การใช้เกาลินร่วมกับถ่านหินเป็นสารเติมแต่งในการเผาไหม้ฟางข้าวเพื่อแก้ปัญหาฟาล์วลิ่ง
An Using Additive of Kaolin with Anthracite coal for Solving Fouling Problem from Combustion of Rice straw

สราวุฒิ สังวรกาญจน์*, ธรรมนูญ อุดมมั่น และฐานิตย์ เมธิยานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10530
*ติดต่อ: E-mail: Sungworagan6@hotmail.com โทร 02-988-3655 ต่อ 3107

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดปัญหาการเกิดฟาล์วลิ่งจากการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบที่สัดส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งเกาลินร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ ที่อัตราส่วนเกาลิน 2% ร่วมกับถ่านหิน 32.1% และเกาลิน 3.7% ร่วมกับถ่านหิน 17.9% โดยน้ำหนักของฟางข้าว ในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบเอียงขนาดพิกัด 150 kW_{th} ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณถ่านหินและมีอุณหภูมิในห้องเผาไหม้อยู่ในช่วง 820-850°C การเผาไหม้ฟางข้าวและแกลบโดยใช้สารเติมแต่งเกาลินร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์สามารถลดการเกิดฟาวลิ่งได้อย่างดี โดยเดโพสิตฟลักซ์อยู่ในช่วง 40-68 g/m^2h ซึ่งส่งผลให้ความสามารถการถ่ายเทความร้อนสัมพัทธ์ลดลงไม่เกิน 5% ในขณะที่การเผาไหม้ที่ไม่ผสมสารเติมแต่งมีเดโพสิตฟลักซ์สูงถึง 285 g/m^2h ส่งผลให้ความสามารถการถ่ายเทความร้อนลดลงถึง 35% ดังนั้นผลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าการใช้สารเติมแต่งเกาลินร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดการเกิดฟาล์วลิ่งได้
คำหลัก: เกาลิน; ถ่านหินแอนทราไซต์; ฟางข้าว; ฟาล์วลิ่ง; เตาเผาไหม้ตะกรับ

Abstract

This research investigated to mitigate the fouling problem from the combustion of rice straw/rice husk at the ratio of 80:20 by weight using kaolin as an additive and co-firing with anthracite coal at content of kaolin 2% with anthracite coal 32.1%, and kaolin 3.7% with anthracite coal 17.9% by weight of rice straw in a step grate-fired combustor with a 150 kW_{th} capacity. The results showed that the combustor temperature increased with coal contents and presented in range of 820-850°C. The combustion of rice straw/rice husk mixture with kaolin and anthracite coal displayed a superior ability to abate the fouling problem as a result of the deposit flux in range of 40-68 g/m^2h which caused heat uptake by the probe reduce less than 5%. In comparison with the combustion of rice straw/rice husk without additives, the deposit flux was 285 g/m^2h, leading to decrease heat uptake by the probe 35%. Consequently, the results from this research revealed that using kaolin as an additive and co-firing with anthracite coal was the alternative option for mitigating the fouling problem.
Keywords: Kaolin; Anthracite coal; Rice straw; Fouling; Grate-fired combustor.

1.บทนำ

ในการศึกษาค้นหาพลังงานรูปแบบต่างๆเพื่อทดแทนพลังงานที่ได้จากซากฟอสซิล ที่มีแนวโน้มของราคาที่สูงขึ้น เป็นงานวิจัยที่ต้องพัฒนากันอย่างต่อเนื่องเพื่อหาแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถนำพลังงานมาใช้ประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย ลดปัญหามลพิษและสิ่งแวดล้อมของโลก รวมทั้งช่วยประหยัดพลังงาน ซึ่งประเทศไทยได้คำนึงถึงความสำคัญในการประหยัดพลังงานหรือการหาพลังงานทดแทน ทางกระทรวงพลังงานของประเทศไทย ได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy DevelopmentPlant :AED:2015) [1] การทดแทนพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นหัวข้อหนึ่งที่ถูกระบุไว้ในแผน เชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรในประเทศไทยนั้นมีหลากหลายชนิดฟางข้าวเป็นชีวมวลที่เหลือจากการเก็บ

เกี่ยวข้าวประมาณ 15.69 ตัน/ปี ซึ่งยังไม่มีการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนอย่างจริงจัง ดังนั้นจึงเป็นโอกาสดีหากจะนำฟางข้าวเหล่านี้มาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก และสามารถตอบโจทย์นโยบายการใช้พลังงานทดแทนได้

อย่างไรก็ตาม การนำเชื้อเพลิงชีวมวลบางประเภทมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้โดยตรงในหม้อไอน้ำต้องคำนึงถึงปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นเช่น จากการเผาไหม้องค์ประกอบทางเคมีบางธาตุที่อยู่ในเชื้อเพลิง อาจก่อให้เกิดปัญหาทางเทคนิคบางประการ เช่น ปัญหาสิ่งสกปรกเกาะชุดทำไอน้ำส่งผลให้ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำต่ำลง (fouling) หรือเรียกว่าเดโพสิต (Deposit) และปัญหาการติดขัดของชุดขับเคลื่อนเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้จากการหลอมตัวของเถ้าบนตะกรับ (sintering และ slagging) โดยปัญหาเหล่านี้เกิดจากสารประกอบบางส่วนในเชื้อเพลิงชีวมวล คือ Potassium (K) Chlorine (Cl) และ Sulfur (S) เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบ KCl ซึ่งมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ 750 °C จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าว[2-4] ทั้งนี้ ฟางข้าวเป็นเชื้อเพลิงหนึ่งที่มีองค์ประกอบของ K_2O อยู่มากกว่า 10% [5] ทั้งนี้มีงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศศึกษาผลกระทบและการทดปัญหาดังกล่าวพบว่า จากการใช้ฟางข้างเป็นเชื้อเพลิงทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ หรือระดับอุตสาหกรรม พบว่าเกิดปัญหา fouling บนท่อค่อนข้างรุนแรงและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยตรง[5] แต่ไม่พบจากการหลอมตัวของเถ้าหนัก (sintering และ slagging) ในการเผาไหม้ฟางข้าว[6] และวิธีกาลดปัญหาส่วนการศึกษาการลดปัญหา fouling มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การเผาไหม้ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอม (Melting point) ของสารประกอบ KCl และการใช้วิธีการทางเคมีโดยการให้ K เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีจุดหลอมสูงกว่าอุณหภูมิเผาไหม้ปกติ[7-9]คือการใช้สารเติมแต่งที่มีองค์ประกอบของ Al เผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยให้ K เปลี่ยนเป็นองค์ประกอบธาตุใหม่ K-Al-Silicate ที่มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น[6-7] สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งสารเติมแต่งที่หาง่ายภายในประเทศคือดินขาว(Kaolin) สารเติมแต่งอีกชนิดที่น่าสนใจคือถ่านหินแอนทราไซต์ที่มีองค์ประกอบของ Al ของเถ้าเช่นกันประกอบกับบางอุตสาหกรรมมีการใช้งานอยู่บ้างแล้วหรืออาจจะใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริมก็อาจจะเป็นผลพลอยได้ในการลดปัญหา fouling จากการเผาไหม้ชีวมวลได้อีกทาง

ดังนั้น บทความวิจัยนี้นำเสนอการใช้เกาลินร่วมกับถ่านหินเป็นสารเติมแต่งในการเผาไหม้ฟางข้าวเพื่อแก้ปัญหาฟาล์วลิ่งหรือเดโพสิต จากการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบ (โดยแกลบจะเป็นตัวช่วยให้ฟางข้าวเคลื่อนตัวได้ในเตาเผาไหม้ขนาด Pilot scale [8]) ใช้เตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นระดับห้องปฏิบัติการขนาดพิกัด 150 kW_{th} รวมทั้งวิเคราะห์กลไกการเกิดเดโพสิตจากองค์ประกอบทางเคมีของเดโพสิตด้วยเทคนิค SEM-EDX และทำแผนที่ธาตุ

2. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและการทดลอง

2.1 เชื้อเพลิงและสารเติมแต่งในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองคือฟางข้าวแห้งที่ใช้เลี้ยงสัตว์ถูกอัดและมันรวมเป็นก้อน นำมาผ่านกระบวนการสับให้มีความยาวน้อยกว่า 3 cm สำหรับแกลบที่ใช้นำมาจากโรงสีข้าวทั่วๆ ไป ส่วนเกาลินที่นำมาใช้ในการทดลอง คือดินขาวจากแหล่งทางภาคใต้ของประเทศและถ่านหินแอนทราไซต์ที่นำมาใช้มีลักษณะคล้ายผงแป้งมีขนาดน้อยกว่า 1 mm. ดังรูปที่ 1


(ก) ฟางข้าว (ข) แกลบ

รูปที่ 1 ลักษณะเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง


(ก) ดินขาว(Kaolin) (ก) ถ่านหินแอนทราไซต์

รูปที่ 1 สารเติมแต่งที่ใช้ในการทดลอง

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงและองค์ประกอบทางเคมีในเถ้าเชื้อเพลิงและสารเติมแต่ง ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงด้วยวิธีการโดยประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate analysis) ซึ่งมีความสำคัญต่อการหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้และการพิจารณาคุณสมบัติการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

Parameter	Rice Husk	Rice Straw	Anthracite
Moisture(w.t%)	10.3	7.5	4.29
Proximate analysis	*wt.% on dry basis*		
Volatiles	55.6	71.7	9.57
Fixed Carbon	20.1	10.1	80.61
Ash	14	10.7	5.53
Ultimate analysis	wt.% on dry basis		
Carbon	38.7	40.3	79.38
Hydrogen	5.1	5.5	2.16
Oxygen	55.8	53.2	10.81
Nitrogen	0.4	0.4	0.85
Sulphur	0	0.09	0.27
HHV (MJ/kg dry)	14.98	15.21	24

ตารางที่ 2 เป็นการแสดงผลขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าเชื้อเพลิงและเกาลินที่ใช้เป็นสารเติมแต่ง ซึ่งได้จากการนำเถ้าของเชื้อเพลิงที่ถูกเตรียมก่อน โดยการนำตัวอย่างเชื้อเพลิงไปให้ความร้อนในตู้อบที่ถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 550°C จากนั้นนำเถ้าที่ได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยใช้เครื่อง X-Rey Fluorescence Spectrometer (XRF)

จากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าฟางข้าวและแกลบในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าเถ้าของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด มีซิลิกอน (Si) เป็นองค์ประกอบหลักโดยเฉพาะเถ้าของแกลบประกอบด้วยซิลิกอน (Si) เป็นส่วนใหญ่ โพแทสเซียม (K) มีมากในฟางข้าว แต่มีอยู่น้อยในแกลบ เช่นเดียวกับคลอรีน (Cl) ซึ่งพบมากในฟางข้าว ส่วนเกาลินองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) มากกว่า 80% ขององค์ประกอบธาตุโดยรวม

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงและเกาลิน

Parameter	Rice Husk	Rice Straw	KAOLIN	Anthracite Coal
Ash composition	wt.% on dry basis			
Si_2O	90.50	71.4	49.0	43.3
Al_2O_3	0.11	0.22	34.30	31.50
TiO_2	0	0.01	0.52	0.63
Fe_2O_3	0.07	0.129	1.00	10.60
CaO	0.59	3.17	0.01	3.30
MgO	0.58	2.04	0.35	1.39
Na_2O	0.05	0.45	0.07	1.15
K_2O	2.32	11.90	1.80	3.62
P_2O_5	0.93	1.22	-	0.35
SO_3	0.30	0.86	-	3.62
Cl	0.14	3	-	0

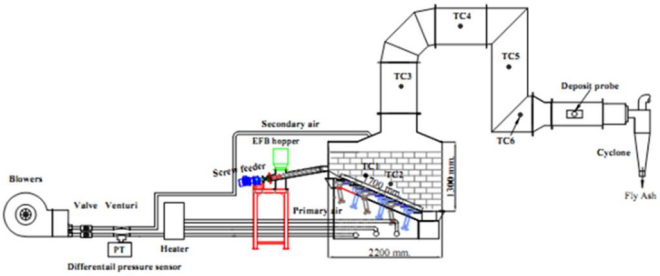
สามารถวิเคราะห์ในเบื้องต้นถึงแนวโน้มการที่จะเกิดสารอนินทรีย์ (KCl) มีจุดหลอมเหลวที่ 740°C จากการเผาไหม้ฟางข้าวที่มีบทบาทต่อการเกิดเดโพสิตบนผิวท่อไอน้ำและการกัดกร่อน [10] ส่วนแกลบพบว่าสารอนินทรีย์ในเถ้าส่วนใหญ่คือ Si และถึงแม้ว่าจะมี Cl อยู่บ้างแต่มีปริมาณน้อยมากดังนั้นปริมาณสารประกอบ KCl ที่เกิดขึ้นจึงไม่มีนัยสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาฟาล์วลิ่งได้

สำหรับความเป็นไปได้ถึงแนวโน้มการเกิดสารประกอบใหม่จากการทำปฏิกิริยาของธาตุอนินทรีย์ในเถ้าเชื้อเพลิงพิจารณาได้จากสัดส่วนของโพแทสเซียม(K) ในเชื้อเพลิง และปริมาณอลูมิเนียม(Al) ในเกาลินและถ่านหินที่ใช้เป็นสารเติมแต่ง (K/Al) จากข้อมูลโพแทสเซียม(K) เถ้าของเชื้อเพลิงและองค์ประกอบ Al ในเกาลินดังแสดงตารางที่ 2 อยู่ในรูป K-Al silicate มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1600°C การคำนวนปริมาณสารสัมพันธ์ที่มี Al พอดีในการทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ซึ่งใช้เกาลินร้อยละ 5% โดยน้ำหนักฟางข้าว ส่วนถ่านหินแอนทราไซต์ใช้ร้อยละ 53.6% โดยน้ำหนักฟางข้าว

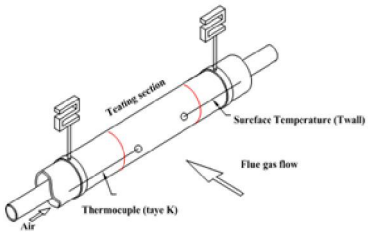
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองทั้งหมดจะดำเนินการในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นบันได (Step grate-fired combustor) พิกัด150 kW_{th} ขนาดของตะกรับซึ่งจัดวางในแนวเอียงมีขนาด 0.68x1.7 m มิติภายนอกของเตาคือ 1.15x2.35x4.40 m (กxยxส) ในรูปที่ 2 สำหรับแผนภาพแสดงอุปกรณ์และตำแหน่งจัดวางอุปกรณ์ภายในระบบในเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าทางด้านหน้าเตาด้วยสกรูลำเลียง

จำนวน 2 ชุด ซึ่งควบคุมความเร็วรอบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ขณะที่กระบวนการเผาไหม้ดำเนินไปเชื้อเพลิงจะถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปทางด้านท้ายของห้องเผาไหม้โดยการเคลื่อนที่กลับไป-มาของใบกวาดที่ติดตั้งอยู่เหนือขั้นบันไดซึ่งอยู่กับที่ เถ้าเชื้อเพลิงที่อยู่บริเวณด้านท้ายสุดของห้องเผาไหม้จะตกลงสู่สกรูลำเลียงออกไปจากห้องเผาไหม้โดยสกรูลำเลียงเถ้า อากาศเผาไหม้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) อากาศปฐมภูมิซึ่งถูกจ่ายเข้าทางด้านล่างของพื้นตะกรับสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงบนตะกรับแบ่งจ่ายประมาณ 67% ของอากาศรวม และ 2) อากาศทุติยภูมิซึ่งถูกจ่ายเข้าไปภายในห้องเผาไหม้ที่บริเวณเหนือกองเบดเชื้อเพลิงซึ่งมีความสูงจากพื้นตะกรับประมาณ 1.5 m เพื่อเผาไหม้สาระเหยและอนุภาคเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดแบ่งจ่ายประมาณ 33% และในส่วนของการอุ่นอากาศปฐมภูมิใช้ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์อุ่นอากาศก่อนป้อนเข้าห้องเผาไหม้



(ก) แผนภาพเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้น



(ข) แผนภาพท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดลองเผาไหม้ฟางข้าวในระดับห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3 เงื่อนไขและสภาวะการทดลอง

Test no.	Conditions						Deposit Flux (g/m^2h)
	Rice Straw : Rice Huck	Additive (wt.% of straw)	Stoich. Ratio (-)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_6 (°C)	
1. (Ref.)[5]	80:20	-	-	855	801	763	188
2.	80:20	Anth.32.1+kao.2	1.0	838	751	804	68
3.	80:20	Anth. 17.9+kao.3.7	1.0	824	739	804	40

ส่วนการจำลองสภาพท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งหรือท่อเดโพสิต (Deposit probe)[2] ซึ่งถูกติดตั้งในบริเวณท้ายของท่อลำเลียงแก๊สเผาไหม้ (ดูรูปที่ 2(ข)) เพื่อจำลองสภาวะการทำงานของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ท่อเดโพสิตถูกออกแบบด้วยจุดประสงค์ คือ ศึกษาผลกระทบของการเกิดเดโพสิตหรือฟาวลิ่งต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน ท่อเดโพสิตใช้ท่อ SCH40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 35 mm ใช้อากาศเป็นตัวกลางการรับความร้อน อุณหภูมิผิวท่อเดโพสิต (Twall) วัดโดยเทอร์โมคับเปิล ในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศใช้โรตามิเตอร์ (Rota meter) และวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่ไหลผ่านท่อเดโพสิตด้วยเทอรโมคับเปิลสำหรับนำไปคำนวณความสามารถการรับความร้อน ดังสมการที่ 1 และคำนวณความสามารถการถ่ายเทความร้อนสัมพัทธ์ ดังสมการที่ 2

สมการที่ใช้ในการคำนวณความสามารถการรับความร้อน

$$Q_{th} = \dot{m}_a c_{p,a}\left(T_{a,out} - T_{a.in}\right) \quad (1)$$

ความสามารถการถ่ายเทความร้อนสัมพัทธ์

$$Relative\ heat\ uptake\ (\%) = \left[\frac{Q_t}{Q_{\max}}\right] \times 100\ \% \quad (2)$$

กำหนดให้

Q_{th} = อัตราการรับความร้อน (W)

Q_t = อัตราการรับเทความร้อนรวมที่เวลาใดๆ(W)

Q_{Max} = อัตราการรับเทความร้อนรวมสูงสุด (เวลาเริ่มต้น) (W)

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)

$c_{p,a}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg.k)

$T_{a,in}$ = อุณหภูมิอากาศเข้าท่อไอน้ำร้อนจำลอง(°C)

$T_{a,out}$ = อุณหภูมิอากาศเข้าท่อไอน้ำร้อนจำลอง(°C)

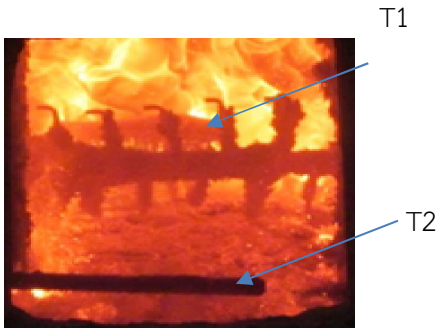
การดำเนินการทดลองทำการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้น มีเงื่อนไขและสภาวะการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1.เผาไหม้แกลบร่วมกับฟางข้าวล้วน(Ref.) และ 2. เผาไหม้เผาไหม้แกลบร่วมกับฟางข้าวผสมสารเติมแต่งร่วมกันระหว่างถ่านหินแอนทราไซต์กับเกาลินที่ปริมาณสารสัมพันธ์ที่ Al พดีทำปฏิกิริยายากับ K ในเถ้าเชื้อเพลิงพอดี โดยแบ่งสัดส่วนการผสมเป็นสารเติมแต่ง แอนทราไซต์(Ant.)+เกาลิน(Kao.) เท่ากับ Ant. 60% + Kao.40% และ Ant.60% + Kao.40% (ของปริมาณสารสัมพันธ์) หรือคำนวณโดยน้ำหนักของฟางข้าวเท่ากับ คือ Ant.32.1+Kao.2 และ Ant.17.9+Kao.3.7(โดยน้ำหนักฟางข้าว) โดยจะผสมสารเติมแต่งกับเชื้อเพลิงล่วงหน้าก่อนการเผาไหม้(premix) ในทุกเงื่อนไขการทดลองควบคุมอุณหภูมิเผาไหม้ T1 800-850 (สูงกว่าจุดหลอม KCl) ส่วนสภาพท่อไอน้ำร้อยวยวดยิ่ง ควบอุณหภูมิเข้าปะทะท่อไอน้ำ T6 ≈800°C ควบคุมอุณหภูมิผิวท่อไอน้ำร้อนอยู่ในช่วง 400-450°C ดำเนินการภายใต้สภาวะคงตัว(Study state) เป็นระยะเวลา 11 ชั่วโมง สิ้นสุดการทดลองนำเดโพสิตที่เกาะบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเดโพสิตที่เกาะบนผิวท่อ และนำตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีด้วยการส่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDX และทำแผนที่ธาตุ

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาการเกิดเดโพสิตการเผาไหม้แกลบร่วมกับฟางข้าวในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้น และผลของแนวทางการลดของความรุนแรงของเดโพสิตบนท่อจำลองสภาพท่อไอน้ำจากการใช้สารเติมแต่งเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิง โดยพิจารณาลักษณะทายภาพและฟลักซ์ของเดโพสิต ผลกระทบต่อความสามารถการรับความร้อนของท่อไอน้ำ และวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบธาตุของเดโพสิต การเกิด และการเกิดสารประกอบใหม่จากการใช้ถ่านหินแอนทราไซต์ร่วมกับเกาลินเป็นสารเติมแต่ง สามารถแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้การเผาไหม้

การเผาไหม้ ฟางข้าว:แกลบ 80:20 โดยน้ำหนัก ใช้สารเติมแต่งร่วมกัน หินแอนทราไซด์ (Ant.)+เกาลิน (Kao.) เท่ากับ 32.1+2 และ17.9+3.7 %โดยน้ำหนักฟางข้าว(ปริมาณสารสัมพันธ์ที่ทำปฏิกิริยากับ K ในฟางข้าว) จากรูปที่ 3 และตางรางสรุปผลการทดลอง สังเกตได้ว่าอุณหภูมิเผาไหม้มีค่าใกล้เคียงกันอุณหภูมิ T1 และT2 ค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 720-850°C การเผาไหม้ส่วนใหญ่อยู่บริเวณ T1 อยู่ในช่วง 820-850°C สังเกตได้จากเปลวที่เกิดขึ้นตั้งแต่ช่องป้อนเชื้อเพลิง และเปลวไฟเริ่มน้อยลงเมื่อเชื้อเพลิงเลื่อนมาถึงตำแหน่ง T2 ส่งผลให้อุณหภูมิลดลง เหลือประมาณ 750°C ต่ำ นอกจากนี้จากการสังเกตุได้ว่ามีอนุภาคที่ปลิวไปกับแก๊สเสียในการทดลองที่มีการผสมถ่านหินในรูปที่ 3(ข) โดยอุณหภูมิ T6 มีค่า 800°C ถูกควบคุมให้มีค่าไกล้เคียงกันทุกการทดลองเพื่อลดผลกระทบของความสามารถการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้

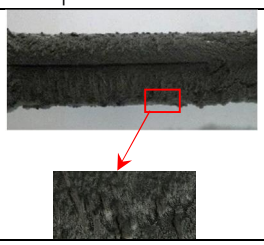
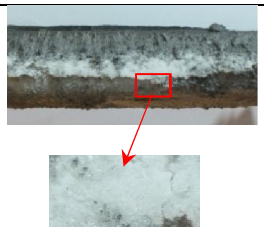
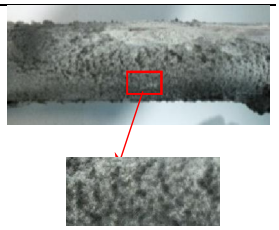
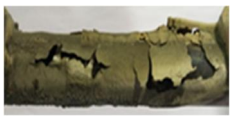
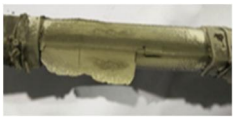
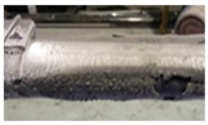
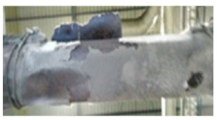


(ก) ลักษณะภายในห้องเผาไหม้

(ข) ลักษณะการปลิวของเถ้าถ่านหิน
รูปที่ 3 พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้

4.2 ลักษณะของเดโพสิตบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

จากภาพถ่ายเดโพสิตด้านหน้า(ด้านปะทะแก๊สไอเสีย) ด้านข้าง ด้านหลังของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองที่เกิดจากการเผาไหม้ ฟางข้าว:แกลบ 80:20 โดยน้ำหนักใช้สารเติมแต่งร่วมกัน หินแอนทราไซด์ (Ant.)+เกาลิน (Kao.) เท่ากับ 32.1+2 และ 17.9+3.7 โดยน้ำหนักฟางข้าว (ปริมาณสารสัมพันธ์ที่ทำปฏิกิริยากับ K ในฟางข้าว) ดังแสดงรูปที่ 4 พบว่าโดยรวมของเดโพสิตเกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าท่อ (ด้านท่อหันเข้าปะทะกับการไหลของแก๊ส) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวปนกับสีสนิมเกาะรวมตัวกันอยู่เป็นรูปทรงสามเหลี่ยมสามารถขูดออกได้โดยง่ายและมีการหลุดออกเองเมื่อถอดออกจากห้องเผาไหม้ ส่วนใหญ่มีความหนาด้านปะทะแก๊สไอเสียประมาณ 2 mm. ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นอนุภาคถ่านหินโดยมีองค์ประกอบของเหล็ก (Fe) ปะปนอยู่[5] คาดว่าถ่านหินที่ปลิวหลุดมาจากแก๊สเผาไหม้บางส่วนมาเกาะบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง ซึ่งแสดงผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่จะกล่าวในภายหลัง และพบอนุภาคของเกาลินที่มีองค์ประกอบของ Al ที่ปลิวมาเกาะอยู่บนท่อไอน้ำ ซึ่งแตกต่างจากกรณีเผาไหม้แกลบกับฟางข้าวโดยไม่มีการผสมสารเติมแต่งที่มีเป็นชั้นหนาประมาณ 8 mm. ดังแสดงในรูปที่ 5 มีการโอบไปด้านหลัง(ประมาณครึ่งเส้นรอบวง) ส่วนบริเวณด้านหลังท่อไอน้ำมีลักษณะเป็นผงละเอียดเกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ ซึ่งพบเป็นผงอนุภาคสีขาวปะปนอยู่(ซึ่งคาดว่าเป็นแอโรซอลของ KCl) อยู่ด้วย ในทุกเงื่อนไขการทดลองไม่พบ KCl ที่เกาะบริเวณด้านหน้าท่อ

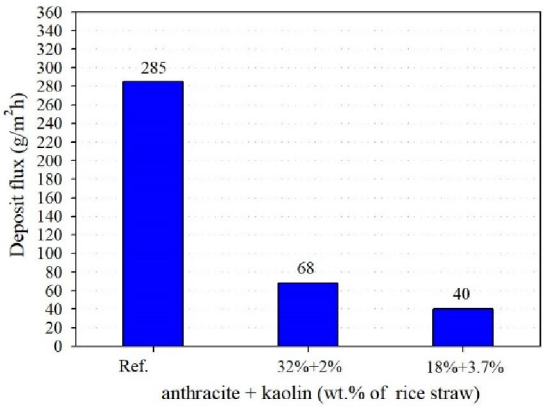
Experiment Straw : Rice husk	Additive (wt.% of straw)	Upstream Temp.°C	Deposit probe		
			Upstream side	Lateral side	Downstream side
80 : 20	-	740			
80 : 20	Anth.32.1+kao2	804			
80 : 20	Anth.17.9+kao3.7	803			

รูปที่ 4 ลักษณะของเดโพสิตการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟางข้าว:แกลบ 80:20(โดยน้ำหนัก)


รูปที่ 5 เดโพสิตที่ถูกนำออกมาจากท่อไอน้ำจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมฟางข้าว:แกลบ 80:20 ไม่ผสมสารเติมแต่ง

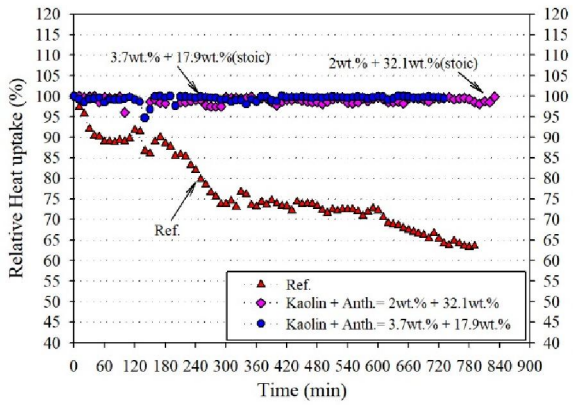
4.2 เดโพสิตและความสามารถการถ่ายเทความร้อน

ผลของเดโพสิตฟลักซ์(g/m^{2}h)จากการเผาไหม้ฟางข้าว:แกลบ 80:20 โดยน้ำหนักใช้สารเติมแต่งร่วมกันระหว่าง หินแอนทราไซด์ (Ant.)+เกาลิน(Kao.) เท่ากับ 32.1%+2% และ 17.9%+3.7% โดยน้ำหนักฟางข้าว (ปริมาณสารสัมพันธ์ที่ทำปฏิกิริยากับ K ในฟางข้าว) ดังแสดงรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณการเกิดเดโพสิตใกล้เคียงกันคือ 40-68 g/m^{2}h ซึ่งสามารถลดประมาณเดโพสิตที่เกิดจากการเผาไหม้แกลบกับฟางข้าวอย่างเดียวประมาณ 5 เท่า(การเผาไหม้ฟางข้าวไม่ผสมสารเติมแต่งมีค่าสูง 285 g/m^{2}h) ลักษณะเดโพสิตที่ยังเกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากผงถ่านหินและเกาลินที่ปลิวไปกับแก๊สเผาไหม้ ซึ่งพบสารประกอบบนเดโพสิตเป็น Fe และ Al ซึ่งสามารถทำความสะอาดได้โดยง่าย ต่างจากการเผาไหม้แกลบกับฟางข้าวอย่างเดียวที่เกิดปริมาณที่เยอะและทำความสะอาดยาก



รูปที่ 6 เดโพสิตฟลักซ์ที่เกาะบนท่อไอน้ำร้อน

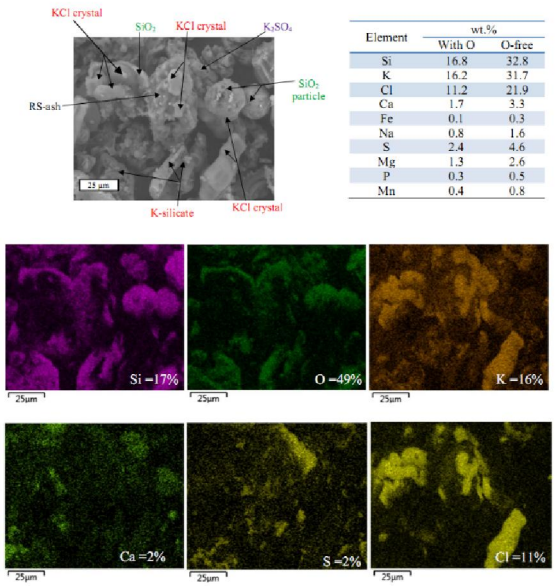
ส่วนผลกระทบต่อความสามารถการถ่ายเทความร้อนสัมพัทธ์เทียบกับค่าที่เวลาเริ่มต้นในรูปที่ 9 พบว่าในทุกเงื่อนไขการทดลองเดโพสิตที่เกาะบนท่อไอน้ำร้อนส่งผลต่อความสามารถการถ่ายเทความร้อนน้อยมากค่าไม่เกิน 5 % อาจเป็นเพราะปริมาณและพื้นที่ปกคลุมน้อยมาก(เกิดขึ้นเฉพาะด้านหน้าเป็นฐานสามเหลี่ยมแคบ) ซึ่งไม่ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สเผาไหม้กับผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในขณะที่การเผาไหม้โดยไม่ใช้สารเติมแต่งความสามารถการถ่ายเทความร้อนลดลงถึง 35% ภายในระยะเวลาการทดลองที่ 11 ชั่วโมงเท่ากัน



รูปที่ 9 ความสามารถการถ่ายเทความร้อน

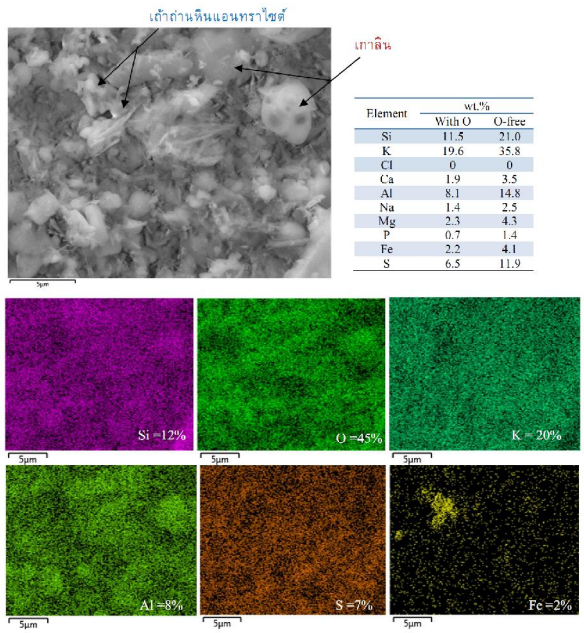
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเดโพสิต

การวิเคราะห์โครงสร้างของเดโพสิตที่เกาะบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งด้วยเทคนิค SEM-EDX และแผนที่ธาตุ โดยการนำเดโพสิตที่เกาะบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง(ด้านปะทะแก๊สเผาไหม้) จากการเผาไหม้ ฟางข้าว:แกลบ (โดยไม่ใช้สารเติมแต่ง)[5] และการเผาไหม้ร่วมกับสารเติมแต่งถ่านหินร่วมกับเกาลิน มาวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบด้วยเทคนิค SEM-EDX แสดงในรูปแบบของแผนที่ธาตุในการวิเคราะห์การทำปฏิกิริยาขององค์ประกอบธาตุในเดโพสิตดังแสดงในรูปที่ 10



Element	wt.%	
	With O	O-free
Si	16.8	32.8
K	16.2	31.7
Cl	11.2	21.9
Ca	1.7	3.3
Fe	0.1	0.3
Na	0.8	1.6
S	2.4	4.6
Mg	1.3	2.6
P	0.3	0.5
Mn	0.4	0.8

(ก)ไม่ผสมสารเติมแต่ง



Element	wt.%	
	With O	O-free
Si	11.5	21.0
K	19.6	35.8
Cl	0	0
Ca	1.9	3.5
Al	8.1	14.8
Na	1.4	2.5
Mg	2.3	4.3
P	0.7	1.4
Fe	2.2	4.1
S	6.5	11.9

(ค) สารเติมแต่งถ่านหินผสมเกาลิน

รูปที่ 10 โครงสร้างและแผนที่ธาตุที่ ของเดโพสิตด้านหน้าท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

จากผลโครงสร้างและองค์ประกอบของเดโพสิตชั้นจากการเผาไหม้แกลบร่วมกับฟางข้าวโดยไม่ใช้สารเติมแต่งของงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงดังรูปที่ 10(ก) จากองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้โดย SEM-EDX พบว่าองค์ประกอบหลัก คือ Si, K และ Cl รองลงมาคือ S และ Ca โดย Si มีประมาณ 33 wt.% และผลรวมของ K, Cl และ S มีประมาณ 52 wt.% จากอัตราส่วนโดยโมล K/(2S+Cl) ซึ่งมีค่าประมาณ 1.0 แสดงว่า K ทั้งหมดอยู่ในรูปของ KCl และ K_2SO_4 แสดงให้เห็นว่าทั้งกลไกการควบแน่นของ KCl และกลไกการปะทะโดยแรงเฉื่อย (inertial impaction) ส่งผลให้มีค่าเดโพสิตฟลักซ์สูงถึง 285 g/m^{2}h

จากผลการทดลองในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาการเผาไหม้ ฟางข้าว : แกลบ (80:20 โดยมวล) ใช้สารเติมแต่งเกาลิน 3.7% ของน้ำหนักฟางข้าว ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ร้อยละ 17.9 ของน้ำหนักฟางข้าว ซึ่งมีปริมาณ Al เป็นไปตามปริมาณสารสัมพันธ์เพื่อทำปฏิกิริยากับ K จากผลการทดลองพบว่ามีเดโพสิตของฟลักซ์เท่ากับ 40 g/m^2·h และผลการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของเดโพสิตบนผิวท่อไอน้ำยวดยิ่งจำลองโดยใช้ SEM-EDX ซึ่งโครงสร้างและองค์ประกอบของชั้นด้านนอกของเดโพสิตบริเวณด้านหน้าท่อไอน้ำแสดงดังรูปที่ 7(ข) ของเดโพสิตด้านหน้าท่อไอน้ำยวดยิ่งจำลองที่หันหน้าเข้าปะทะแก๊สเผาไหม้ พบว่าองค์ประกอบหลักคือ Si, K, Al และ S องค์ประกอบรองลงมาคือ Fe, Na, Ca และ Mg การที่เดโพสิตมี Al และ K เป็นองค์ประกอบหลัก แสดงให้เห็นว่าเดโพสิตชั้นด้านนอกที่หันหน้าเข้าปะทะแก๊สเผาไหม้นี้ประกอบด้วยอนุภาคของเกาลินและเถ้าถ่านหินแอนทราไซต์เป็นหลัก และโพแทสเซียมถูกดักจับไว้ได้โดย Al ในเกาลินและเถ้าถ่านหินแอนทราไซต์ และจากแผนที่ธาตุจะเห็นได้ว่าธาตุหลักทุกธาตุกระจายอยู่อย่างค่อนข้างสม่ำเสมอ การปรากฏของ K ในเดโพสิตแสดงให้เห็นว่า Al ในอนุภาคเกาลินและเถ้าถ่านหินแอนทราไซต์ได้รวมตัวกับ K เกิดเป็นสารประกอบโพแทสเซียมอลูมิโนซิลิเกต (K-Al-Silicate) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูง มีข้อน่าสังเกตว่าเดโพสิตมี S เป็นองค์ประกอบหลักด้วยและอยู่ในรูป K_2SO_4 แต่ไม่มี Cl หลงเหลืออยู่ในเดโพสิตเลย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้เกาลินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักฟางข้าว [5] พบว่ามีทั้ง Cl และ S อยู่ในองค์ประกอบของเดโพสิต ดังนั้น ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นประเด็นสำคัญที่ว่าในกรณีการเผาไหม้ที่ใช้สารเติมแต่งเกาลิน 3.7% ของน้ำหนักฟางข้าว ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ร้อยละ 17.9 ของน้ำหนักฟางข้าว ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาซัลเฟชันของ KCl ได้อย่างดีเช่นเดียวกับกรณีการเผาไหม้

ฟางข้าวร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ร้อยละ 53.6 ของน้ำหนักฟางข้าว[5] เนื่องจากการเผาไหม้ถ่านหินทำให้ความเข้มข้นของแก๊ส SO_2/SO_3 ในแก๊สเผาไหม้ถ่านหินแอนทราไซต์นั่นเอง อย่างไรก็ตาม การที่ไม่ปรากฏ KCl ในเดโพสิต แต่มีเถ้าเชื้อเพลิง อนุภาคเกาลิน และเถ้าถ่านหินแอนทราไซต์ไปเกาะอยู่บนผิวท่อไอน้ำได้คาดว่าที่เป็นเช่นนี้เป็นผลมาจาก KCl ที่เกิดขึ้นอยู่ก่อนทำปฏิกิริยากับ SO_2/SO_3 แสดงว่าเริ่มแรกนั้น KCl ได้เกิดการควบแน่นบนท่อไอน้ำอยู่ก่อน และทำให้สามารถดักจับเถ้าเชื้อเพลิง อนุภาคเกาลิน และเถ้าถ่านหินแอนทราไซต์ไว้ได้ ดังนั้นปริมาณ KCl ในเดโพสิตที่ควบแน่นบนผิวท่อไอน้ำจึงมีไม่มากจึงเกิดเดโพสิตในอัตราที่ต่ำลงตามไปด้วย

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการลดเดโพสิตจากการใช้สารเติมแต่งถ่านหินแอนทราไซต์ร่วมกับเกาลินจากการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบในไหม้เผาไหม้ตะกรับแบบขั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบโดยใช้สารเติมแต่งถ่านหินแอนทราไซต์ผสมร่วมกับเกาลิน พบว่าการเผาไหม้ค่อยข้างรุนแรงอุณหภูมิภายในเผาไหม้ 740-850°C ในขณะเผาไหม้พบอนุภาคหลุดไปกับแก๊สไอเสีย
2. ลักษณะเดโพสิตที่เกิดขึ้นเกาะบริเวณด้านปะทะแก๊สไอเสียเกาะกันแบบหลวมๆ พบว่ามีทั้งอนุภาคเถ้าถ่านหิน เถ้าเชื้อเพลิงและผลเกาลินมีค่าเดโพสิตฟลักซ์ 40-68 g/m^2h ลดลงจากกรณีที่ไม่ผสมสารเติมแต่งถึง 5 เท่า ซึ่งส่งผลต่อความสามารถการถ่ายเทความร้อนสัมพัทธ์ลดลงเพียง 2-5%
3. จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าองค์ประกอบของเดโพสิตจากการเผาไหม้ฟางข้าวมีองค์ประกอบหลักคือ KCl ที่เป็นสาเหตุให้เถ้าที่มีองค์ประกอบ Si จับเป็นชั้นเดโพสิต ส่วนองค์ประกอบธาตุของเดโพสิตจาการเผาไหม้ที่มีการผสมเกาลินพบองค์ประกอบธาตุอยู่ในรูปของ K-Al-Silicate และองค์ประกอบของ Fe คือนุภาคถ่านหิน
4. ในการใช้ถ่านแอนทราไซต์ร่วมกับเกาลินเป็นสารเติมแต่งร่วมเผาไหม้ร่วมกับฟางข้าวและแกลบ สามารถเป็นทางเลือกในการนำไปใช้อย่างได้อย่างดี หรืออาจนำเถ้าของถ่านหินมาใช้เป็นสารแตมแต่งก็อาจเป้นทางเลือกหนึ่ง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากฝ่ายบริหารคลัสเตอร์และโปรแกรมวิจัยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติและสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (กันยายน 2558)แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015)

[2] Jensen P.A., Stenholm M., Hald P., (1997), “Deposition investigation in straw-fired boilers”, Energy Fuel, vol.11, PP. 1048-1055.

[3] Hansen L.A., Nielsen H.P., Frandsen F.J., Dam-Johansen K., Horlyck S., Karlsson A., (2000), “Influence of deposit formation on corrosion at a straw-fired boiler”, Fuel Processing Technology, vol. 64, PP. 189-209.

[4] Yang M., Xie Q., Wang X., Dong H., Zhang H., Li C., (2018), “Lowering ash slagging and fouling tendency of high-alkali coal by hydrothermal pretreatment”, International Journal of Mining Science and Technology, (In Press).

[5] ธรรมนูญ อุดมมั่น, ประวิทย์ สิงห์โตทอง, ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2560) “การศึกษาข้อมูลพื้นฐานของการเผาไหม้ของฟางข้าว แกลบ และถ่านหินบิทูมินัส : แนวโน้มการเกิดปัญหาจากเปลี่ยนแปลงของเถ้าเชื้อเพลิงในขณะการเผาไหม้”, การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 16, จังหวัดเชียงใหม่

[6] Theis M., Skrifvars B.-J., Zevenhoven M., Hupa M., and Tran H., (2006), “Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 3: influence of probe surface temperature”, Fuel, vol. 85, PP. 2002–2011.

[7] Zevenhoven M., Yrjas P., Skrifvars B.-J., and Hupa M., (2012), “Characterization of Ash-Forming Matter in Various Solid Fuels by Selective Leaching and Its Implications for Fluidized-Bed Combustion”, Energy Fuels, vol. 26 (10), PP. 6366–6386.

[8] A.A. Khan, W. de Jong, et al., (2006), “Biomass combustion in fluidized bed boiler: Potential problems and remedies.” ***Fuel***, vol.85, pp.1992-2001.

[9] Zevenhoven M., Yrjas P., Skrifvars B.-J., and Hupa M., (2012), “Characterization of Ash-Forming Matter in Various Solid Fuels by Selective Leaching and Its Implications for Fluidized-Bed Combustion”, Energy Fuels, vol. 26 (10), PP. 6366–6386.

[10] Zevenhoven M., Yrjas P., Skrifvars B.-J., and Hupa M., (2012), “Characterization of Ash-Forming Matter in Various Solid Fuels by Selective Leaching and Its Implications for Fluidized-Bed Combustion”, Energy Fuels, vol. 26 (10), PP. 6366–6386.