

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบด
แบบห้องเผาไหม้สั้น

CO-FIRING BETWEEN BIOMASS AND BITUMINOUS COAL WITHIN A SHORT
COMBUSTION CHAMBER FLUIDIZED BED COMBUSTOR

ธานิดย์ เมธิยานนท์^{1,*} ประสาน สติธยเรืองศักดิ์² และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์³

^{1,2} อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 51 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

โทร 02-9883655 ต่อ 241 E-mail: thanid_m@yahoo.com¹, Prasan_mut@yahoo.com²

³ อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10400 โทร 02-4708693-9 ext. 111 E-mail: somchart.sop@kmutt.ac.th³

Thanid Madhiyanon^{1,*}, Prasan Sathitruangsak²

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, 51, Cheum-Sampan Road, Nong Chok, Bangkok 10530, Tel: 02-9883655 ext. 241 E-mail: thanid_m@yahoo.com¹, Prasan_mut@yahoo.com²

Somchart Soponronnarit³

School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

91 Prachauthit Road, Bangmod, Thung Kharu District, Bangkok 10140 Tel: 02-4708693-9 ext.111,

E-mail: somchart.sop@kmutt.ac.th³

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้น ซึ่งมีขนาดพิกัด 250 kW โดยสัดส่วนผสมของเชื้อเพลิงแกลบและถ่านหินบิทูมินัสของกรณีศึกษาที่ศึกษาคือ 70:30 80:20 และ 100:0 (สัดส่วนโดยความร้อน) ผลการทดลองพบว่าสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดร่วมกันได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ระหว่าง 98.8-99.5% ทั้งนี้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสที่สัดส่วน 70:30 และ 80:20 จะปรากฏการเกาะตัวของก้อนอนุภาคถ่านหินเชื้อเพลิงบนแผ่นกระจายอากาศ ซึ่งคาดว่าจะเกิดจากยางเหนียวที่มีอยู่ในถ่านหินบิทูมินัส โดยผลการวัดปริมาณธาตุของก้อนอนุภาคที่เกาะตัวด้วยเทคนิค EDS พบว่าพื้นผิวด้านนอกส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุซิลิกอน แคลเซียม และเหล็ก แต่ผิวด้านในจะมีซิลิกอนและอลูมิเนียมเป็นหลัก สำหรับแก๊สมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เมื่อพิจารณาที่ระดับออกซิเจนส่วนเกินที่ 6% มีดังนี้ คือปริมาณ CO มีค่าน้อยในช่วง 60-110 ppm และปริมาณ NO_x มีค่าระหว่าง 212-350 ppm

คำสำคัญ: การเผาไหม้ร่วม/การเกาะตัว/ถ่านหินบิทูมินัส/ฟลูอิดไคซ์เบด

*Corresponding author

Abstract

The aim of this research is to study the co-firing between rice husk and bituminous coal in a 250 kW short combustion chamber fluidized bed combustor. The thermal mixing ratios of rice husk to bituminous coal of 70:30, 80:20, and 100:0 were used for experiments. The result showed that both fuels can be continuously burnt together with combustion efficiencies in range 98.8–99.5%. However, in case of co-firing for the ratios of 70:30 and 80:20, agglomerated particles appeared on the distributor plate, which may be formed due to the tar in the bituminous coal. The EDS analysis results were also showed that the outer surface of agglomerated particles mainly contained silicon, calcium, and ferrous while inner surface, silicon and aluminium are main elements. CO and NO_x emissions (based on 6% O₂) at the exit varied between 60–110 ppm and 212–350 ppm, respectively.

Keywords: agglomeration/Bituminous/Co-firing/Fluidized-bed/

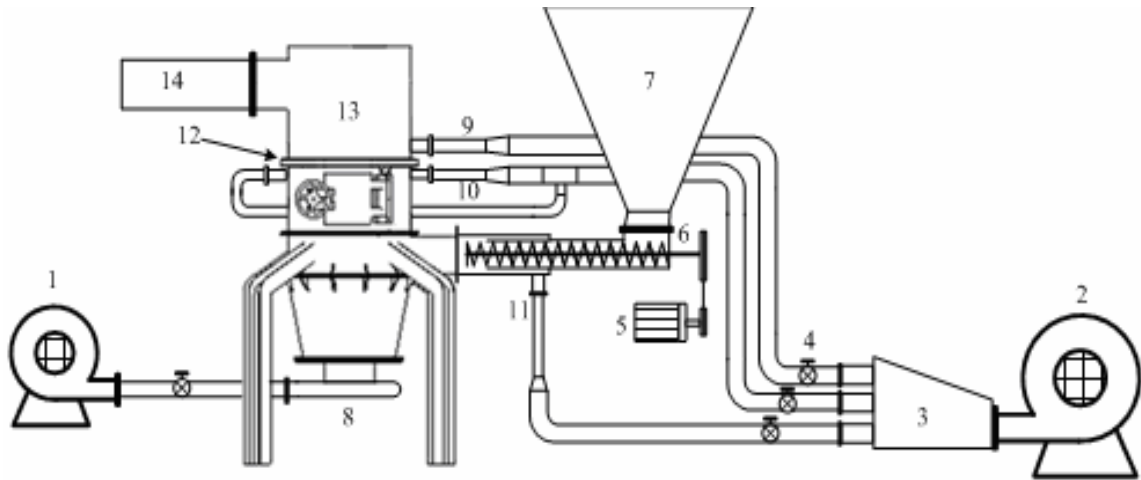
1. บทนำ

ปัจจุบันมีการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ ภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเบด เช่นเชื้อเพลิงชีวมวลจำพวกแกลบ [1,2,3] ชานอ้อย [4] ชีเสี้ยว [5] เป็นต้น นอกเหนือจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินเพียงอย่างเดียวเหมือนที่ผ่านมาในอดีตเพราะเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่หาได้ง่ายและมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการเกษตรเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ทำให้มีการสนับสนุนจากรัฐบาลในการรณรงค์การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มมากขึ้น โดยสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของจำนวนโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ทั้งนี้ผลกระทบที่ตามมาของการเพิ่มปริมาณการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลคือ การขาดแคลนเชื้อเพลิงชีวมวลในช่วงนอกเหนือฤดูกาลเก็บเกี่ยวซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ (reliability) ของกระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรม จึงได้มีการศึกษานำเชื้อเพลิงชนิดอื่นมาเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวล [6,7] หรือเชื้อเพลิงชีวมวลต่างชนิดกัน [8] โดยข้อดีของการใช้เตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเบดคือสามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงหลากหลายชนิดและมีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง โดยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์เทคนิคต่างๆ เพื่อให้เตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเบดนั้นมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงยิ่งขึ้น เช่น การจ่ายอากาศในลักษณะหมุนวนเพื่อคั่นอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมด [1,2,9-12] และการติดตั้งวงแหวนวอร์เทคสำหรับคั่นอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ที่เผาไหม้ภายในเตา [1,2,9-12] ส่วนปัญหาที่มักพบเจอในการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเบดคือ ปัญหาการเกาะตัวของวัสดุเนื้อที่เป็นเบด (bed material) เช่น หินทราย ควอทซ์ กับเถ้าของเชื้อเพลิงที่ใช้ซึ่งส่งผลให้สูญเสียสภาพการเกิดฟลูอิดไคเซชันจนกระทั่งต้องหยุดการทำงานอย่างฉุกเฉิน (unscheduled shut down) หรือการทำงานของระบบไม่มีความสม่ำเสมอ ในกรณีที่เป็นเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเบดที่ไม่ใช้วัสดุเนื้อเป็นเบด [1,2,9-12] เมื่อใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลต้องมีการติดตั้งไบกวภายในเบดเพื่อทำลายการเกาะตัวกันอย่างหลวม ๆ ของอนุภาคเชื้อเพลิงซึ่งเกิดขึ้นจากกลไกที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล โดยการติดตั้งไบกวเข้าไปนี้สามารถขจัดปัญหาที่เกิดขึ้นได้ สำหรับการเกาะตัวของวัสดุเบดส่วนใหญ่ นั้นเกิดจากสาเหตุที่เถ้าของเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบอนินทรีย์ (inorganic) จำพวกต่าง (alkali) เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) นอกจากนี้ยังมีโลหะต่าง (alkaline earth metal) จำพวก แคลเซียม (Ca) และ แมกนีเซียม (Mg) เป็นต้น ซึ่งสามารถแปรสภาพเป็นองค์ประกอบใหม่ เมื่อจับตัวกับอนุภาคอื่น ๆ เช่น ซัลเฟต (sulphate) คาร์บอเนต (carbonate) หรือ ซิลิเกต (silicate) ซึ่งทำให้อนุภาคมืดจางหายไปของเถ้าต่ำลง โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Lin, et al. [13] อธิบายไว้ว่าลักษณะของการเกาะตัวสามารถเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับกรณีที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง คือ การเกาะตัวของอนุภาคขนาดเล็กบนผิวของอนุภาคที่ใหญ่กว่าตัวอื่น (sintering) และการเกาะตัวที่เกิดจากการหลอมละลายรวมกับอนุภาคอื่น (melting) ซึ่งปัญหาการเกาะตัวที่เกิดขึ้นในเบดอาจแก้ไขได้โดยการเติมสารเคมีเติมแต่ง (additive) จำพวก โดโลไมท์ (dolomite) เคาไลน์ท์ (kaolinite) [14,15] เป็นต้น ดังนั้นการเข้าใจถึงกลไกการเกิดการเกาะ

ตัวและปัจจัยที่ทำให้เกิดการเกาะตัวเป็นสิ่งสำคัญซึ่งจะนำมาสู่การแก้ปัญหาการเกาะตัวที่เกิดขึ้นในเตาเผาไหม้ต่อไป จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นจึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดร่วมกันภายในเตาเผาไหม้ซึ่งคาดว่าจะสร้างความหลากหลายในการใช้เชื้อเพลิงได้มากขึ้นทำให้ลดปัญหาความน่าเชื่อถือของโรงงานลงไปได้ โดยในการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัส จะศึกษาถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ ปริมาณแก๊สมลพิษ (CO, NO_x) ที่ทางออกของเตาเผาไหม้ และศึกษาปัญหาการเกาะตัวของเถ้าเชื้อเพลิงที่อาจจะเกิดขึ้น

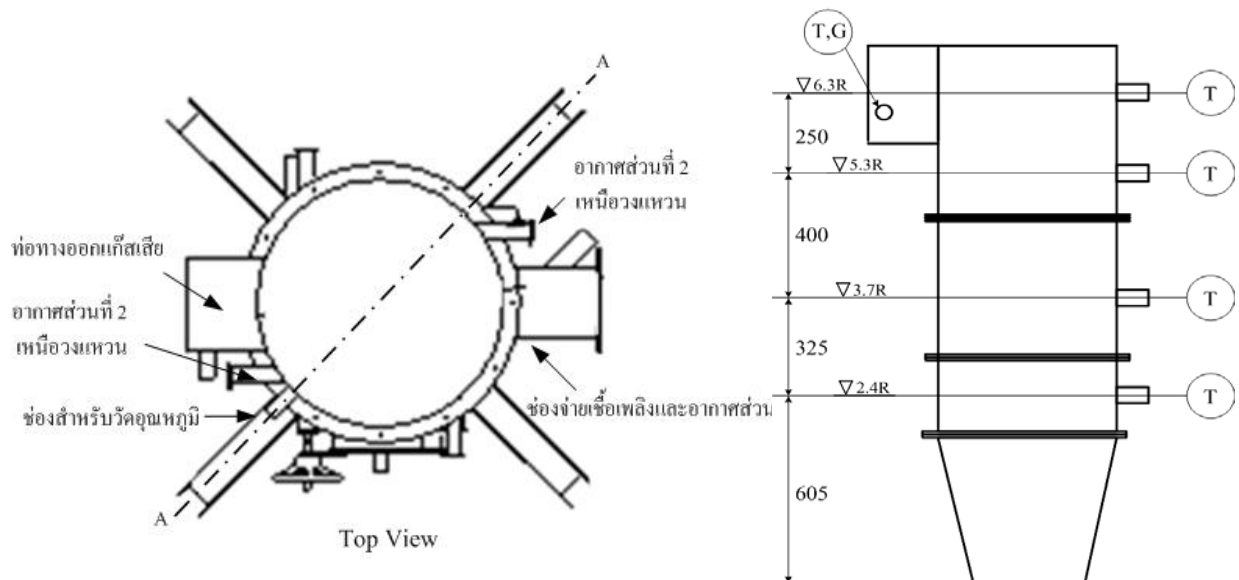
2. อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

ในการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเบดแบบห้องเผาไหม้สั้นซึ่งมีลักษณะของเตาเผาไหม้และอุปกรณ์ในระบบที่ใช้แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีรายละเอียดของเตาเผาไหม้ดังนี้คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเท่ากับ 500 mm (ผนังเตาด้านในก่อด้วยอิฐและฉนวนด้วยซีเมนต์ทนไฟหนา 130 mm) และมีสัดส่วน H/D เท่ากับ 3.46 นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งวงแหวนวอร์เทคซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนเท่ากับ 300 mm ที่ระดับความสูง 4.52R ไว้สำหรับคั่นอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดสำหรับการจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้มีด้วยกันสามส่วนดังนี้ คือ อากาศส่วนที่หนึ่งซึ่งเป็นอากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไคเซชัน อากาศส่วนที่สองเป็นอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้และช่วยในการคั่นอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดซึ่งมีการจ่ายที่สองระดับความสูงคือ ระดับเหนือวงแหวนวอร์เทค(4.64R) และระดับใต้วงแหวนวอร์เทค (4.12R) จำนวน 4 ท่อซึ่งจะก่อให้เกิดวงแหวนอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm. สำหรับอากาศส่วนที่สามเป็นอากาศซึ่งจ่ายเพื่อป้องกันการลุกไหม้ของไฟที่จะเข้าไปยังถังพักแกลบ โดยถ่านหินบิทูมินัสที่ใช้มีขนาดระหว่าง 5-10 mm. สำหรับตำแหน่งการจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้และจุดวัดค่าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2 ในการป้อนเชื้อเพลิงแกลบและถ่านหินบิทูมินัส (เชื้อเพลิงผสม) เข้าสู่เตาเผาไหม้ จะใช้สกรูลำเลียงเข้าสู่เตาเผาไหม้บริเวณเหนือเบดที่ระดับความสูง 2.4R โดยเชื้อเพลิงแกลบและถ่านหินบิทูมินัสจะถูกผสมกันภายนอกตามสัดส่วนต่างๆ ก่อนใส่ลงในถังพักป้อน การทดลองและเก็บข้อมูลในงานวิจัยนั้นจะใช้เครื่องวัดความเร็วลมชนิดใบพัด (Vane type anemometer) มีค่าความละเอียด $\pm 3\%$ ของค่าที่อ่านได้ ในการวัดอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่เตาเผาไหม้ในส่วนต่าง ๆ และใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการวัดอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ซึ่งทำการวัดจำนวน 5 ตำแหน่งคือ 2.4R 3.7R 5.3R 6.3R และที่ท่อทางออกเตาเผาไหม้ สำหรับในการวัดแก๊สเผาไหม้จะใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเสีย (Gas Analyzer) Testo 350 XL ซึ่งทำการวัดที่ท่อทางออกเตาเผาไหม้และในการหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตานั้นจะใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ LECO CHNS 932 เพื่อหาปริมาณคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ภายในเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ สำหรับในการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคเบดแบบห้องเผาไหม้สั้นจะใช้เงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์และการติดตั้งในการทดลองของเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธเซชัน

- | | |
|---|---|
| 1 = พัดลมป้อนอากาศส่วนที่ 1 | 8 = อากาศส่วนที่ 1 ส่วนที่ทำให้เกิดฟลูอิดไธเซชัน |
| 2 = พัดลมป้อนอากาศส่วนที่ 2 และ 3 | 9 = อากาศส่วนที่ 2 เหนือวงแหวนวอร์เทค |
| 3 = กล้องลม | 10 = อากาศส่วนที่ 2 ใต้วงแหวนวอร์เทค |
| 4 = วาล์วควบคุมปริมาณอากาศ | 11 = อากาศส่วนที่ 3 ส่วนที่จ่ายมาพร้อมกับเชื้อเพลิง |
| 5 = มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูป้อนเชื้อเพลิง | 12 = วงแหวนวอร์เทค |
| 6 = สกรูป้อนเชื้อเพลิง | 13 = เตาเผาไหม้ |
| 7 = ถังพักป้อนแก๊ส | 14 = ท่อทางออกเตาเผาไหม้ |



(a) แสดงตำแหน่งการจ่ายอากาศ

(b) แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและแก๊สเผาไหม้

รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งการจ่ายอากาศ ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและแก๊สเผาไหม้

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองของการศึกษาอิทธิพลของอากาศส่วนที่สองต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้

Testing Conditions		Run number			
		1	2	3	4
Ratio of Rice husk : Bituminous coal (Thermal basis)		70:30	80:20	100:0	80:20*
Ratio of rice husk : Bituminous coal (Mass basis)		79:21	87:13	100:0	87:13
Specific fuel feed rate (kg.m ⁻³ .h)		177	185	220	147
Air-Fuel ratio (kg-da/kg-fuel)		5.09	4.89	4.54	4.89
Excess air (%)		153	141	140	217
Primary air (Fluidizing air: m ₁)	Velocity (m/s)	0.8	0.7	1.13	0.8
	Mass fraction	0.33	0.33	0.48	0.36
Upper secondary air (Tangential air: m _{2,up})	Velocity (m/s)	7.84	7.84	7.84	7.84
	Mass fraction	0.12	0.12	0.11	0.12
Lower secondary air (Imaginary circle air: m _{2,low})	Velocity (m/s)	16	16	10.27	16
	Mass fraction	0.26	0.26	0.15	0.26
Tertiary air (Fire back protection air: m ₃)	Velocity (m/s)	15.77	15.77	15.73	15.77
	Mass fraction	0.24	0.24	0.22	0.24
Stirrer cooling air (m ₄)		Mass fraction	0.007	0.007	0.007

หมายเหตุ * การทดลองที่มีการลดอุณหภูมิเบดลงเหลือประมาณ 900°C

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการปรับปริมาณอากาศตามเงื่อนไข จากนั้นทำการทดลองโดยเริ่มจุดเตาเผาไหม้ซึ่งจะเผาไหม้เฉพาะเชื้อเพลิงแกลบก่อน เพื่ออุ่นให้เตาอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 700-800°C ซึ่งเหมาะกับการเผาไหม้ถ่านหิน แล้วจึงนำเชื้อเพลิงแกลบที่ผสมกับถ่านหินบิโตนินแล้วป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้แล้วปรับอัตราการป้อนให้ได้ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาไหม้ที่ 250 kW ซึ่งในช่วงเวลานี้จะบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตา โดยหลังจากเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60-80 นาทีแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าต่าง ๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิภายในเตาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ปริมาณแก๊สที่ดูดได้จากไซโคลอน (เก็บทุก 30 นาที) ความเข้มข้นแก๊สเผาไหม้ที่ทางออกของเตาเผาไหม้ โดยข้อมูลที่บันทึกไว้จะนำไปคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ (η_c) [1,2,9-12] ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$\eta_c = \left[\frac{(E_F - E_a - E_{fg})}{E_F} \right] \times 100\% \quad (1)$$

E_F = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาเผาไหม้

E_a = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในเถ้า

E_{fg} = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไอเสีย

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

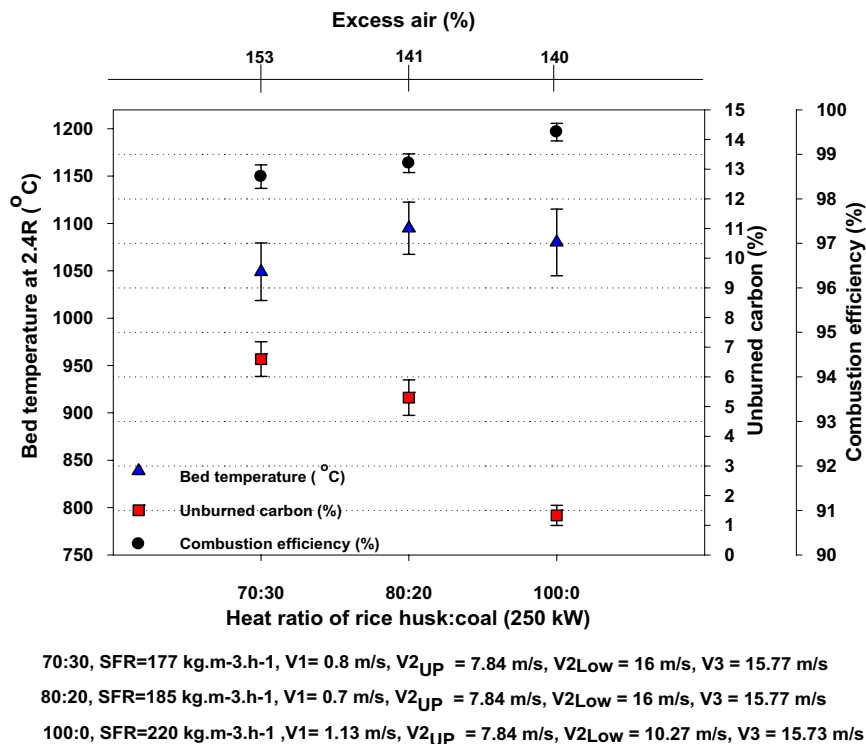
ในการทดลองเพื่อศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิโตนินส์ได้ทำการทดลองทั้งหมดจำนวน 4 เงื่อนไข ซึ่งทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิโตนินส์ในสัดส่วนต่าง ๆ โดยพิจารณาถึงความสามารถในการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงทั้งสอง ประสิทธิภาพการเผาไหม้ในกรณีเผาเชื้อเพลิงร่วมกัน แก๊สมลพิษที่ทางออกของเตาเผาไหม้ และปัญหาการเกาะตัวของอนุภาคเถ้าเชื้อเพลิงที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง โดยจากการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิโตนินส์ในทุกเงื่อนไขนั้นพบว่าสามารถเผาไหม้ในลักษณะฟลูอิดเซชันภายในเตาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยสังเกตได้จากการฟุ้งกระจายของเชื้อเพลิงตลอดพื้นที่หน้าตัดเตาอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงการทดลอง (4-6 ชั่วโมง) โดยไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยลงในเบด ทั้งนี้ในการทดลองเผาไหม้แกลบร่วมกับถ่านหินบิโตนินส์ที่สัดส่วน 70:30 และ 80:20 จะพบก่อนอนุภาคตกค้างอยู่บนแผ่นกระจายอากาศ

3.1 อุณหภูมิเบด สัดส่วนคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้

รูปที่ 3 แสดงอุณหภูมิเบด สัดส่วนคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ และประสิทธิภาพการเผาไหม้ในการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิโตนินส์ซึ่งพบว่า ในการเผาไหม้ที่สัดส่วนการผสมแกลบต่อถ่านหินบิโตนินส์ที่ 70:30 ซึ่งใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ 153% จะมี

อุณหภูมิเบดขณะเผาไหม้ประมาณ 1050°C และสัดส่วนของคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ที่ 6.5% ซึ่งสามารถคิดเป็นประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ 98.5% เมื่อเปรียบเทียบผลของสัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงแกลบต่อถ่านหินบิทูมินัส ที่เงื่อนไขสัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงแกลบต่อถ่านหินบิทูมินัสที่ 80:20 และ 100:0 ซึ่งใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกัน (141% และ 140% ตามลำดับ) โดยจากผลการทดลองสังเกตได้ว่าการเพิ่มสัดส่วนผสมถ่านหินที่ 80:20 มีอุณหภูมิเบดของการเผาไหม้สูงกว่าที่สัดส่วนเชื้อเพลิง 100:0 เล็กน้อย แต่มี

ปริมาณสัดส่วนของคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้มากกว่า โดยเหตุผลคาดว่า การเพิ่มสัดส่วนการผสมถ่านหินบิทูมินัสซึ่งเผาไหม้ได้ยากกว่าเชื้อเพลิงแกลบจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้ในเตาที่มากกว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบเพียงลำพัง (100:0) ทำให้การเพิ่มสัดส่วนการผสมถ่านหินบิทูมินัสที่มากขึ้นส่งผลให้มีสัดส่วนของคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้เพิ่มขึ้นจาก 1.2% (100:0) ไปเป็น 5.2% (80:20) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงจาก 99.5% เหลือ 98.8%



รูปที่ 3 อุณหภูมิเบด สัดส่วนของคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้

3.2 องค์ประกอบแก๊สเผาไหม้ที่ท่อทางออก

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสที่สัดส่วนต่างๆ โดยพบว่าปริมาณออกซิเจนในทุกสัดส่วนของเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ระหว่าง 10-12% และปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 8.3-9.8% หากพิจารณาถึงแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สมลพิษนั้นพบว่าที่ระดับปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่ 6% นั้นมีค่าอยู่ในช่วง 60–110 ppm ส่วนปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่เกิดขึ้นจากการทดลองพบว่าที่ระดับออกซิเจนส่วนเกินที่ 6% มีค่าระหว่าง 212-350 ppm

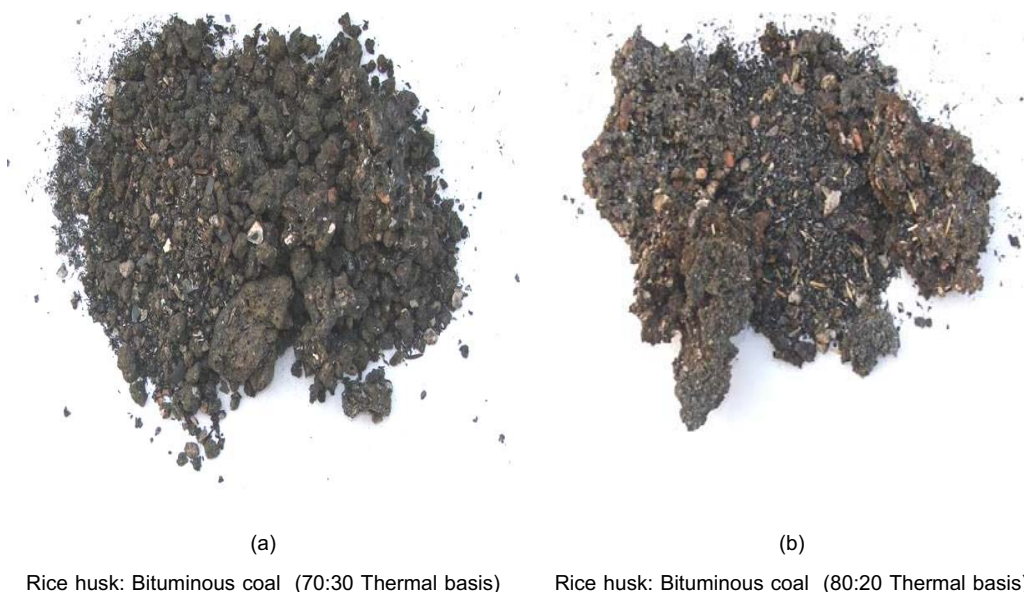
3.3 การเกาะตัวของอนุภาคเถ้าเชื้อเพลิงภายในเบด

จากการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสที่สัดส่วน 70:30 และ 80:20 จะปรากฏก่อนอนุภาคสะสมตัวกันบนแผ่นกระจายอากาศซึ่งจะมีขนาดของการเกาะตัวใหญ่ขึ้นตามสัดส่วนของถ่านหินบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4 โดยคาดว่าจะการเกาะตัวดังกล่าว

น่าจะเกิดจากการหลอมตัวของเถ้าเชื้อเพลิงที่มีธาตุโพแทสเซียมและโซเดียมเป็นส่วนประกอบซึ่งจะทำให้อุณหภูมิการหลอมตัวของเถ้าเชื้อเพลิงลดต่ำลงแล้วเกิดการหลอมตัวในที่สุด [5,13,14] โดยที่เงื่อนไขการทดลองที่ 70:30 และ 80:20 นั้นมีอุณหภูมิเบดขณะเผาไหม้ประมาณ 1,100°C จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติม (เงื่อนไขที่ 4) โดยการทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงร่วมภายใต้อุณหภูมิเบดที่ควบคุมไว้ประมาณ 900°C ซึ่งก็ยังคงพบการเกาะตัวของก้อนอนุภาคเชื้อเพลิงแต่มีปริมาณลดน้อยลง ทำให้คาดว่าปัญหาของการเกาะตัวน่าจะเกิดจากสาเหตุอื่นนอกเหนือจากอุณหภูมิเบดในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งคาดว่าอาจมาจากการที่ถ่านหินบิทูมินัสเกิดยางเหนียว (Tar) ในระหว่างที่สารระเหยถูกปลดปล่อยออกจากถ่านหิน โดย Oka [16] ได้อธิบายกลไกที่คาดว่า เป็นที่มาของการเกาะตัวไว้ดังนี้คือ ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 350°C จะเกิดการแตกตัวของส่วนประกอบโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินบิทูมินัสซึ่งจะทำให้อนุภาคของถ่านหินบางส่วนถูกเปลี่ยนสถานะไปเป็น

ของเหลวในช่วงพลาสติกซึ่งมีความหนืดและเมื่ออุณหภูมิถ่านหินเพิ่มสูงขึ้นก็จะทำให้ของเหลวที่เกิดขึ้นนั้นมีสมบัติการเป็นพลาสติก (Plasticity) มากขึ้นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิประมาณ 500°C ซึ่งของเหลวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดการระเหยกลายเป็นแก๊ส จะทำให้ถ่านหินกลับสภาพมาเป็นของแข็งอีกครั้ง จากกลไกที่ Oka [16] ได้อธิบายไว้ทำให้คาดว่าก้อนของถ่านหินที่เกาะตัวกันอยู่บนแผ่นกระจายอากาศในการทดลองนั้นเริ่มตันจากการเกาะตัวกันของอนุภาคถ่านหินบิทูมินัสในช่วงอุณหภูมิ 350-500°C เป็นอันดับแรก ซึ่งหากอนุภาคถ่านหิน

เกิดการปะทะกันในช่วงนี้ก็จะเกาะตัวกันแล้ว ส่งผลให้ก้อนอนุภาคถ่านหินที่เกาะตัวกันและมีน้ำหนักมากตกลงไปเผาไหม้บนแผ่นกระจายอากาศในลักษณะอยู่นิ่งคล้ายกับเตาตะกรับกลายเป็นถ่านแล้วเกิดการหลอมตัวของถ่านเชื้อเพลิงในลำดับต่อมา แต่ทั้งนี้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงกลบเพียงลำพัง (100:0) จะไม่ปรากฏการเกาะตัวเกิดขึ้นแต่อย่างใด ทั้งนี้คาดว่าเพราะถ่านของเชื้อเพลิงกลบส่วนใหญ่เป็นซิลิกอน ซึ่งมีอุณหภูมิการหลอมตัวสูงกว่า 1,400°C [5]



รูปที่ 4 แสดงการเกาะตัวของอนุภาคถ่านเชื้อเพลิงบนแผ่นกระจายอากาศเมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัส

3.4 องค์ประกอบของอนุภาคถ่านที่เกาะตัว

จากการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงกลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสและเกิดปัญหาการเกาะตัวของอนุภาคถ่านเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจึงได้นำตัวอย่างของถ่านถ่านนั้นไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุที่มีอยู่ภายในด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive Spectrometry) และศึกษาลักษณะของพื้นผิวของถ่านอนุภาคด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) ซึ่งจะสามารถเห็นลักษณะของการยึดเกาะที่เกิดขึ้นและปริมาณของธาตุต่างๆ ที่ตำแหน่งที่เกิดการยึดเกาะ โดยรูปที่ 5 เป็นลักษณะของรูปถ่ายพื้นผิวของถ่านอนุภาคที่เกิดการเกาะตัวสำหรับสัดส่วนของธาตุในแต่ละตำแหน่งในรูปที่ 5 หาได้ด้วยเทคนิค EDS ซึ่งได้ผลแสดงดังตารางที่ 2 จากสังเกตและวิเคราะห์ถ่านอนุภาคที่เกาะตัวพบว่าพื้นผิวภายนอกของถ่านอนุภาคที่เกาะตัวกันนั้นมีลักษณะค่อนข้างเรียบและคล้ายกับมีวัสดุปกคลุมผิวซึ่งมีความมันวาว ดังรูป 5a ซึ่งเมื่อนำถ่านอนุภาคนี้ไปทำการขัดเพื่อดูลักษณะภายในพบว่า จะมีลักษณะเป็นรูพรุนและโพรงดังรูปที่ 5b ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากของเหลวที่เกิดจากการหลอมละลายสารอินทรีย์มีการระเหยกลายเป็นไอออกไปจากถ่านอนุภาคที่เกาะตัวกันนี้ จึงทำให้เกิดลักษณะเป็นโพรง โดยเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในถ่านอนุภาคพบว่า

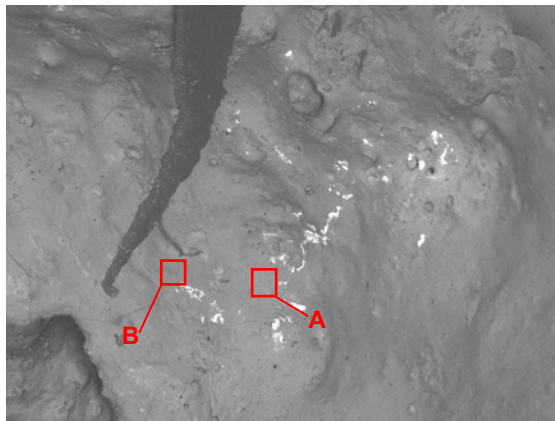
ภายนอกของถ่านอนุภาคเชื้อเพลิงตำแหน่ง A และ B จะมีองค์ประกอบหลักเป็น ซิลิกอน แคลเซียมและเหล็ก ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน ส่วนภายในของถ่านอนุภาคดังรูป 5b ซึ่งสามารถสังเกตเห็นลักษณะของพื้นผิวที่มีสีแตกต่างกันระหว่างตำแหน่ง C และ D โดยที่ตำแหน่ง C จะมีปริมาณ โพแทสเซียม แคลเซียม และเหล็กมากกว่า ตำแหน่ง D ซึ่งคาดว่าเป็นผลทำให้ที่ตำแหน่งนี้มีความสว่างมากกว่าตำแหน่ง D ในขณะที่ตำแหน่ง D จะมีปริมาณอลูมิเนียมและซิลิกอนค่อนข้างสูง (มากกว่า 90%) แต่มีปริมาณของแคลเซียมและเหล็กน้อยกว่าที่ตำแหน่ง C เมื่อพิจารณาถึงธาตุหลักที่คาดว่าเป็นสาเหตุให้เกิดการหลอมตัวเป็นถ่านอนุภาคนี้คือโพแทสเซียมและโซเดียม ซึ่งสามารถรวมตัวกับซิลิกอนแล้วก่อให้เกิดปัญหาการเกาะตัวได้ [17] โดยปริมาณของโพแทสเซียมและโซเดียมที่วัดได้ในถ่านอนุภาคนั้นอาจมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดการเกาะตัวเมื่อรวมตัวกับสารประกอบของธาตุอื่น ๆ โดยอาจจะอยู่ในรูปของสารประกอบของ โพแทสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3) [18] หรือ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) [14] ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ ทั้งนี้สัดส่วนของธาตุที่ตำแหน่งต่างๆ ที่วัดได้นั้นอาจไม่เพียงพอที่จะสรุปกลไกหรือปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการเกาะตัวกันของอนุภาคอย่างแท้จริงได้ โดยอาจต้องนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD (X-Ray

diffraction) ซึ่งสามารถทำให้ทราบถึงประเภทของโครงสร้างวัสดุที่เกิดจากต่าง ๆ ที่มีอยู่ในก้อนอนุภาคนั้น โดยผลการวิเคราะห์ด้วย XRD นี้ จะทำให้ทราบว่าในก้อนอนุภาคที่มีการเกาะตัวนี้ประกอบด้วยโครงสร้าง

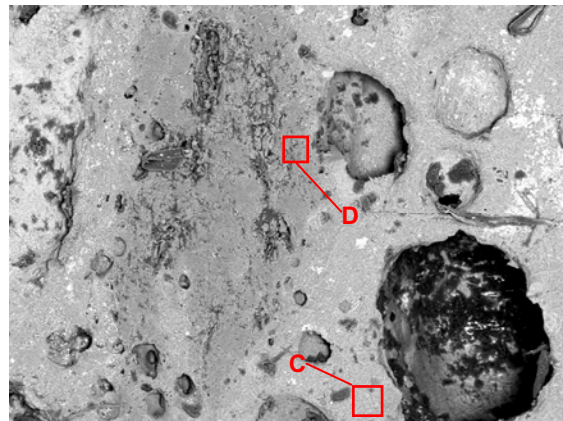
หรือสารประกอบของธาตุในรูปแบบใดที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำสุด ซึ่งจะทำให้การศึกษาต่อไป

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนของธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในก้อนอนุภาคที่เกิดการเกาะตัว

Position	Elements (%)							
	Sodium (Na)	Magnesium (Mg)	Aluminium (Al)	Silicon (Si)	Potassium (K)	Calcium (Ca)	Titanium (Ti)	Iron (Fe)
A	4.12	4.42	6.03	35.63	1.83	20.37	0.52	27.08
B	3.84	4.38	7.14	36.92	2.46	22.25	0.59	22.41
C	2.91	2.74	7.22	51.35	4.34	13.80	0.70	16.95
D	0.66	0	34.37	56.02	1.6	1.35	4.64	1.37



(a) พื้นผิวภายนอกของก้อนอนุภาคที่เกาะตัว (80:20)



(b) พื้นผิวภายในของอนุภาคที่เกาะตัว (80:20)

รูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวของก้อนอนุภาคที่เกิดการเกาะตัวจากการทดลอง

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดเบดแบบห้องเผาไหม้สั้นที่สัดส่วน 70:30 80:20 และ 100:0 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสองร่วมกันในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดเบด และศึกษาถึงสมรรถนะของเตาเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงร่วม โดยพบว่าสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในลักษณะฟลูอิดเบดได้ต่อเนื่องโดยไม่ต้องผสมวัสดุเฉื่อยเป็นเบด สำหรับผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีแนวโน้มจะลดลงตามปริมาณของถ่านหินบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากถ่านหินต้องการระยะเวลาในการเผาไหม้ที่มากกว่าเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนของคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสมถ่านหิน โดยมีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าระหว่าง 98.8–99.5%
- ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างแอลกอฮอล์และถ่านหินบิทูมินัสที่สัดส่วน 70:30 และ 80:20 เกิดการเกาะตัวของเถ้าเชื้อเพลิงโดยมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสมถ่านหินบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการลดอุณหภูมิเบดในการเผาไหม้จาก 1,100°C เหลือประมาณ 900°C ไม่สามารถกำจัดปัญหาดังกล่าวได้ โดยสาเหตุหลักคาดว่ามาจากยางเหนียวที่เกิดขึ้นระหว่างที่สารระเหยถูกปลดปล่อยซึ่งทำให้เกิดการเกาะตัวของอนุภาคถ่านหิน แล้วจึงเกิดการหลอมตัวของเถ้าเชื้อเพลิงที่เกิดการเกาะตัวกันนี้

3. ในก้อนอนุภาคที่เกิดการเกาะตัวจะประกอบด้วยธาตุหลักคือ ซิลิกอน แคลเซียม เหล็ก และอะลูมิเนียม โดยในการวิเคราะห์พื้นผิวภายนอกและพื้นผิวภายในจะมีปริมาณธาตุที่แตกต่างกัน โดยภายนอกจะมีปริมาณของธาตุหลักโดยประมาณดังนี้ซิลิกอน 35–36% แคลเซียม 20–22% และเหล็ก 22–27% ส่วนภายในจะมีปริมาณซิลิกอนมากกว่า 50% ทั้งสองตำแหน่งที่ทำการวัด

4. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ไม่สามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นผลให้เกิดขึ้นการเกาะตัวของก้อนอนุภาคบนแผ่นกระจายอากาศได้อย่างชัดเจน ต้องศึกษามีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพิ่มเติม

4. ปริมาณแก๊สเผาไหม้ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ทางออกของเตา โดยในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่า O_2 ระหว่าง 10–12% สำหรับ CO_2 มีค่าในช่วง 8.3–9.8% เมื่อพิจารณาแก๊สมลพิษที่ระดับปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่ 6% พบว่า ปริมาณ CO มีค่าน้อยในช่วง 60–110 ppm และปริมาณ NO_x มีค่าระหว่าง 212–350 ppm

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย รวมถึงนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ช่วยในการเก็บข้อมูลตลอดระยะเวลาการทดลองในงานวิจัยนี้ และบริษัท ยูนิคไมนิ่ง เซอร์วิส เซส มหาชน จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านหินป้อนมันส์ตลอดการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Thongnork, P., Wongchang, T. and Soponronnarit S., 2005, "A short combustion chamber fluidized-bed combustor: Part I. effects of primary air on combustor performance" The 19th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, 19th-21st October 2005, Phuket
- [2] Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Wongchang, T. and Soponronnarit S., 2005, "A short combustion chamber fluidized-bed combustor: Part II. effects of upper secondary air on combustor performance" The 19th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, 19th-21st October 2005, Phuket
- [3] L. Armesto, Bahillo A, Veijonen k, Cabanillas A and Otero J. "Combustion Behavior of Rice Husk in a Bubbling Fluidized Bed", Biomass and Bioenergy, 2002, Vol 23, No 3, pp 171-179
- [4] W. Permchart and V.I. Kouprianov, "Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized bed firing various biomass fuels", Bioresource Technology, Vol 92, pp. 83-91
- [5] Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.-U., Ogada, T., Siagi, Z., 2000, "Combustion of agricultural residue", Progress in energy and combustion science, Vol.26, PP.1-27
- [6] Gayan, P., Adanez, J., de Diego L.F., Gracia-Labiano, F., Cabanillas, A., Bahillo, A., Aho, M., Veijonen, K., 2004, "Circulating fluidised bed co-combustion of coal and biomass" Fuel, Vol. 83, pp. 277-286
- [7] Amitay, A.T., Topal, H., 2004, "Co-combustion of olive cake with lignite coal in circulating fluidized bed", Fuel, Vol. 83, pp. 859-867
- [8] Kuprianov, V.I., Janvijitsakul, K., Permchart, W., 2006, "Co-firing of sugar cane bagasse with rice husk in a conical fluidized-bed combustor", Fuel, Vol. 85, pp.434-442
- [9] Madhiyanon, T., Piriyaungroj N, Nathakarannakule A. and Soponronnarit S. "Development of a Vortexing-Fluidized bed Combustor for Rice Husk Fuel, The 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, 15th-17th October 2003, 113(IC033)
- [10] Madhiyanon, T., Piriyaungroj, N, Thongnork, P., and Soponronnarit S. "Vortexing-Fluidized bed Combustor(VFBC) Part I: effects of primary air on performance of combustor, The 18th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, 18th-20th October 2004, Khon-khean
- [11] Madhiyanon, T., Piriyaungroj N, Thongnork, P., and Soponronnarit S. "Vortexing-Fluidized bed Combustor(VFBC) Part II: effects of secondary air on performance of combustor, The 18th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, 18th-20th October 2004, Khon-khean
- [12] Madhiyanon, T., Piriyaungroj N and Soponronnarit S. "A Novel Vortex-Fluidized bed Combustor with two combustion chambers for rice husk fuel, Journal of Science and Technology, 2004, Vol. 6, pp.875-893
- [13] Lin, C., and Wey, M., 2004, "The effect of mineral compositions of waste and operating conditions on particle agglomeration/defluidization during incineration", Fuel, Vol. 83, pp. 2335-2343
- [14] Vuthaluru, H., and Zhang, D., 2001, "Effect of coal blending on particle agglomeration and defluidization during spouted-bed combustion of low-rank coals", Fuel processing technology, vol. 70, pp. 41-51
- [15] Tangsathitkulchai, C. and Tangsathitkulcha, M., 2001, "Effect of bed materials and additives on the sintering of coal ashes relevant to agglomeration in fluidized bed combustion", Fuel processing technology, vol. 72, pp. 163 – 183
- [16] Oka, S.N., 2004, fluidized Bed Combustion, Marcel Dekker, USA, pp. 211-229
- [17] Kakaras, E., Fryda, L. and Pavlidou, E., 2006, "Experimental investigation of fluidized bed co-combustion of meat and bone meal with coals and olive bagasses", Fuel, Vol. 85, pp.1671–1678
- [18] Brus, E., Ohman, M., and Nordin, A., 2005, "Mechanisms of bed agglomeration during fluidized-bed combustion of biomass fuels", Energy & Fuels, vol.19, pp. 825–832.