

การเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับไม้ยางพาราสับและไม้ยางพาราอัดเม็ดในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน Co-Firing of Coal with Chipped Para-wood and pelletized Para-wood in a Circulating Fluidized Bed combustor

ประสาน สติชัยเรืองศักดิ์^{1*}, เจษฎา แก้วกำลัต์¹, สรวุฒิ สังวรกาญจน์¹, และ ฐานิตย์ เมธิยานนท์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, ²ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

*ติดต่อ: prasan_mut@yahoo.com, 02-988-3655 ต่อ 3106, 02-988-3666

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสร่วมกับไม้ยางพาราในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนขนาดพิกัด 100 kW_{th} ไม้ยางพาราในสองลักษณะคือไม้สับและไม้อัดเม็ดถูกนำมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินในอัตราส่วนผสมของไม้ยางพารา:ถ่านหิน 80:20 (โดยความร้อน) และใช้อัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวม (λ_{total}) ที่ 1.34 นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศทุติยภูมิ (SA) ซึ่งแบ่งจากอากาศปฐมภูมิ (PA) มาจ่ายที่ระดับความสูง 0.9 และ 2.3 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ ด้วยอัตราส่วนอากาศส่วนเกินทุติยภูมิ (λ_{SA}) ในช่วง 0.12–0.22 ผลการศึกษพบว่า การเผาไหม้ร่วมของถ่านหินกับไม้ยางพาราทั้งสองรูปแบบเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดความสูงของท่อโรเซอร์ โดยมีอุณหภูมิเบดเฉลี่ยในช่วง 800–850°C การจ่าย SA ที่ระดับความสูงส่งผลให้อุณหภูมิเบดเพิ่มสูงขึ้น การเผาไหม้ไม้สับร่วมกับถ่านหินปลดปล่อย CO ในช่วง 289–2141 ppm ซึ่งสูงกว่ากรณีไม้อัดเม็ดที่มีค่า 112–194 ppm ตามลำดับ นอกจากนี้การจ่าย SA ในการเผาไหม้ไม้สับส่งผลให้ CO มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามระดับการจ่าย SA ในขณะที่กรณีของไม้อัดเม็ดให้ผลในทางกลับกัน การเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับไม้อัดเม็ดปลดปล่อย NO_x ในช่วง 148–213 ppm ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการใช้ไม้สับที่มีค่าในช่วง 208–270 ppm ตามลำดับ ส่วนการจ่าย SA ที่ระดับสูงขึ้นไปมีแนวโน้มให้ NO_x มีค่าลดลง จากการศึกษาสรุปได้ว่าการใช้ไม้อัดเม็ดเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินและการจ่ายอากาศ SA ที่ 2.3 m มีความเหมาะสมที่สุด

คำหลัก: ถ่านหิน; ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน; ไม้สับ; ไม้อัดเม็ด; อากาศทุติยภูมิ

Abstract

This paper summarizes the results of experimental study on co-firing bituminous coal with para-wood in a 100 kW_{th} circulating fluidized-bed combustor. Two forms of para-wood, i.e. chipped-wood (CW) and pelletized-wood (PW), were co-fired with the coal at the mixing ratio of 80:20 (energy basis). The total excess air ratio (λ_{total}) of 1.34 was held constant. Moreover, the effect of secondary air (SA) that was split from primary air (PA) and was selectively supplied at the levels of 0.9 and 2.3 m above the air distributor with the secondary air ratio (λ_{SA}) in the range 0.12–0.22 was also investigated. The results showed that uniform combustion occurred throughout the riser for co-firing coal with both forms of wood. The bed temperatures for all conditions were found in range 800–850 °C. Higher SA injection level resulted in higher bed temperature. Co-firing of CW with coal produced CO in the range 289–2141 ppm which was higher than the PW cases, ranging and 112–194 ppm. Increased SA level for CW cases caused CO enrichment, but vice versa for the PW cases. PW firing with coal released NO_x in the range 143–214 ppm which was lower than CW cases, ranging 208–270 ppm. Injection of SA in the higher position trended to decrease NO_x. The results concluded that co-firing PW with coal and SA injection level at 2.3 m were recommended.

Keywords: Chipped-wood; Circulating fluidized bed; Coal; Pelletized-wood; Secondary air

1. บทนำ

การเผาไหม้ถ่านหินเพื่อผลิตพลังงานได้รับความนิยมทั้งในภาคการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าและการผลิตความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเทคโนโลยีการเผาไหม้ถ่านหินที่ได้รับการยอมรับและถูกพิสูจน์แล้วเป็นเวลานานกว่า 30 ปี ว่าสามารถแปลงพลังงานของเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยมลพิษต่ำคือการเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Combustion; CFB) อย่างไรก็ตาม การใช้ถ่านหินคุณภาพต่ำจำพวกลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงนั้นจะก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สกำมะถัน (SO_2) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพในชุมชนที่อยู่รอบโรงงานหรือโรงไฟฟ้า จากความวิตกในด้านผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการเผาไหม้ถ่านหิน ดังนั้นในช่วงเวลาที่ผ่านมา 10 ปีที่ผ่านมาจึงได้เกิดการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินเพื่อลดปริมาณการใช้ถ่านหินให้ลดน้อยลง ยางพาราในประเทศไทยนอกจากจะนำน้ำยางมาผลิตเป็นยางแผ่นรมควันแล้ว ต้นยางพาราหลังสิ้นสภาพก็ยังสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีศักยภาพได้อีกด้วย จากข้อมูลจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานเปิดเผยว่าศักยภาพเชิงพลังงานของไม้ยางพารามีประมาณ 320 TJ [1] ทั้งนี้ เศษไม้ยางพาราที่เหลือจากกระบวนการในโรงงานแปรรูปไม้และโรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำใน 2 รูปแบบคือ ไม้สับ (Chipped wood: CW) และไม้อัดเม็ด (Pelletized wood: PW) ในด้านของเทคโนโลยีการแปลงรูปพลังงานของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานความร้อนที่สามารถจ่ายให้แก่หม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าที่ใช้งานทั่วไปคือการเผาไหม้โดยตรง เพราะมีประสิทธิภาพสูงและปลดปล่อยมลพิษน้อย โดยเทคโนโลยีการเผาไหม้ CFB ซึ่งถูกพัฒนามาจากฟลูอิดเบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling Fluidized Bed; BFB) ถูกมองว่าเป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่จะมีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในอนาคตสำหรับโรงไฟฟ้า [2] ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ทำการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินและชีวมวลชนิดต่างๆ ในหม้อไอน้ำหรือเตาเผาไหม้แบบ CFB เพื่อหาเงื่อนไขในการใช้งานที่เหมาะสม รวมถึงศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการใช้งาน อาทิเช่น 1) การศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินอย่างเดียวโดย Pang et al. [3] และการเผาไหม้ถ่าน

หินสองชนิดร่วมกันของ Lee et al. [4] 2) การศึกษาการเผาไหม้ชีวมวลเดี่ยวของ Lyngfelt และ Leckner [5] ซึ่งได้ไม้สับในหม้อไอน้ำ CFB นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาของ Youssef et al. [6] ซึ่งใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ ของประเทศอียิปต์ การใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงโดย Fang et al. [7] และ 3) การศึกษาการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินกับชีวมวลชนิดต่างๆ เช่น เปลือกมะกอก [8] ไม้สับ [9-10] แกลบ [11] และฟางข้าวอัดเม็ด [12] ใน CFB รวมไปถึงการเผาไหม้ชีวมวลหลากหลายชนิดร่วมกัน [13] ในส่วนของคณะผู้วิจัยเองได้มีการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการใช้ถ่านหินเชื้อเพลิงในเตาเผาไหม้ CFB ที่พัฒนาขึ้นเองในกรณีที่ใช้ถ่านหินอย่างเดียวเป็นเชื้อเพลิง [14-16] ทั้งนี้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดร่วมกับถ่านหินเป็นเรื่องที่น่าสนใจเพราะมีโอกาสที่จะสามารถนำไปใช้งานได้จริงในอนาคต ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของตำแหน่งการจ่ายอากาศทุติยภูมิ (SA) ซึ่งถูกแบ่งมาจ่ายที่ระดับความสูง 0.9 และ 2.3 m ด้วยอัตราส่วนอากาศส่วนเกินทุติยภูมิ (λ_{SA}) ในช่วง 0.12-0.22 ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน ซึ่งจะพิจารณาถึงพฤติกรรมการเผาไหม้และการปลดปล่อยแก๊สมลพิษ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

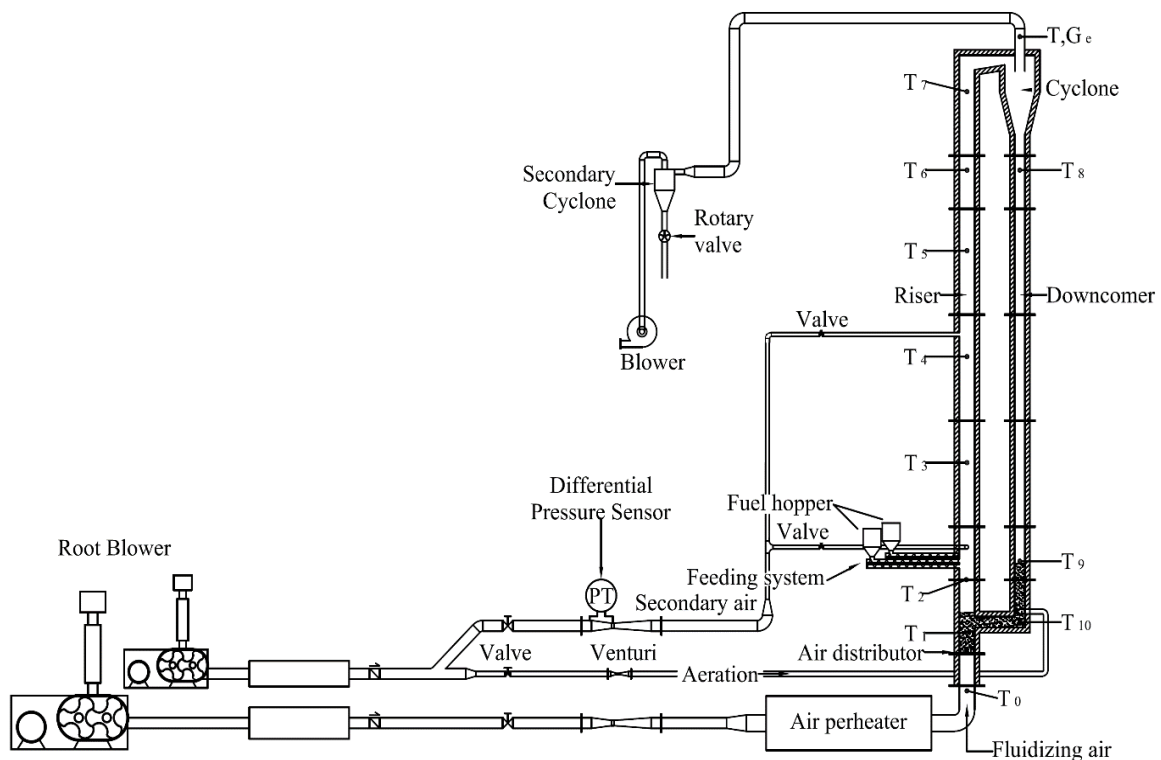
2.1 เตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน

ชุดทดลองเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน (CFB) ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบไปด้วย ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรูลำเลียง ชุดอุ่นอากาศแบบขดลวดความร้อน พัดลมจ่ายอากาศความดันสูง (Root blower) และไซโคลนตัวที่สอง (Secondary cyclone) เพื่อดักจับเถ้าลอยและพัดลมระบายแก๊สไอเสีย (Induced fan) โดยเตาเผาไหม้ CFB มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อไรเซอร์ (Riser) 150 mm มีฉนวนกันความร้อนซึ่งทำจากซีเมนต์หล่อทนไฟและฉนวนเซรามิกความหนาชั้นละ 25 mm ความสูงของท่อไรเซอร์มีค่า 6.4 m โดยที่ปลายด้านบนของท่อไรเซอร์จะเชื่อมต่อกับไซโคลนเพื่อดักอนุภาคเบดและเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดให้ตกลงผ่านไปยังท่อดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 mm ความสูง 4.7 เมตร ด้านล่างของท่อดาวน์คัมเมอร์จะเชื่อมต่อกับแวลวาล์ว (L-valve) ซึ่งทำหน้าที่ป้อนอนุภาคที่เวียนกลับมาเข้าสู่ท่อไรเซอร์) ส่วนอากาศเผาไหม้ที่จ่ายเข้าเตาเผาไหม้แบ่งออกเป็นสามส่วนคือ 1) อากาศปฐมภูมิ

(Primary air; PA) เป็นอากาศที่จ่ายทางด้านล่างของท่อไรเซอร์เพื่อทำให้อนุภาคเกิดการฟลูอิดเซชัน โดยจะไหลผ่านแผ่นกระจายอากาศ (Distributor) แบบหัวฉีดจำนวน 6 หัว 2) อากาศทุติยภูมิ (Secondary air; SA) ซึ่งช่วยในการเผาไหม้สารระเหยที่ปลดปล่อยมาจากเชื้อเพลิงและแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ โดยสามารถเลือกจ่ายได้ที่ระดับความสูงต่างๆ คือ 0.9 และ 2.3m เหนือแผ่นกระจายอากาศ 3) การอากาศที่ท่อเติมอากาศที่แอลวาล์ว (Aeration tap; LV) ซึ่งใช้สำหรับควบคุมอัตราการเวียนกลับของอนุภาค ชุดอุ่นอากาศ (Air

preheater) ถูกใช้สำหรับอุ่นอากาศปฐมภูมิก่อนป้อนเข้าสู่ท่อไรเซอร์

เมื่อทำการอุ่นระบบให้มีอุณหภูมิสูงเพียงพอที่จะทำให้เชื้อเพลิงติดไฟได้เอง และเมื่อต้องการควบคุมอุณหภูมิอากาศ PA ขณะทดลอง ทราชสิทธิ์ก็หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 300 μm ถูกนำมาใช้เป็นอนุภาคเบดในปริมาณ 18 kg ซึ่งเมื่อเติมลงในเตาเผาไหม้ปริมาณฝั่งละเท่าๆ กัน จะได้ระดับความสูงของเบดนิ่งฝั่งท่อไรเซอร์ประมาณ 37cm เหนือแผ่นกระจายอากาศ



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์ของเตาเผาไหม้ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียน (CFB) ในการทดลอง

2.2 องค์ประกอบเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองเผาไหม้ร่วมคือถ่านหินบิทูมินัสและไม้ยางพาราสองในรูปแบบ คือ ไม้อัดเม็ดและไม้สับ โดยเชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ความยาว 10-15 mm และ เชื้อเพลิงไม้สับที่ใช้ในการทดลองจะนำมาทำการสับย่อยให้มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมีความยาวประมาณ 15 mm ความกว้างประมาณ 10 mm และหนา 3-5

mm ส่วนถ่านหินที่ใช้จะนำมาทำการบดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยในช่วง 2-3 mm ดังแสดงในรูปที่ 2-4 สำหรับผลวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียดของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดแสดงในตารางที่ 1 โดยจะเห็นว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านหินมีมากกว่าชีวมวลทั้งสองรูปแบบ ในขณะที่ปริมาณสารระเหยของชีวมวลก็มีมากกว่าของถ่านหิน



รูปที่ 2 เชื้อเพลิงไม้อัดเม็ด



รูปที่ 3 เชื้อเพลิงไม้สับ



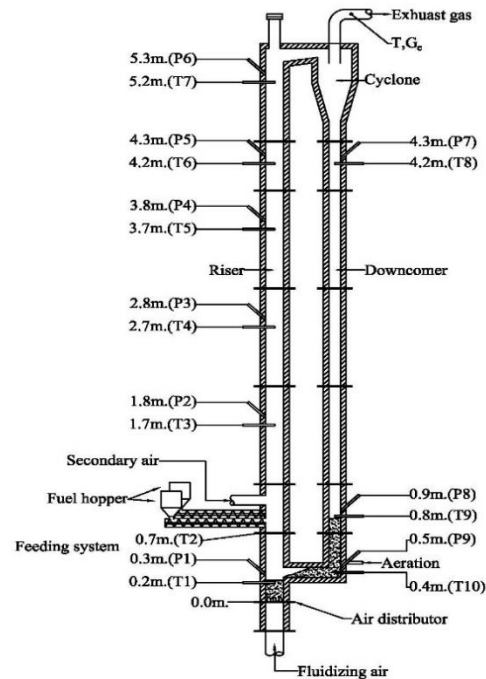
รูปที่ 4 เชื้อเพลิงถ่านหินบิโวมินัส

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

Proximate analysis (wt.%)	Wood pellet	Wood Chip	Coal
Fixed carbon	15.01	12.63	34.6
Volatile matter	80.10	69.6	53.5
Moisture	2.0	16	10.1
Ash	2.89	1.77	1.8
Ultimate analysis (wt.%)			
Carbon	45.83	39.05	56.85
Hydrogen	7.40	5.57	4.25
Oxygen	41.02	37.37	25.98
Nitrogen	0.85	0.21	0.84
Sulfur	0.01	0.03	0.18
Moisture	2.0	16	10.1
Ash	2.89	1.77	1.8
HHV (MJ/kg)	19.03	17.25	24.78

2.3 การวัดและวิธีการทดลอง

เตาเผาไหม้มีการปิดบ่อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ 2 ท่อซึ่งแยกอิสระจากกัน ส่วนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านหินจะทำการควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของสกรูป้อนเชื้อเพลิงแต่ละชนิดด้วยอินเวอร์เตอร์ ควบคู่กับการตรวจสอบด้วยการชั่งน้ำหนักและจับเวลา การป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาไหม้ตลอดช่วงการทดลอง ปริมาณอากาศที่จ่ายให้กับเตาเผาไหม้ในแต่ละส่วนถูกควบคุมด้วยวาล์วและวัดอัตราการไหลโดยใช้เวนจูรีที่ผ่านการสอบเทียบ (Calibration) แล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ ของย่านการวัด



รูปที่ 5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของเตาเผาไหม้ CFB

การวัดอุณหภูมิ (T) ระหว่างการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับจอแสดงผล ซึ่งได้ทำการวัดอุณหภูมิทั่วทั้งเตาเผาไหม้ 10 ตำแหน่ง (ดังรูปที่ 5) โดยด้านท่อไรเซอร์จะมีจำนวน 7 ตำแหน่ง (T1-T7) คือ 0.2, 0.7, 1.7, 2.7, 3.7, 4.2, 5.2 m ซึ่งเป็นระดับที่วัดเหนือจากแผ่นกระจายอากาศ ส่วนด้านท่อดาวน์คัมเมอร์มีจำนวน 3 ตำแหน่ง (T8-T10) สำหรับองค์ประกอบแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ได้ทำการวัดค่าความเข้มข้นของแก๊สต่างๆ ไอเสีย (จุด G ในรูปที่ 5) จะใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊ส Testo 350 ซึ่งสามารถวิเคราะห์แก๊ส O_2 , CO_2 , CO ,

NO_x และ SO₂ ทั้งนี้ ค่ามลพิษที่วัดได้คือ CO และ NO_x ในทุกเงื่อนไขการทดลองจะถูกแปลงมายังระดับความเข้มข้น O₂ ที่ 6% เพื่อสะดวกต่อการเปรียบเทียบ

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลองเผาไหม้ร่วมถ่านหินและไม้ยางพาราอัดเม็ด/ไม้ยางพาราสับ

เงื่อนไขการทดลอง	Run number					
	WP:coal			WC:coal		
	1	2	3	4	5	6
ตำแหน่งการจ่ายอากาศ ทุติยภูมิ (m)	No SA	0.9	2.3	No SA	0.9	2.3
อัตราส่วน อากาศปฐมภูมิ (λ _{PA})	1.29	1.17		1.29	1.07	
อัตราส่วน อากาศทุติย ภูมิ (λ _{SA})	0	0.11		0	0.22	
อัตราส่วน อากาศแอล วาล์ว (λ _{LV})	0.07					
อัตราการป้อน เชื้อเพลิง (kg/h)	20					
อัตราส่วนรวม อากาศรวม (λ _{total})	1.34					
ความเร็ว อากาศ เทียบเท่าหอ เปล้า (m/s)*	6.7	6.7	6.6	7.5	6.9	6.7

*พิจารณาจากปริมาณอากาศรวมภายใต้อุณหภูมิเบด (T1) ของแต่ละการทดลอง

การทดลองเริ่มจากการบรรจุทรายปริมาณ 18 kg เข้าสู่ท่อโรเซอร์และท่อดาวน์คัมเมอร์ฝั่งละเท่าๆ กัน จากนั้นทำการอุ่นระบบเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยใช้ชุดอุ่นอากาศแบบขดลวดความร้อนซึ่งจะให้อากาศปฐมภูมิไหลผ่านชุดขดลวดความร้อนก่อนให้เข้าสู่เบดด้านท่อโรเซอร์ โดยจะควบคุมให้ความเร็วที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ประมาณ 4-5 m/s เพื่อให้ทรายเกิดการฟุ้ง

กระจายและหมุนเวียนภายในเตาเผาอรจนกระทั่งอุณหภูมิเบด (T1) ประมาณมีค่าสูงในช่วง 300-400°C จึงทำการป้อนถ่านหินปริมาณ 1 kg เข้าสู่เตาเผาไหม้เพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงนำร่อง หลังจากถ่านหินนำร่องเกิดการลุกติดไฟเองจะทำให้เบดมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งต้องเริ่มเพิ่มอัตราการป้อนถ่านหินเพื่อทำให้อุณหภูมิเบดมีอุณหภูมิสูงถึง 800°C (ใช้ระยะเวลาประมาณ 180 นาที) แล้วจึงทำการป้อนเชื้อเพลิงผสมของไม้อัดเม็ดและถ่านหินตามสัดส่วนที่กำหนดคือ 80:20 (โดยพลังงาน) และปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง อัตราการป้อนอากาศตามเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 2 ซึ่งในทุกเงื่อนไขจะใช้ อัตราส่วน อากาศ ส่วน เกิน รวม (λ_{total} = (A/F)_{act}/(A/F)_{stoic}) คงที่เท่ากับ 1.34 ทั้ง 2 กรณีที่ทำการจ่ายอากาศทุติยภูมิ อากาศปฐมภูมิบางส่วนจะถูกแบ่งไปอากาศทุติยภูมิ (λ_{SA} = 0.12 กรณี PW และ λ_{SA} = 0.22 กรณี CW) ที่ระดับความสูงต่างๆ

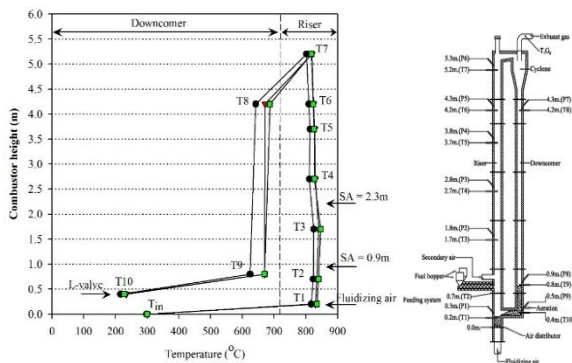
การควบคุมตำแหน่งการจ่ายอากาศทุติยภูมินั้นทำโดยการเปิด-ปิดวาล์วในแต่ละตำแหน่ง หลังจากทีระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวตามแต่ละเงื่อนไขการทดลองแล้วจะทำการบันทึกค่าของอุณหภูมิในแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้ที่ระดับความสูงต่างๆ (T1-T10) และบันทึกค่าองค์ประกอบแก๊สที่ทางออกของเตาเผาไหม้ (ดังรูปที่ 5) โดยบันทึกผลการทดลองทุก 2 นาทีเป็นระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

3. ผลการทดลอง

3.1 การกระจายตัวอุณหภูมิตามความสูงเตาเผาไหม้

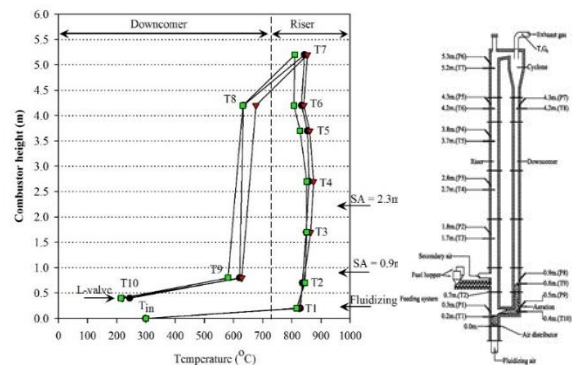
รูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้ทั้งฝั่งท่อโรเซอร์และดาวน์คัมเมอร์จากการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับไม้สับ CW และไม้อัดเม็ด PW ที่อัตราส่วนผสม 20:80 (โดยพลังงาน) ภายใต้เงื่อนไขการจ่ายอากาศทุติยภูมิ (SA) ที่ระดับความสูง 0.9 และ 2.3 เหนือแผ่นกระจายอากาศ และใช้อัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวมที่ 1.34 นอกจากนี้ ในทุกเงื่อนไขจะมีการอุ่นอากาศปฐมภูมิที่อุณหภูมิ 300°C โดยการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับ PW ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) พบว่าอุณหภูมิในท่อโรเซอร์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความสูง ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นถึงการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง ในกรณีที่จ่ายอากาศปฐมภูมิ PA (ทั้งหมดไม่จ่ายอากาศ SA)

มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความสูงที่ต่ำกว่ากรณีที่แบ่งอากาศ ปริมาณ PA ที่ไหลผ่านเบดไประบายความร้อนออกจากเบด ส่งผลให้อุณหภูมิในเบดลดต่ำลงประกอบกับความเร็ที่สูงกว่า อันเนื่องจากปริมาณลมที่มากกว่านี้อาจส่งผลถึงเชื้อเพลิงบางส่วนลอยตัวขึ้นไปเผาไหม้ในบริเวณส่วนบนของท่อโรเซอร์มากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากความร้อนของการลดลงของอุณหภูมิในช่วงระดับความสูง 2.7-3.7 m (T4-T5) ที่น้อยกว่าเล็กน้อย



● Lab 1: $\lambda_{PA} = 1.27, \lambda_{SA} = 0.0, \lambda_{LV} = 0.05, \lambda_{total} = 1.34$, No SA
▲ Lab 2: $\lambda_{PA} = 1.17, \lambda_{SA} = 0.12, \lambda_{LV} = 0.05, \lambda_{total} = 1.34$, SA pos. = 0.9 m

(ก) การเผาไหม้ PW:coal = 80:20 โดยพลังงาน



● Lab 4: $\lambda_{PA} = 1.27, \lambda_{SA} = 0.0, \lambda_{LV} = 0.07, \lambda_{total} = 1.34$, No SA
▲ Lab 5: $\lambda_{PA} = 1.07, \lambda_{SA} = 0.20, \lambda_{LV} = 0.07, \lambda_{total} = 1.34$, SA pos. = 0.9 m
■ Lab 6: $\lambda_{PA} = 1.07, \lambda_{SA} = 0.20, \lambda_{LV} = 0.07, \lambda_{total} = 1.34$, SA pos. = 2.3 m

(ข) การเผาไหม้ CW:coal = 80:20 โดยพลังงาน

รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้ สับร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ CFB

ส่วนผลการทดลองของการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการจ่ายอากาศ SA ที่ระดับความสูง 0.9 และ 2.3 m นั้นพบว่า การจ่าย SA ด้วย (λ_{SA}) = 0.12 ไม่ค่อยส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเตา โดยเฉพาะการจ่าย SA ที่

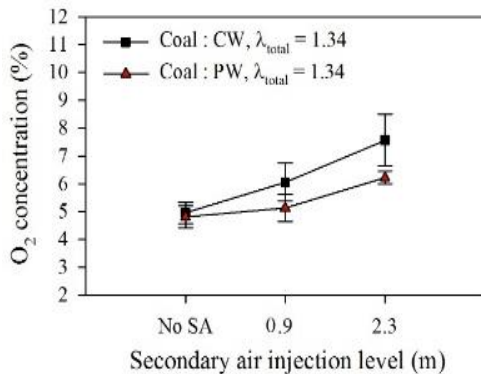
PA ไปจ่ายเป็นอากาศ SA เล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากระดับความสูง 0.9 m ซึ่งใกล้กับช่วงเบดหนาแน่นมาก จึงไม่กระทบต่ออุณหภูมิในเบดดังกล่าว ในการที่จ่าย SA ที่ระดับ 2.3 m ดูเหมือนจะส่งผลให้อุณหภูมิในระดับที่เหนือขึ้นไปลดลงเล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากตอนเข้าไปผสมของอากาศ SA นั้นอุณหภูมิต่ำกว่า (70°C) ในด้านท่อดาวนคัมเมอร์ พบว่า มีอุณหภูมิต่ำกว่าท่อโรเซอร์โดยอุณหภูมิ T8 และ T9 มีค่าในช่วง $580-680^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิของแก๊สและอุณหภูมิที่เวียนกลับมาในขณะที่อุณหภูมิที่ T10 ซึ่งเป็นตำแหน่งแอลวาล์ว อุณหภูมิจะเหลือเพียง $215-250^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเกิดจากการเป่าลมเย็นเข้ามาในห้องอากาศที่จ่ายที่บริเวณดังกล่าวเพื่อผลักอนุภาคให้ไหลเวียนจากท่อดาวนคัมเมอร์สู่ท่อโรเซอร์ซึ่งเป็นลมเย็นอุณหภูมิในการทดลองเผาไหม้ร่วมของถ่านหินกับไม้ยางพาราสับ CW ดังแสดงในรูปที่ 6(ข) พบว่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาค่อนข้างมีความแปรปรวนไม่เหมือนการใช้ PW ซึ่งอาจเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของ CW ที่เป็นชิ้นบางๆ หลายขนาด โดยเมื่อถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาไม่จึงเกิดการกระจายตัวไปเผาไหม้ในบริเวณอย่างไร้รูปแบบอย่างไรก็ตามสามารถสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิในเบด T1 มีค่าในช่วง $820-830^{\circ}\text{C}$ และจะมีแนวโน้มสูงกว่านี้ระหว่างช่วงระดับความสูงตั้งแต่ 0.9 m (T2) จนถึง 3.7 m (T4) ซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้สารระเหยของ CW ซึ่งมีมากกว่า PW จึงเป็นผลให้อุณหภูมิในบริเวณดังกล่าวสูงขึ้น ในส่วนของผนังดาวนคัมเมอร์มีพฤติกรรมที่คล้ายกับกรณีเผาไหม้ PW ร่วมกับถ่านหินในรูปที่ 6(ก)

3.2 แก๊สไอเสียที่ทางออกเตาเผาไหม้

องค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ทางออกของเตาเผาไหม้คือ ออกซิเจน (O_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) จากการเผาไหม้ไม้ยางพาราอัดเม็ด PW และไม้ยางพาราสับ CW ร่วมกับถ่านหินในอัตราส่วน 80:20 (โดยพลังงาน) และ (λ_{total}) = 1.34 ภายใต้การปรับเปลี่ยนตำแหน่งการจ่ายอากาศหุตุยภูมิ (λ_{SA}) ถูกแสดงดังรูปที่ 7-9

ความเข้มข้นของ O_2 ที่ทางออกเตา ดังรูปที่ 7 เพราะว่า การเผาไหม้ CW และ PW ร่วมกับถ่านหินในกรณีที่ไม่จ่าย (SA) มีค่าใกล้เคียงกันที่ 4.81-4.95% ซึ่งกล่าวเป็นนได้ถึงการผลาญปริมาณ O_2 ที่ใกล้เคียงกัน

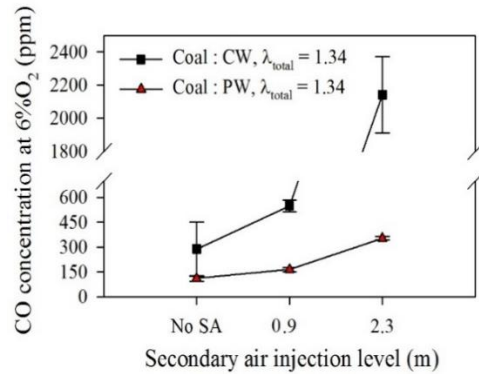
การเผาไหม้ในช่วงท่อโรเซอร์ถึงแม้ว่าในกรณีของการใช้ของท่อโรเซอร์มีมากกว่า(จากการสังเกตด้วยตาผ่านช่องมอง) เมื่อแบ่ง PA ไปจ่ายเป็น SA ($\lambda_{SA} = 0.20$ สำหรับ PW และ $\lambda_{SA} = 0.12$ สำหรับ CW) พบว่า ในทั้งสองกรณีมีการเผาไหม้ใน O_2 แก๊สไอเสียเพิ่มสูงขึ้นตามตำแหน่งการจ่าย SA ที่เพิ่มขึ้นและในกรณีของ CW จะมีความเข้มข้นของ O_2 สูงกว่า PW โดยการเพิ่มขึ้นของ O_2 ตามตำแหน่งการจ่าย SA นั้นคาดว่าเป็นผลมาจากระยะเวลาจากการทำปฏิกิริยาที่สั้นลงเมื่อจ่าย SA ในระดับที่สูงขึ้นในส่วนกรณีของ PW ที่มีความเข้มข้นเหลือน้อยกว่าในทุกเงื่อนไขหนึ่งการจ่าย SA นั้น เป็นผลมาจากการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นมากกว่า CW จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงส่วนใหญ่เกิดการเผาไหม้อยู่บริเวณเบดและเนื้อเบดใกล้เคียงกับตำแหน่งการจ่าย SA O_2 จึงถูกดึงมาทำปฏิกิริยาการเผาไหม้มากกว่า



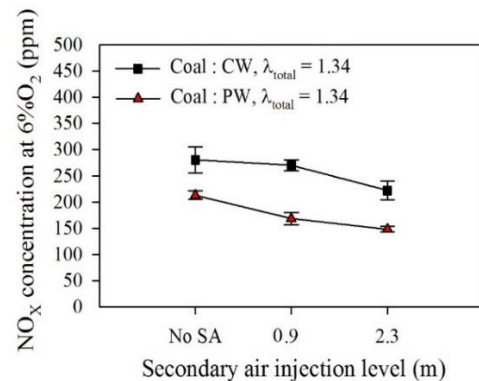
รูปที่ 7 ความเข้มข้นของ O_2 ที่ทางออกของเตาเผาไหม้

ในส่วนของปริมาณ CO ที่ระดับความเข้มข้น O_2 6% ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าทั้งสองกรณีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงร่วมมีค่า CO ที่เพิ่มสูงขึ้นตามระดับความสูงของการจ่าย SA ซึ่งเป็นผลมาจากระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่น้อยลงเมื่อจ่าย SA ที่ระดับความสูงขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วโดยมีค่าอยู่ในช่วง 112-148 ppm สำหรับกรณี PW และในช่วง 289-2141 ppm สำหรับกรณี CW ทั้งนี้ในกรณีของ CW ซึ่งมีค่า CO สูงกว่า นั้นเป็นผลมาจากปริมาณสารระเหยของ CW ที่มากกว่า PW ทำให้ภายในระยะเวลาเพียงประมาณ 1 วินาที (ความเร็วภายในท่อโรเซอร์ประมาณ 6 m/s) ไม่สามารถจะเปลี่ยนรูป CO ที่เกิดขึ้นให้เป็น CO_2 ได้ นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของอนุภาค CW ขนาดเล็กที่ลอยขึ้นด้านบนของ

CW จะฟุ้งกระจายของเชื้อเพลิงขนาดเล็กตลอดความสูงท่อโรเซอร์แล้วปลดปล่อย CO เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้มีความเข้มข้นของ CO ที่มากอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากในกรณีของ PW ซึ่งกายภาพของอนุภาคเชื้อเพลิงมีลักษณะเป็นเม็ดจึงเกิดการเผาไหม้ในเบดพร้อมกับถ่านหิน



รูปที่ 8 ความเข้มข้นของ CO ที่ทางออกของเตาเผาไหม้



รูปที่ 9 ความเข้มข้นของ NO_x ที่ทางออกของเตาเผาไหม้

รูปที่ 9 แสดงความเข้มข้นของออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่ O_2 ส่วนเกิน 6% จากการเผาไหม้ร่วมของ PW และ CW ร่วมกับถ่านหิน โดยพบว่าการเผาไหม้ CW มีการปลดปล่อย NO_x ในช่วง 222-288 ppm ซึ่งสูงกว่ากรณี PW ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 148-213 ppm ปริมาณ NO_x ที่สูงกว่าในกรณีของ CW เป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาของไนโตรเจนในสารระเหย (N-volatile) ของชีวมวลในรูป NH_3 (NH_3 เป็นส่วนใหญ่ [8, 14-17]) ด้วยปฏิกิริยา (Homogeneous reaction) ตามสมการ $NH_3^{+O,+OH} \rightarrow NH_3^{+O_2,+OH,+O} \rightarrow NO$ [14,16] ที่มากกว่าตามปริมาณสารระเหยของ CW ที่สูงกว่า

อย่างไรก็ตาม ในทั้งสองกรณีมีการลดลงของ NO_x เมื่อแบ่ง PA ไปจ่ายเป็น SA โดย NO_x มีค่าลดลงเมื่อจ่าย SA

ที่ระดับสูงขึ้นไป ซึ่งมีสาเหตุมาจากการลดปริมาณ O_2 ในเบดที่มีเชื้อเพลิงหนาแน่นจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาของ NH_3 กลายเป็น NO_x ได้น้อยลง ประกอบกับลักษณะของการจ่าย SA แบบขั้น (Staged air) ที่จะก่อให้เกิดบรรยากาศรีดิวซิง (Reducing atmosphere) ที่มีความเข้มข้น CO มาก ซึ่งจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของ NO_x (NO_x - reduction) โดยมีถ่าน char เป็นส่วนประกอบดังสมการ $NO + (Char+CO) \rightarrow N_2+CO_2$ [8, 14-17] ดังเมื่อทำการจ่าย SA ที่ระดับสูงขึ้นไป จึงทำให้การทำปฏิกิริยาการสลายตัวของ NO_x เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของ NO_x จึงลดลง ซึ่งผลของการทดลองมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัย [14-16]

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับไม้สับ CW และไม้อัดเม็ด PW ที่อัตราส่วนผสม 20:80 (โดยพลังงาน) ภายใต้เงื่อนไขการจ่ายอากาศทุติยภูมิ (SA) ที่ระดับความสูง 0.9 และ 2.3 m และใช้อัตราส่วนอากาศส่วนเกินรวมที่ (λ_{Total}) 1.34 คงที่ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การใช้ไม้ยางพาราสับ (CW) เป็นเชื้อเพลิงจะมีการเผาไหม้สารระเหยเหนือเบด จึงมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาแตกต่างจากกรณีไม้ยางพาราอัดเม็ด (PW) เล็กน้อย โดยในทุกกรณีมีค่าอยู่ในช่วง 800-830 °C

2. ความเข้มข้นของ O_2 จากการเผาไหม้ร่วม CW และ PW กับถ่านหินในกรณีที่ไม่จ่าย SA มีค่าใกล้เคียงกันที่ 4.81-4.95% เมื่อแบ่ง PA ไปจ่ายเป็น SA มีแนวโน้มให้ O_2 ในแก๊สไอเสียเพิ่มสูงขึ้น

3. ความเข้มข้นของ CO ที่ระดับความเข้มข้นของ O_2 ที่ 6% ในกรณี PW มีค่าอยู่ในช่วง 112-148 ppm ซึ่งต่ำกว่ากรณี CW ที่มีค่าในช่วง 289-2141 ppm โดยเป็นผลมาจากปริมาณสารระเหยของ CW ที่มากกว่า PW

4. การปลดปล่อย NO_x ของกรณี CW มีค่าในช่วง 222-288 ppm ซึ่งสูงกว่ากรณี PW ที่มีค่าอยู่ในช่วง 148-213 ppm การจ่ายอากาศ SA ที่ระดับความสูง 0.9 และ 2.3 m มีแนวโน้มให้ NO_x ลดลง

5. งานวิจัยนี้สรุปได้ว่า PW มีความเหมาะสมมากกว่า CW ในการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน และในแง่ของการ

ปลดปล่อย NO_x ระดับการจ่ายอากาศ SA ที่ 2.3 m ของการเผาไหม้ PW มีความเหมาะสมที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศักยภาพชีวมวล, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, <http://biomass.dede.go.th>
- [2] Leckner, B. (2016). Fluidized bed combustion, Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering, doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.12183-3.
- [3] Pang, L., Shao, Y., Zhong, W., Liu, H. (2018). Experimental investigation on the coal combustion in a pressurized fluidized bed, Energy, Vol. 165(B), 1119-1128.
- [4] 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
- [5] 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.
- [6] Youssf, M. A., Wahid, S. S., Mohamed, M. A., Askalany, A. A. (2009). Experimental study on Egyptian biomass combustion in circulating fluidized bed, Applied Energy, Vol. 86, PP. 2644-2650.

- [7] 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.
- [8] Atimtay, A. T. , Topal, H. (2004) . Co-combustion of olive cake with coal in a circulating fluidized bed, Fuel, Vol. 83, PP. 859-867.
- [9] Leckner, B., Amand, L.-E., Lucke, K. and Werther, J. (2004). Gaseous emission from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed, Fuel, Vol. 83(14), PP. 477-486.
- [11] Varul, M., Atimtay, A.T., Olgun, H., (2014). Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high-sulfur-lignite coal and woodchip in a circulating fluidized bed combustor: part 2. Effect of secondary air and its location, Fuel, Vol. 130, PP. 1-9.
- [11] Xie, J.J., Yang, X.M., Zhang, L., Ding, T.L., Song, W.L., Lin, W.G. (2007). Emission of SO₂ and N₂O in circulating fluidized bed combustor during co-firing coal biomass, Journal of Environmental sciences, Vol. 19, PP. 109-116.
- [12] Thanet, U., Suneerat, F, (2017). Co-firing of coal and rice straw pellet in a circulating fluidized-bed reactor, Energy Procedia, Vol. 138, PP. 766-771.
- [13] Saikaew, T., Supudommak, P., Mekasut, L., Piumsomboon, P. (2012). Emission of NO_x and N₂O from co-combustion of coal and biomass in a CFB combustor, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 10, PP.26-32
- [14] ประสาน สถิตยเรืองศ์ศักดิ์ และ ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2559). อิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศทุติยภูมิต่อการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 30, จังหวัดสงขลา
- [15] ประสาน สถิตยเรืองศ์ศักดิ์ และ ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2560). ผลกระทบของปริมาณวัสดุเบดและตำแหน่งการจ่ายอากาศทุติยภูมิในการเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการการถ่ายทอดพลังงาน ความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการครั้งที่ 16, จังหวัดเชียงใหม่
- [16] ประสาน สถิตยเรืองศ์ศักดิ์ และ ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2560). อิทธิพลของตำแหน่งการจ่ายอากาศทุติยภูมิแบบชั้นหลายระดับต่อการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 31, จังหวัดนครนายก
- [17] 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.