที่จ่ายเพื่อช่วยในการเผาไหม้สาระเหยและแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่หมด โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัยที่ได้ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเดี่ยวและเชื้อเพลิงร่วมพบว่าการจ่ายอากาศทุติยภูมิที่ระดับ 0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศสามารถลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ลงอย่างเห็นได้ชัด [3,10]



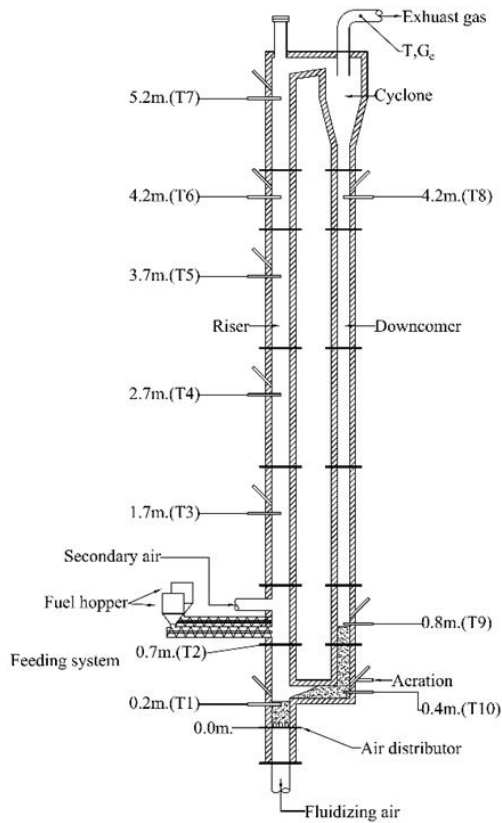
รูปที่ 1 แผนผังเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFB) ที่ใช้ในการทดลอง

3) อากาศจากท่อเติมอากาศแอลวาล์ว (Aeration tap; LV) เพื่อผลิตให้เกิดการไหลเวียนกลับของอนุภาคจากท่อดาวน์คัมเมอร์กลับเข้าสู่ท่อไรเซอร์อีกครั้งเพื่อทำการเผาไหม้ในท่อไรเซอร์ ส่วนแก๊สไอเสียจะถูกดูดออกจากไซโคลนตัวที่หนึ่งด้วยพัดลมระบายให้ไหลเข้าสู่ไซโคลนตัวที่สอง (Secondary cyclone) ที่คอยดักเก็ลลอยซึ่งด้านล่างจะมีชุดโรตารีช่วยป้องกันอากาศไหลย้อนกลับสำหรับชุดอุ่นอากาศ (Air Preheater) ถูกใช้อุ่นระบบในช่วงเริ่มต้นและอุ่นอากาศปฐมนุ้มนก่อนเข้าเตาเผาไหม้ ส่วนอนุภาคเบดใช้เป็นทรายซิลิกาที่มีขนาดเฉลี่ย 300 μm ปริมาณตามเงื่อนไขกำหนด ซึ่งเมื่อแบ่งเบดเติมเข้าสู่เตาเผาไหม้ทั้งสองท่อเท่าๆกันจะได้ระดับความสูงของเบดประมาณ 35-40 cm เหนือแผ่นกระจายอากาศ

2.2 การวัดและวิธีการทดลอง

ปริมาณอากาศที่เข้าเตาเผาไหม้ถูกควบคุมด้วยวาล์วของแต่ละส่วนและทำการวัดอัตราการไหลด้วยเวนจูรีที่ผ่านการสอบเทียบ (Calibration) ทำงานร่วมกับเซนเซอร์ความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ ของการวัด ส่วนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแต่ละชนิดถูก

ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนเชื้อเพลิงซึ่งแยกการควบคุมจากกันด้วยอินเวอร์เตอร์ควบคู่ไปกับการจับเวลามวลเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ (Feed rate) เป็นระยะเวลาตลอดช่วงการทดลอง การวัดอุณหภูมิ (T) ถูกติดตั้งไว้กึ่งกลางเตาเผาไหม้ทั้งสองฝั่งระหว่างการทดลองโดยใช้เทอร์คัมเปิลชนิด K คู่กับจอแสดงผล (Data logger) โดยฝั่งท่อไรเซอร์มีจุดวัดอุณหภูมิ 7 ตำแหน่ง ที่ระดับความสูง 0.2, 0.7, 1.7, 2.7, 3.7, 4.2, 5.4 m ซึ่งอ้างอิงตำแหน่งการวัดเหนือแผ่นกระจายอากาศ ส่วนฝั่งท่อดาวน์คัมเมอร์มีจุดวัดอุณหภูมิ 3 ตำแหน่ง คือ 0.4, 0.8, 4.2 m ดังรูปที่ 2 สำหรับองค์ประกอบแก๊สเผาไหม้ถูกวัดที่ตำแหน่งทางออกเตาเผาไหม้ (G_e) ได้ทำการวัดความเข้มข้นของแก๊สต่างๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแก๊ส Testo 350 ที่ใช้หลักการวัดด้วยเซลล์เคมี (Chemical cell) ซึ่งสามารถวิเคราะห์แก๊ส O_2 , CO_2 , CO และ NO_x ทั้งนี้ ผลแก๊สมลพิษที่จะรายงานของการศึกษานี้มีเพียง CO และ NO_x ซึ่งจะถูกแปลงไปยังระดับความเข้มข้นของ O_2 ที่ 6% เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFB)

เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบในทุกเงื่อนไขการทดลอง นอกจากนี้ ยังได้มีการปรับเปลี่ยนน้ำหนักเบดเพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไปเช่นกัน ขั้นตอนการอุ่นระบบให้ได้สภาวะที่ต้องการก่อนเข้าสู่เงื่อนไขการทดลองเริ่มจากบรรจุเบดทรายปริมาณตามเงื่อนไข โดยเติมเข้าสู่ท่อไรเซอร์และท่อดาวน์คัมเมอร์ฝั่งละเท่ากัน จากนั้นปล่อยอากาศปฐุมภูมิให้ไหลผ่านชุดอุ่นอากาศที่ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 650°C เพื่อให้อุณหภูมิเบดทรายฟุ้งกระจายเกิดเป็นสภาวะฟลูอิดเซชันแล้วรอจนกระทั่งอุณหภูมิเบด (T1) สูงถึง $300-400^{\circ}\text{C}$ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการป้อนถ่านหินปริมาณ 1 kg เข้าสู่เตาเผาไหม้ เพื่อเป็นเชื้อเพลิงนำร่องให้เกิดการติดไฟ ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิเบดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเกิดการหมุนเวียนของอนุภาคแล้วจึงทำการเติมอากาศแอลวาล์วเพื่อทำการผลัดดันอนุภาคให้เวียนกลับเข้าสู่ห้องเผาไหม้ สภาวะภายในเตาเผาไหม้จะเกิดการไหลหมุนเวียนของอนุภาค ขณะที่อุณหภูมิกำลังสูงขึ้นจะทำการเพิ่มอัตราการป้อนถ่านหินอย่างช้าๆ พร้อมทั้งปริมาณอากาศจนกระทั่งได้ตามปริมาณที่ต้องการ หลังจากนั้นรอเวลาให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิตลอดท่อไรเซอร์ (T1-T7) ประมาณ 800°C

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละชนิด

เงื่อนไขการทดลอง	การทดลองที่					
	1	2	3	4	5	6
เชื้อเพลิง	ถ่านหิน		กะลาปาล์ม		ไม้ยางสับ	
ตำแหน่งจ่ายอากาศทุติยภูมิ (m)	0	0.9	0	0.9	0	0.9
อัตราส่วนอากาศปฐุมภูมิ (λ_{PA})	1.2	0.9	1.22	1.0	1.2	0.9
อัตราส่วนอากาศทุติยภูมิ (λ_{SA})	0	0.3	0	0.22	0	0.3
อัตราส่วนอากาศที่แอลวาล์ว (λ_{LV})	0.07		0.05		0.07	
อัตราส่วนอากาศรวม (λ_{total})	1.27					
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/h)	16		18.2		20.9	
ปริมาณวัสดุเบด (kg)	16		17		19	
ความเร็วเทียบเท่าท่อเปล่า (m/s)*	5.03	4.39	5.77	5.03	5.82	4.73

* $V_{superficial}$ คำนวณจากปริมาณอากาศ PA และ LV ภายใต้อุณหภูมิเบด (T1) ของแต่ละการทดลอง

ในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงกะลาปาล์ม และไม้ยางพาราสับ ก็จะใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงนำร่องในการอุ่นเตา เช่นเดียวกันอยู่ โดยเมื่ออุณหภูมิภายในท่อโรเซอร์เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วก็จะเริ่มเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงเป็นกะลาปาล์มหรือไม้ยางพาราสับ โดยจะค่อยๆ ลดปริมาณถ่านหินลงและเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลให้ได้ตามอัตราการป้อนที่ต้องการตามตารางที่ 1

ผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไขจะเริ่มบันทึกเมื่อระบบตามเงื่อนไขที่กำหนดและระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวในของแต่ละการทดลอง โดยทำการเก็บค่าอุณหภูมิแนวกึ่งกลางที่ระดับความสูงต่างๆ จำนวน 10 ตำแหน่ง (T1-T10) ดังรูปที่ 2 และมีการบันทึกผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สไอเสีย (G_e) คือ O_2 , CO_2 , CO , NO_2 และ NO_x ทำการบันทึกผลทุกๆ 2 นาที เป็นเวลา 30 นาที

2.3 การวัดและวิธีทดลอง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองมีอยู่ 3 ชนิด 1) เชื้อเพลิงถ่านหินบิทูมินัสซึ่งจัดซื้อมาจากบริษัทที่นำเข้าจากประเทศอินโดนีเซียโดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 5-10 mm โดยจะนำไปตากแดดเพื่อลดความชื้นก่อนนำมาบดและร่อนให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-3 mm ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) 2) กะลาปาล์มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 mm ดังรูปที่ 3(ข) มีความคล้ายคลึงกับเชื้อเพลิงถ่านหิน โดยได้จัดซื้อมาจากบริษัท สุขสมบูรณ์ น้ำมันปาล์มจำกัด จังหวัดชลบุรี โดยจะนำมาตากเพื่อลดความชื้นของเชื้อเพลิงก่อนการทดลองเช่นเดียวกัน 3) ไม้ยางพาราสับเป็นการนำปลายไม้ที่ตัดทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเฟอร์นิเจอร์ของโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ในจังหวัดระยองไปทำการสับให้มีขนาดประมาณ 15x10 mm ดังรูปที่ 3(ค) ส่วนผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยประมาณและละเอียดของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 2



(ก) ถ่านหินบิทูมินัส



(ข) กะลาปาล์ม



(ค) ไม้ยางพาราสับ

รูปที่ 3 เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ CFB

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

Proximate analysis (wet.%)	Coal	Shell palm	Chipped Para-Wood
Fixed carbon	34.6	22.10	12.63
Volatile matter	53.5	63.50	69.6
Moisture	10.1	9.5	16
Ash	1.8	4.90	1.77
Ultimate analysis (wet.%)			
Carbon	56.85	49.95	39.05
Hydrogen	4.25	5.52	5.57
Oxygen	25.98	29.78	37.37
Nitrogen	0.84	0.31	0.21
Sulfur	0.18	0.045	0.03
Moisture	10.1	9.5	16
Ash	1.	4.90	1.77
LHV (MJ/kg)	22.50	19.80	17.25

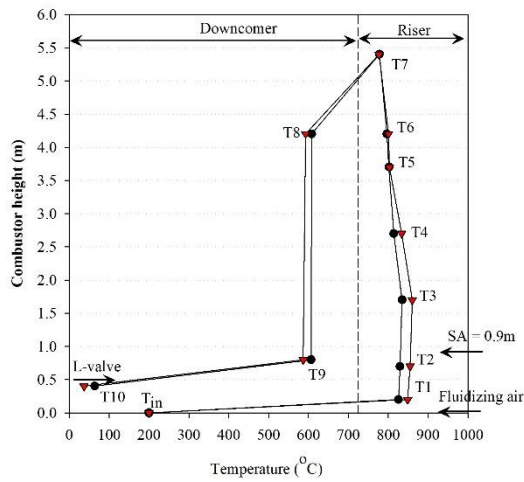
3. ผลการทดลอง

3.1 การกระจายของอุณหภูมิตลอดความสูงของ CFB

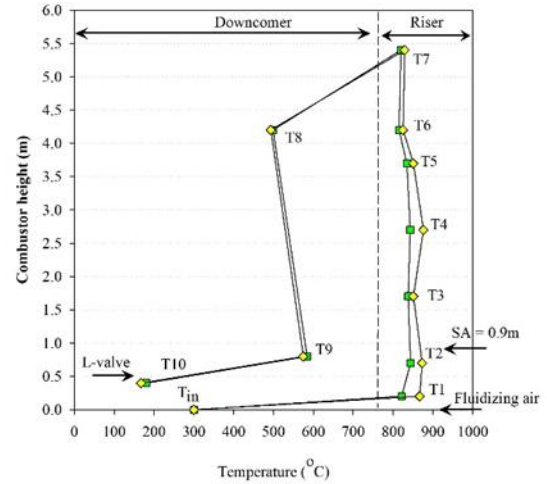
รูปที่ 4 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งในแนวกึ่งกลางตามระดับความสูงของท่อโรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ภายใต้อัตราการผลิตความร้อนที่ 100 kW รวมไปถึงการแบ่งอากาศ PA ไปจ่ายเป็น SA ที่ระดับความสูง 0.9 m ซึ่งจะคงอัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวม (λ_{total}) เท่ากับ 1.27 โดยพบว่ารูปแบบการกระจายอุณหภูมิในทุกการทดลองมีความคล้ายคลึงกันคือมีอุณหภูมิค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดความสูงของท่อโรเซอร์ โดยในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดอุณหภูมิเบดที่ระดับความสูง 0.2 m (T1) อยู่ในช่วง 790-880°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ในช่วงที่มีอนุภาคอย่างหนาแน่น ซึ่งถ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ จะส่งผลให้มีอุณหภูมิในเบดสูงบ่งบอกให้เห็นถึงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่หล่นลงในเบดส่วนในช่วงระดับความสูง 0.7-5.4 m (T2-T7) อนุภาคเบดจะเริ่มเบาบางลงตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากสภาวะฟลูอิดเซชันมีความเร็วอยู่ที่ประมาณ (4-6 m/s) ซึ่งอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า Fast fluidized bed อนุภาคบางส่วนจะหลุดออกมาจากจุดที่เบดหนาแน่นเล็กน้อย อุณหภูมิในช่วงนี้จะอยู่ที่ 770-880°C ในทุกการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละชนิด ซึ่ง

สาเหตุการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมาจากปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ไม่เท่ากัน ซึ่งไม่เพียงพอจะมีปริมาณสารระเหยที่สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ทำการเผาไหม้ในบริเวณดังกล่าว ส่วนฝั่งทวดาวน์คัมเมอร์ของทุกการทดลองอุณหภูมิที่ระดับความสูง 0.8-4.2 m (T8-T9) ซึ่งเป็นบริเวณที่อนุภาคเชื้อเพลิงและเบดที่ถูกไซโคลนดักจับทำการไหลผ่านบางส่วนเกิดการเผาไหม้เล็กน้อยเหนือเบดฝั่งทวดาวน์คัมเมอร์ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 500-600°C ในทุกเงื่อนไขการทดลอง และในส่วนบริเวณอนุภาคเบดหนาแน่น (T10) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอากาศแอสวาล์วเป็นตัวผลักดันอนุภาคกลับเข้าสู่ท่อโรเซอร์ซึ่งอากาศที่จ่ายมีอุณหภูมิค่าประมาณ 60-100°C

ในกรณีที่ทำกรแบ่งอากาศ PA จ่ายเป็นอากาศ SA ที่ระดับความสูง 0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ พบว่าอุณหภูมิตลอดท่อโรเซอร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 50°C เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่จ่าย PA เพียงอย่างเดียวในทุกชนิดของเชื้อเพลิง การทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ของสารระเหยที่ปลดปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิงกับอากาศ SA ที่จ่ายเข้าไปในบริเวณดังกล่าว ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอากาศ SA ที่จ่ายเข้าไปช่วยในการเผาไหม้ ซึ่งอาจจะส่งผลให้เห็นอย่างชัดเจนในแง่ของการปลดปล่อยแก๊สไอเสียของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



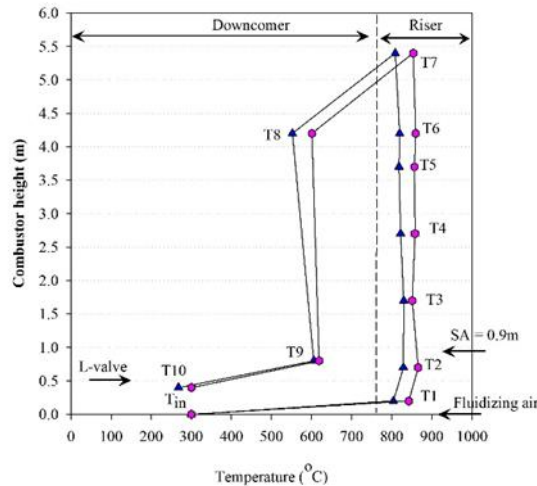
● Lab 1 : Coal, $m_b = 16$ kg, $\lambda_{PA} = 1.2$, $\lambda_{SA} = 0.0$, $\lambda_{LV} = 0.07$, $\lambda_{total} = 1.27$, NO SA
 ▼ Lab 2 : Coal, $m_b = 16$ kg, $\lambda_{PA} = 0.9$, $\lambda_{SA} = 0.3$, $\lambda_{LV} = 0.07$, $\lambda_{total} = 1.27$, SA pos = 0.9 m



■ Lab 3 : Shell, $m_b = 17$ kg, $\lambda_{PA} = 1.22$, $\lambda_{SA} = 0.0$, $\lambda_{LV} = 0.05$, $\lambda_{total} = 1.27$, NO SA
 ◆ Lab 4 : Shell, $m_b = 17$ kg, $\lambda_{PA} = 1.0$, $\lambda_{SA} = 0.22$, $\lambda_{LV} = 0.05$, $\lambda_{total} = 1.27$, SA pos = 0.9 m

(ก) การเผาไหม้ถ่านหิน

(ข) การเผาไหม้กะลาปาล์ม



▲ Lab 5 : Wood, $m_b = 19$ kg, $\lambda_{PA} = 1.2$, $\lambda_{SA} = 0.0$, $\lambda_{LV} = 0.07$, $\lambda_{total} = 1.27$, NO SA
 ● Lab 6 : Wood, $m_b = 19$ kg, $\lambda_{PA} = 0.9$, $\lambda_{SA} = 0.3$, $\lambda_{LV} = 0.07$, $\lambda_{total} = 1.27$, SA pos = 0.9 m

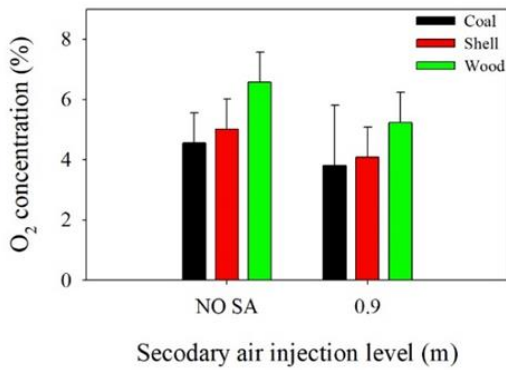
(ค) การเผาไหม้ไม้ยางพาราสับ

รูปที่ 4 ผลการกระจายอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียน

3.2 องค์ประกอบของแก๊สไอเสียในเตาเผาไหม้

องค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่พิจารณาหลักๆ คือ ออกซิเจน (O_2) ที่เหลือจากการถูกดึงไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ถูกผลิตออกมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิเผาไหม้ประมาณ $800^\circ C$ โดยภายใต้อุณหภูมิเผาไหม้ที่ไม่สูงนี้สามารถหลีกเลี่ยงการเกิด NO_x จากกลไก Thermal- NO_x แต่พิจารณาว่าส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา

ระหว่างไนโตรเจนในเชื้อเพลิง (Fuel-N) กับออกซิเจนในอากาศตามกลไก Fuel- NO_x โดยในทุกการทดลองจะคงอัตราอากาศส่วนเกินรวม (λ_{total}) เท่ากับ 1.27 และทำการปรับเปลี่ยนอากาศ PA บางส่วนไปจ่ายเป็นอากาศ SA ที่ระดับความสูง 0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ ทั้งนี้ผลความเข้มข้นของแก๊สมลพิษคือ CO และ NO_x ได้ถูกปรับให้อยู่ในระดับความเข้มข้นของ O_2 ที่ 6% เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5-7

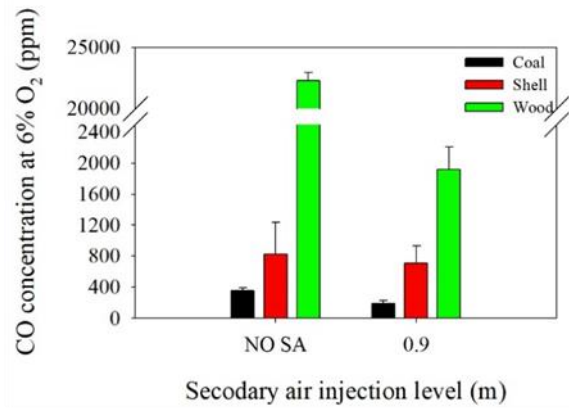


รูปที่ 5 ความเข้มข้นของ O₂ ที่ทางออกของเตาเผาไหม้

ผลการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ พบว่าค่าความเข้มข้นของ O₂ ในกรณีที่จ่ายอากาศ PA เพียงอย่างเดียว มีค่าอยู่ในช่วง 4.56-6.58% ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่ง O₂ ที่ถูกดึงไปทำปฏิกิริยาได้น้อยคือเชื้อเพลิงไม้ยางพาราสับ เนื่องจากความหนาแน่นของไม้สับมีค่าต่ำจึงทำให้มีเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งที่หล่นลงสู่เบด และอีกส่วนหนึ่งอาจจะปลิวขึ้นมาจากเบดโดยยังไม่ทำปฏิกิริยาในเบด ดังนั้นการจ่ายอากาศ PA อย่างเดียวทำให้อากาศไหลผ่านเบดอย่างรวดเร็วจึงมีอากาศบางส่วนยังไม่ทันปฏิกิริยาเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่แบ่งจ่ายอากาศ SA มีค่าอยู่ในช่วง 3.82-5.23% ซึ่งมีแนวโน้มลดลงจากกรณีที่จ่ายอากาศ PA เพียงอย่างเดียว โดยสาเหตุเกิดจาก PA ที่น้อยลงความเร็วอากาศที่ไหลผ่านเบดช้าลงจึงทำให้เกิดปฏิกิริยายาวนานขึ้น ประกอบกับการจ่ายอากาศ SA ที่ระดับ 0.9 m ทำให้กระแสแก๊สเกิดการหมุนวนในบริเวณเหนือแล้วเกิดการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิงแล้วทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ความเข้มข้นของ O₂ ลดลง

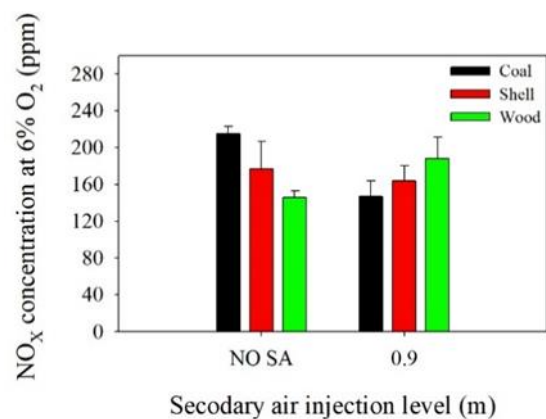
ในแง่ของความเข้มข้นของ CO ดังรูปที่ 6 พบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละชนิด โดยในกรณีที่จ่ายอากาศ PA เพียงอย่างเดียวมีค่า CO ที่สูงกว่ากรณีที่ทำกรแบ่งจ่ายอากาศ PA ไปจ่ายเป็นอากาศ SA โดยสาเหตุหลักมาจากการจ่ายอากาศ PA อย่างเดียวจะมีความเร็วอากาศไหลผ่านเบดที่สูงกว่าจึงทำให้ระยะเวลาการเผาไหม้ลดลง โดยในการเผาไหม้ถ่านหิน ค่า CO ลดต่ำลงจาก 354 เหลือ 193 ppm ส่วนในการเผาไหม้กะลาปาล์มมีค่า CO เพิ่มขึ้นกว่าถ่านหิน เพราะกะลาปาล์มมีสารระเหยที่มากกว่าถ่านหินจึงทำให้สารระเหยบางส่วนอาจหลุดลอดไปแล้ว

เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเมื่อทำการแบ่งอากาศ PA ไปจ่ายอากาศ SA พบว่าค่า CO ลดต่ำลงจาก 828 เหลือ 712 ppm



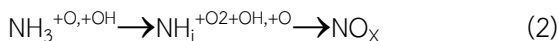
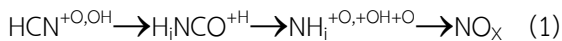
รูปที่ 6 ความเข้มข้นของ CO ที่ทางออกของเตาเผาไหม้

ส่วนกรณีเผาไหม้ไม้ยางพาราสับมีค่า CO สูงมากที่สุด 22300 ppm ซึ่งสูงที่สุด เนื่องมาจากไม้ยางพาราสับที่มีการปลดปล่อยสารระเหยสูงที่สุด นอกจากนี้ความหนาแน่นของไม้สับที่ต่ำและการใช้ λ_{PA} ที่สูง ทำให้เชื้อเพลิงหลุดลอยขึ้นไปเผาไหม้ส่วนบนของเตาเผาไหม้มากขึ้นจึงทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาล้นลงอีกด้วยเมื่อทำการจ่ายอากาศ SA ค่าความเข้มข้นของ CO ก็ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเหลืออยู่ที่ 1917 ppm บ่งบอกได้ว่าการจ่ายอากาศ SA ที่ระดับความสูง 0.9 m ส่งผลโดยตรงให้ค่า CO น้อยลง อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้น CO ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ 760 ppm มีเพียงเชื้อเพลิงถ่านหินและกะลาปาล์มที่มีการจ่ายอากาศ SA ที่ระดับความสูง 0.9 เท่านั้น

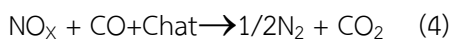
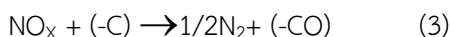


รูปที่ 7 ความเข้มข้นของ NO_x ที่ทางออกของเตาเผาไหม้

ในแง่ของการปลดปล่อย NO_x ที่ระดับความเข้มข้น O_2 ที่ 6% พบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ในกรณีที่จ่ายอากาศ PA เพียงอย่างเดียว มีค่าอยู่ในช่วง 147-215 ppm ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยมีค่าสูงสุดในกรณีของถ่านหินและต่ำสุดในกรณีไม้ยางพาราสับ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง NO_x มีความสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิง โดยกลไกของการเกิด NO_x มีทั้งปฏิกิริยาเนื้อเดียว (Homogeneous reaction) จึงมีโอกาสสูงที่จะทำปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนในเชื้อเพลิง (N-Fuel) ซึ่งปลดปล่อยในรูปสารประกอบไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ในถ่านหินและแอมโมเนีย (NH_3) ในเชื้อเพลิงชีวมวลที่ออกมากลายเป็น NO_x ตามสมการที่ (1) และ (2) [11]



การแบ่งจ่ายอากาศ PA ไปจ่ายเป็น SA คล้ายรูปแบบการจ่ายอากาศแบบขั้น (Air-staging) ส่งผลให้ความเข้มข้นของ NO_x ของเชื้อเพลิงถ่านหินและกะลาปาล์มลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3,10] การลดลงของ NO_x เกิดจากปริมาณ O_2 ในเบดที่ต่ำลงทำให้เกิดเป็นสภาวะไร้อากาศ (Reducing atmosphere) ในเบดที่ซึ่งมีอนุภาคถ่าน (Char) หรืออนุกรมคาร์บอน (-C) เป็นตัวช่วยเร่งการทำปฏิกิริยาเนื้อผสม (Heterogeneous reaction) ดังสมการที่ (3) และ (4) [12-14]



ในกรณีจ่ายอากาศ SA ของการเผาไหม้ไม้ยางพารา สับค่า NO_x เพิ่มขึ้นจาก 147 เป็น 188 ppm เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยที่ปลดปล่อยมากบริเวณเหนือเบด ซึ่งเมื่อจ่ายอากาศ SA เข้ามาในบริเวณตัวถั่ว จึงทำให้เกิดปฏิกิริยากลายเป็น NO_x เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ค่าความเข้มข้นของ NO_x ที่ปลดปล่อยออกมาในทุกกรณีของเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ 257 ppm

4. สรุปผลการทดลอง

จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่มีอัตราการผลิตความร้อนที่ 100 kW โดยคงที่อัตราอากาศส่วนเกินรวม (λ_{total}) เท่ากับ 1.27 และใช้อัตราส่วนอากาศส่วนเกินฟลูอิเดียมในช่วง 0.22-0.30 เพื่อศึกษาอิทธิพลของ

การจ่ายอากาศฟลูอิเดียมที่ระดับความสูง 0.9 m โดยพิจารณาจากการปลดปล่อยมลพิษ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การกระจายอุณหภูมิการจ่ายอากาศ SA ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย อุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ มีความสม่ำเสมอตลอดท่อโรเตอร์ (T1-T7) อยู่ในช่วง 790-880°C

2. ความเข้มข้นของ O_2 ในแก๊สไอเสียมีค่าลดลงเมื่อทำการแบ่งจ่ายอากาศ PA ไปจ่ายเป็นอากาศ SA โดยมีค่าลดลงจากช่วง 4.08-6.58% เหลือ 3.82-5.23% เนื่องด้วยการจ่ายอากาศ SA จะช่วยในการเผาไหม้สารระเหยโดยตรงส่งผลให้อากาศถูกดึงไปใช้มากขึ้น

3. การจ่ายอากาศ SA ที่ระดับความสูง 0.9 m ส่งผลให้ความเข้มข้นของ CO ต่ำลง ซึ่งเป็นผลมาจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้น โดยความเข้มข้น CO มีค่าลดลงจากในช่วง 354-22300 ppm ไปเป็น 193-1917 ppm ซึ่งมีการทดลองที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินและกะลาปาล์มที่แบ่งจ่ายอากาศ SA เท่านั้น ที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน 760 ppm

4. การจ่ายอากาศ SA แบบขั้นในการเผาไหม้สามารถช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลาย NO_x ส่วนหนึ่งซึ่งในทุกการทดลองค่าความเข้มข้นของ NO_x ในช่วง 147-215 ppm ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

5. อิทธิพลของการจ่ายอากาศ SA ที่ระดับความสูง 0.9 m ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ในเตาเผาไหม้ CFB พบว่าการจ่ายอากาศ SA ส่งผลต่อการปลดปล่อยมลพิษเป็นส่วนใหญ่ ในแง่ของการปลดปล่อย CO ที่ต่ำสุดคือ เชื้อเพลิงถ่านหินและกะลาปาล์มที่แบ่งจ่ายอากาศ SA ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครเป็นอย่างสูงที่ให้ทุนสนับสนุนในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Basu, P., Scott, A.F. (1991). Circulating fluidized bed boilers: design and operation, ISBN: 0-7506-9226-X, Halifax, Canada.

- [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 สถิตย์เรืองศักดิ์ และฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2560). อิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศแบบชั้นหลายระดับต่อการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านหินปิทูมินส์ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 31, จังหวัดนครนายก
- [4] 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.
- [5] Varul, M., Atimtay, A.T., Olgun, H., (2014). Emission characteristics of co-combustion of 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. 131, PP.1-9
- [6] Fang, M., Yang, L., Chen, G., Shi, Z., Lou, Z., Cen, K. (2004). Experimental study on rice husk in combustion in a circulating fluidized bed, *Biomass and Bioenergy*, Vol.85, PP.1273-1282.
- [7] 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.
- [8] 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
- [9] ปรัชญา บุญประสิทธิ์ และฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2554). อิทธิพลของความเร็วอากาศก่อให้เกิดฟลูอิดไคซ์และปริมาณเบดที่ส่งผลต่อพลศาสตร์การไหลของอนุภาคภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, จังหวัดกระบี่
- [10] ธรรมบุญ อุดมมัน ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์ และฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2560). ผลกระทบของอัตราส่วนอากาศเผาไหม้และการจ่ายอากาศทุติยภูมิแบบชั้นต่อแก๊สมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31, จังหวัดนครนายก
- [11] Saikaew, T., Supudommak, P., Mekasut, L., Piumsomboon, P. (2012). Emission of NO_x and N₂O from co-combustion of coal and biomass in CFB combustor, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 10, PP.26-32
- [12] Leckner, B., Karlson, M. (1993). Gaseous emission from circulating fluidized bed combustion of wood, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 4(5), PP. 379-389.
- [13] Tourunen, A., Saastamoinen, J., Nevalainen, H. (2009). Experimental trends of NO in circulating fluidized bed combustion, *Fuel*, Vol.88, PP.1333-1341.
- [14] Moritomi, H., Y. Suzuki, N. Kido., and Y. Ogisu (1990). NO_x emission and reduction from circulating fluidized bed technology III, Pergamon Press, Oxford, PP.399-404.