

## AEC-016

### การแก้ปัญหาฟาล์วลิ่งโดยใช้เกอลินเป็นสารเติมแต่งและการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ ในการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบในเตาเผาไหม้แบบตะแกรง

### Mitigation of Fouling Problem by Kaolin and Co-firing with Anthracite for Rice straw and Rice husk Combustion in a Grate-fired Combustor

รัตติกาล สมัน, ฐานิตย์ เมธิยานนท์, สรวุฒิ สังวรกาญจน์\* และประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10530

\*ติดต่อ: E-mail: Sungworagan6@hotmail.com โทร 02-988-3655 ต่อ 3107

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแก้ปัญหาฟาล์วลิ่งจากการเผาไหม้ฟางข้าวและแกลบในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก ในเตาเผาไหม้แบบตะแกรงขนาดพิกัด 150 kW<sub>th</sub> ด้วยวิธีการผสมสารเติมแต่งเกอลินและวิธีการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ ที่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ Al ต่อ K ตามปริมาณสารสัมพันธ์เป็น 0.4, 0.75 และ 1 จากผลการทดลองพบว่า การเผาไหม้ ฟางข้าวและแกลบร่วมกับเกอลินหรือการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ทำให้การกระจายตัวของเชื้อเพลิงค่อนข้างดี สำหรับ ผลการทดลองการแก้ปัญหาฟาล์วลิ่ง พบว่าเดโพสิตฟลักซ์ลดลงตามการเพิ่มสัดส่วนของเกอลินหรือถ่านหินแอนทราไซต์ โดยมีค่า เดโพสิตฟลักซ์อยู่ในช่วง 29-119 g/m<sup>2</sup>h และมีความสามารถการถ่ายเทความร้อนสัมพัทธ์ให้ลดลงในช่วง 2-10% แต่กรณีการเผา ไหม้ฟางข้าวและแกลบล้วนมีค่าเดโพสิตฟลักซ์เท่ากับ 285 g/m<sup>2</sup>h และความสามารถการถ่ายเทความร้อนสัมพัทธ์ลดลงถึง 35% จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้เกอลินหรือถ่านหินแอนทราไซต์เผาไหม้ร่วมสามารถลดปัญหาฟาล์วลิ่งจากการเผาไหม้ฟางข้าวได้

**คำหลัก:** เกอลิน; ถ่านหินแอนทราไซต์; ฟางข้าว; ฟาล์วลิ่ง; เตาเผาไหม้แบบตะแกรง

#### Abstract

This research studied to mitigate the fouling problem from the combustion of rice straw/rice husk at the ratio of 80:20 by weight in a step grate-fired combustor with a 150 kW<sub>th</sub> capacity using kaolin as an additive and co-firing with anthracite which varied the stoichiometric ratio of Al/K at 0.4, 0.75 and 1. The results showed that blending of kaolin or co-firing with anthracite resulted in better dispersion of fuels through the grate. For the mitigation of fouling problem, deposit flux decreased with amount of kaolin or anthracite which correspond to the deposit flux in the range 29-119 g/m<sup>2</sup>h and relative heat uptake reduction in the range 2-10%. In contrast, the combustion of rice straw/rice husk without additive, the deposit flux was 285 g/m<sup>2</sup>h and relative heat uptake reduction was 35%. In conclusion, the results from this research revealed that using kaolin or co-firing with anthracite can be applied to resolve the fouling problem from firing of rice straw.

**Keywords:** Kaolin; Anthracite coal; Rice straw; Fouling; Grate-fired combustor.

#### 1. บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการผลิตในภาคอุตสาหกรรม เพื่อการอุปโภคบริโภคในการดำรงชีวิตขั้นพื้นฐานของมนุษย์ ซึ่งแหล่งพลังงานหลักที่ใช้กันในปัจจุบันนี้ คือ พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่ตามแหล่งต่างๆ มีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว เพื่อจัดหาพลังงานทดแทนให้มีปริมาณที่เพียงพอในระยะยาวและมี

ราคาที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริงให้เพียงพอกับความต้องการ ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เราสามารถนำพลังงานจากชีวมวลมาใช้ได้ โดยกระบวนการที่ใช้ความร้อนและกระบวนการชีวภาพการใช้พลังงานชีวมวลโดยกระบวนการที่ใช้ความร้อน เชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรใน

## AEC-016

ประเทศไทยนั้นมีหลากหลายชนิด ได้แก่ แกลบ ฟางข้าว กากปาล์ม ฯลฯ ซึ่งฟางข้าวเป็นชีวมวลที่เหลือใช้จากการเก็บเกี่ยวข้าวประมาณ 19 ล้านตัน/ปี ปัจจุบันการนำฟางข้าวมาใช้ประโยชน์ยังน้อยมากเพียง 8 ล้านตัน/ปี[1] และในส่วนของแกลบเป็นชีวมวลที่ได้หลังจากสีข้าวเปลือก ดังนั้นจึงเป็นโอกาสดีหากนำฟางข้าวและแกลบมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้าขนาดเล็กได้

ทั้งนี้ การนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นที่เราจะทำการทดลองนั้นต้องศึกษาถึงผลที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิง จากการศึกษา งานวิจัย และจากภาคอุตสาหกรรมพบว่า การนำเชื้อเพลิงชีวมวลบางประเภทมาใช้ในการเผาไหม้จะประสบปัญหาทางด้านเทคนิคที่ตามมาจากการใช้ฟางข้าวอาจทำให้ต้องหยุดซ่อมบำรุงบ่อยครั้งซึ่งนอกเหนือจากแผนงานที่ตั้งไว้ ทั้งปัญหาที่เกิดขึ้นในหม้อน้ำซึ่งเกิดจากมีสิ่งสกปรก (fouling) เกาะชุดทำไอน้ำส่งผลให้ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำต่ำลง โดยปัญหาเหล่านี้เกิดจากองค์ประกอบบางส่วนในเชื้อเพลิงชีวมวล คือ Potassium (K) Chlorine (Cl) และ Sulfur(S) เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ 740°C [2-3] ซึ่งฟางข้าวไทยและแกลบที่เราจะมาใช้ในงานวิจัยก็มีองค์ประกอบของ Potassium (K) เป็นองค์ประกอบในเถ้าเช่นกัน[4] นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ศึกษาแนวทางการลดปัญหาฟาล์วสิ่งด้วยกันหลายวิธี และการใช้สารเติมแต่งที่มีองค์ประกอบ Al ผสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลในการเพิ่มอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของ Potassium (K) ถึง 1,600°C เป็นวิธีหนึ่งที่ได้ผลดี การเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินบางประเภทก็สามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้เช่นกัน [5]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของการแก้ปัญหาฟาล์วสิ่ง โดยใช้เถ้าลีนเป็นสารเติมแต่งและการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ในการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบ ในเตาเผาไหม้แบบตะกรับ

## 2. วัตถุประสงค์อุปกรณ์ในการทดลองและวิธีการทดลอง

### 2.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง คือ ฟางข้าวและแกลบ ฟางข้าวใช้เป็นฟางข้าวที่ใช้เลี้ยงสัตว์ถูกอัดเป็นก้อน นำมาผ่านกระบวนการสับให้มีความยาวน้อยกว่า 3 cm ส่วนแกลบนำมาจากโรงสีข้าวทั่วไป แสดงดังรูปที่ 1 สารเติมแต่งที่ใช้ในการทดลองเป็นเถ้าลีนและถ่านหินแอนทราไซต์ แสดงดังรูปที่ 2 และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



(ก) ฟางข้าว

(ข) แกลบ

รูปที่ 1 ลักษณะเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง



(ก) เถ้าลีน

(ข) ถ่านหินแอนทราไซต์

รูปที่ 2 ลักษณะของสารเติมแต่ง

### 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 องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงและเถ้าลีน

Parameter	Rice Husk	Rice Straw	KAOLIN	Anthracite
-----------	-----------	------------	--------	------------

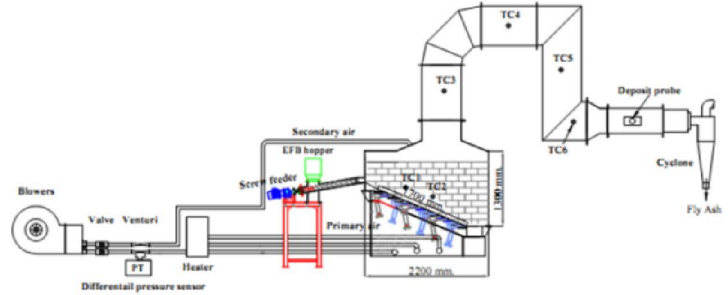
## AEC-016

Ash composition	wt.% on dry basis			
Si <sub>2</sub> O	90.50	71.4	49.0	43.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	0.22	34.30	31.50
TiO <sub>2</sub>	0	0.01	0.52	0.63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O	0.05	0.45	0.07	1.15
K <sub>2</sub> O	2.32	11.90	1.80	3.62
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.93	1.22	-	0.35
SO <sub>3</sub>	0.30	0.86	-	3.62
Cl	0.14	3	-	0

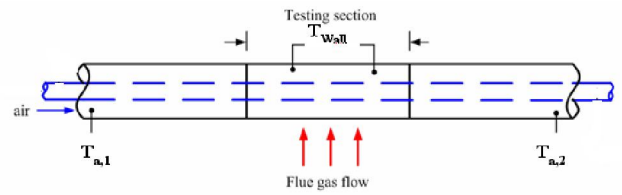
## 2.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองใช้เป็นเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นบันได (Step grate-fired combustor) พิกัด 150 kW<sub>th</sub> ขนาดของตะกรับซึ่งจัดวางในแนวเอียงมีขนาด 0.68x1.7 m มิติภายนอกของเตาคือ 1.15x2.35x4.40 m (กxยxส) สำหรับแผนภาพแสดงอุปกรณ์และตำแหน่งจัดวางอุปกรณ์ภายในระบบแสดงดังรูปที่ 3 และเงื่อนไขการทดลองแสดงในตารางที่ 3 โดยเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางด้านหน้าเตาด้วยสกรูลำเลียงจำนวน 2 ชุด ซึ่งควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ อินเวอร์เตอร์ (inverter) ขณะที่กระบวนการเผาไหม้ดำเนินไปเชื้อเพลิงจะถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปทางด้านท้ายของห้องเผาไหม้โดยการเคลื่อนที่กลับไป-มาของใบกวาดที่ติดตั้งอยู่บนขั้นบันได ซึ่งอยู่กับที่ ถ้าเชื้อเพลิงที่อยู่บริเวณด้านท้ายสุดของห้องเผาไหม้จะตกลงสู่รางรองรับและสกรูลำเลียงออกไปจากห้องเผาไหม้โดยสกรูลำเลียงแล้ว และอากาศเผาไหม้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) อากาศปฐมภูมิซึ่งถูกจ่ายเข้าทางด้านล่างของพื้นตะกรับ และ 2) อากาศทุติยภูมิซึ่งถูกจ่ายเข้าไปภายในห้องเผาไหม้ที่บริเวณเหนือกองเบดเชื้อเพลิงซึ่งมีความสูงจากพื้นตะกรับประมาณ 1.5 m เพื่อเผาไหม้สารระเหยและอนุภาคเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด และในส่วนของการอุ่นอากาศปฐมภูมิใช้ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์อุ่นอากาศก่อนป้อนเข้าห้องเผาไหม้ ในการวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้เวนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่าง (differential pressure transmitter) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน  $\pm 3\%$  ของย่านการวัด เป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ ส่วนการวัดอุณหภูมิในการ

ทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลซึ่งมีความละเอียด  $\pm 1\%$  ซึ่งทำการวัด 6 ตำแหน่ง



(ก) แผนภาพเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้น



(ข) แผนภาพท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

รูปที่ 3 อุปกรณ์การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดลอง

สัดส่วน	สารเติมแต่ง	ถ่านหินแอน	สัดส่วน	อัตราส่วน
ฟางข้าว : แกลบ	wt.% ฟางข้าว	ทราไซต์	ปริมาณ	อากาศ
		wt.% ฟางข้าว	สาร	ส่วนเกิน
			สัมพัทธ์	( $\lambda_{Total}$ )
80:20 (Ref.)	-	-	-	2.0
80:20	5	-	1.0	2.0
80:20	3.7	-	0.74	2.0
80:20	2	-	0.40	2.0
80:20	-	53.6	1.0	1.3
80:20	-	32.1	0.6	1.6
80:20	-	17.9	0.33	1.8

หมายเหตุ: Ref. ผลการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมา[4]

ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองหรือท่อเดโพลิต (Deposit probe) ซึ่งถูกติดตั้งในบริเวณท้ายของท่อไอเสีย แสดงดังรูปที่ 3(ข) เพื่อจำลองสภาวะการทำงานของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ท่อเดโพลิตถูกออกแบบด้วยจุดประสงค์ คือ ศึกษาผลกระทบของการเกิดเดโพลิตหรือฟอสฟอรัสต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน ท่อเดโพลิตใช้ท่อ SCH40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 35 mm ใช้อากาศเป็นตัวกลางการรับความร้อน อุณหภูมิผิวท่อเดโพลิต (T<sub>wall</sub>) วัดโดยเทอร์โมคัปเปิลในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศใช้โรตานิเตอร์ (Rota meter) และวัด

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่ไหลผ่านท่อเดโพลิตด้วยเทอร์โมคัปเปิลสำหรับนำไปคำนวณความสามารถในการรับความร้อน

การทดลองใช้เชื้อเพลิงฟางข้าว: แกลบ 80:20 ใช้เกาลินเป็นสารเติมแต่งปริมาณ 5% , 3.7% และ 2% โดยน้ำหนักฟางข้าว ใช้อัตราส่วนอากาศ  $\lambda = 2.0$  และใช้ถ่านหินแอนทราไซต์ปริมาณ 53.6% , 32.1% , 17.9% โดยน้ำหนักฟางข้าว ใช้อัตราส่วนอากาศ  $\lambda = 1.3$  , 1.6 , 1.8 ตามลำดับ ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่ออุ่นเตาให้อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 800-900°C แล้วจึงเริ่มป้อนเชื้อเพลิงที่ได้ทำการผสมสู่ห้องเผาไหม้ซึ่งควบคุมอัตราการป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ เมื่อสถานะการทำงานของเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60 นาที จากนั้นทำการติดตั้งท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง การควบคุมอัตราการไหลอากาศโดยใช้วาล์วและวัดอัตราการไหลด้วยโรตاميเตอร์ (Rota meter) แล้วเริ่มวัดค่าต่างๆดังนี้ อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆของเตาเผาไหม้และอุณหภูมิเข้า-ออกของอากาศเพื่อนำไปคำนวณหาความสามารถในการรับความร้อน (Heat uptake) ดังสมการที่ 1 และคำนวณความสามารถการถ่ายเทความร้อนสัมพัทธ์ ดังสมการที่ 2 สมการที่ใช้ในการคำนวณความสามารถในการรับความร้อน

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

กำหนดให้

$$Q_{th} = \text{อัตราการรับความร้อนรวม (W)}$$

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

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

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

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

ความสามารถการถ่ายเทความร้อนสัมพัทธ์

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

กำหนดให้

$$Q_t = \text{อัตราการรับความร้อนที่เวลาใด ๆ (W)}$$

$$Q_{Max} = \text{อัตราการรับความร้อนเวลาเริ่มต้น (W)}$$

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของปริมาณการใช้สารเติมแต่งเกาลินและการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ในการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบในเตาเผาไหม้แบบตะกรับแบบชั้น ที่สัดส่วนปริมาณเกาลิน 5% , 3.7% และ 2% โดยน้ำหนักฟางข้าว และสัดส่วนปริมาณถ่านหินแอนทราไซต์ 53.6% , 32.1% , 17.9% โดยน้ำหนักฟางข้าว ซึ่งศึกษาผลของการแก้ปัญหาฟาล์วหรือเดโพลิตบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยพิจารณาผลกระทบต่อความสามารถในการรับความร้อนของท่อไอน้ำและลักษณะทางกายภาพของอนุภาคบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และศึกษาผลกระทบต่อเตาเผาไหม้ ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง 10-14 ชั่วโมง แสดงผลการทดลองดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 3.1 คุณลักษณะการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้

คุณลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมฟางข้าวร่วมกับแกลบที่สัดส่วน 80:20 ที่มีการใช้สารเติมแต่งเกาลินปริมาณ 5% , 3.7% และ 2% โดยน้ำหนักฟางข้าวที่อากาศส่วนเกิน  $\lambda = 2.0$  และใช้ถ่านหินแอนทราไซต์ปริมาณ 53.6% , 32.1% , 17.9% โดยน้ำหนักฟางข้าวที่อากาศส่วนเกิน  $\lambda = 1.3$  , 1.6 , 1.8 ตามลำดับ ในการเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นโดยผสมเกาลินหรือถ่านหินแอนทราไซต์กับเชื้อเพลิงก่อนป้อนเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ โดยสังเกตการลุกไหม้ของเชื้อเพลิงในตำแหน่งต่างๆตลอดช่วงที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 4(ก) เป็นภาพถ่ายเปลวไฟและกองเบตจากการเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไขการผสมเกาลิน 5%, 3.7% และ 2% โดยน้ำหนักฟางข้าวเทียบกับไม่ใช้สารเติมแต่งที่อัตราส่วนอากาศ  $\lambda = 2.0$  พบว่า การเผาไหม้ในกรณีที่ผสมเกาลิน 5% มีการเผาไหม้เบตเชื้อเพลิงค่อนข้างดี ไม่มีการเกาะรวมตัวกันเป็นก้อนของเบตเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังสังเกตว่าเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ตั้งแต่ทางเข้าและเคลื่อนที่เข้าไปยังท้ายห้องเผาไหม้อย่างต่อเนื่องไม่มีการกองของเชื้อเพลิง ส่วนในเงื่อนไขที่ผสมเกาลินปริมาณ 3.7% และ 2% มีลักษณะการเผาไหม้คล้ายคลึงกัน



## AEC-016



(ก) 5 wt% เกาลิน



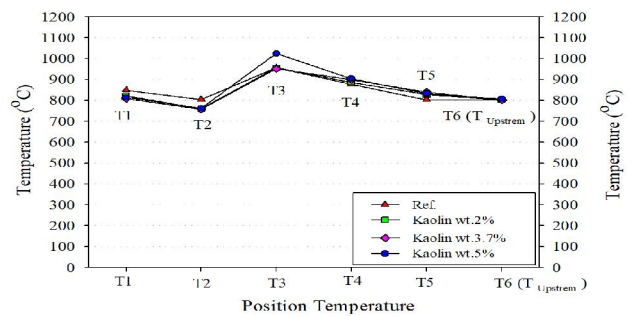
(ข) 53.6 wt% ถ่านหิน (ค) การปลิวของอนุภาคถ่านหิน  
รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของการเผาไหม้

ส่วนการเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไขการผสมถ่านหินแอนทราไซต์ 53.6% , 32.1% , 17.9% โดยน้ำหนักฟางข้าว ที่อากาศส่วนเกิน  $\lambda = 1.3, 1.6, 1.8$  ตามลำดับพบว่า กรณีที่ผสมถ่านหินแอนทราไซต์ 53.6% และ 32.1% เปลวไฟมีความรุนแรงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ผสมสารเติมแต่ง โดยเปลวไฟเกิดขึ้นก่อนบริเวณวัดอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1 และหลังจากนั้นเปลวไฟก็เริ่มหมดแต่เบดถ่านเชื้อเพลิงยังคงคุแดงจนถึงท้ายห้องเผาไหม้และยังสังเกตเห็นเชื้อเพลิงกระจายตัวได้ดีบนตะแกรง ส่วนกรณีผสมถ่านหินแอนทราไซต์ 17.9% มีลักษณะการเผาไหม้คล้ายกันแต่มีการรวมตัวของเบดถ่านเชื้อเพลิงบริเวณท้ายห้องเผาไหม้ นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นถึงการปลิวของเบดเชื้อเพลิงเป็นสะเก็ดอนุภาคถ่านหินพัดพาไปยังท่อลำเลียงแก๊สและมีความเป็นไปได้ที่จะไปเกาะติดบนท่อไอน้ำร้อน

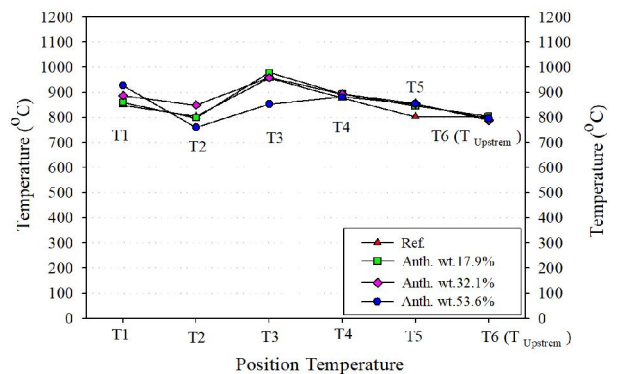
### 3.2 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้

การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยในตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาเผาไหม้จากการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบในสัดส่วน 80:20 พิจารณาผลกระทบของการผสมสารเติมแต่งเกาลินที่ปริมาณ 5%, 3.7% และ 2% โดยน้ำหนักฟางข้าว ที่อากาศส่วนเกิน  $\lambda = 2.0$  เทียบกับการเผาไหม้ที่ไม่ใช้สารเติมแต่ง[Ref] ดังแสดงในรูปที่ 5(ก)

พบว่าการกระจายอุณหภูมิลำดับครีงกันในทุกกรณี โดยในบริเวณด้านล่างของห้องเผาไหม้เหนือตะแกรงอุณหภูมิเบดลดลงเมื่อเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งวัดอุณหภูมิ T1 ไปยัง T2 c และที่ตำแหน่ง T2 มีค่าต่ำสุดเนื่องจากเกิดการเผาไหม้อย่างมากก่อนถึงตำแหน่งวัดอุณหภูมิ T1 ดังนั้นเมื่อเบดเชื้อเพลิงเคลื่อนตัวมาถึงตำแหน่ง T2 อุณหภูมิลดลงมาก และบริเวณด้านบนของห้องเผาไหม้อุณหภูมิแก๊สมีค่าสูงสุดอยู่ที่ T3 ซึ่งผลมาจากการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องระหว่างแก๊สที่หลุดลอยขึ้นมาจากเบดกับอากาศทุติยภูมิ จากนั้นอากาศก็จะลดลงตามลำดับ โดยอุณหภูมิที่ด้านล่างห้องเผาไหม้อยู่ในช่วง  $720-820^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิระเหยของสารระเหย KCl จึงคาดการณ์ได้ถึงปัญหาการเกิดเดโพสิตบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในส่วนของอุณหภูมิตำแหน่งที่ T3 เป็นอุณหภูมิสูงสุดทุกเงื่อนไขมีค่าอยู่ในในช่วง  $950-1020^{\circ}\text{C}$  และสำหรับอุณหภูมิที่บริเวณท่อไอน้ำ T6 ถูกควบคุมไว้ที่ประมาณ  $800^{\circ}\text{C}$



(ก) เกาลิน 5% 3.7% และ 2% โดยน้ำหนักฟางข้าว



(ข) ถ่านหินแอนทราไซต์ 53.6% 32.1% และ 17.9%  
โดยน้ำหนักฟางข้าว

### รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิการเผาไหม้

ในทุกกรณีของการผสมถ่านหินแอนทราไซต์ 53.6%, 32.1%, 17.9% โดยน้ำหนักฟางข้าวที่อากาศ

ส่วนเกิน  $\lambda = 1.3, 1.6, 1.8$  ตามลำดับ เทียบกับการเผาไหม้ที่ไม่ใช้สารเติมแต่ง[Ref] ดังแสดงในรูปที่ 5(ข) พบว่าอุณหภูมิ T1 และ T2 ค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 760-930°C สูงกว่ากรณีเติมเกลือ 5% (ของน้ำหนักฟางข้าว) มาก ในกรณีของถ่านหิน 53.6% มีอุณหภูมิที่ T1 สูงสุด แต่อุณหภูมิ T2 มีค่าต่ำสุด เนื่องมาจากเกิดการเผาไหม้อย่างมากก่อนถึงตำแหน่งวัดอุณหภูมิ T1 ดังนั้นเมื่อเบดเชื้อเพลิงเคลื่อนตัวมาถึงตำแหน่ง T2 อุณหภูมิลดลงมาก เนื่องด้วยกรณีนี้ใช้อากาศหตุติภูมิ(อากาศใต้ตะกรับ) น้อยกว่ากรณีอื่นๆ เนื่องจากจะป้องกันไม่ให้อุณหภูมิถ่านหินหลุดลอยออกไปจากห้องเผาไหม้ และที่ตำแหน่ง T3 จะเห็นว่ากรณีถ่านหินแอนทราไซต์ 53.6% มีอุณหภูมิต่ำกว่ากรณีอื่น ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อผสมถ่านหินในปริมาณเพิ่มมากขึ้น สารระเหยในเชื้อเพลิงผสมจะมีปริมาณน้อยลง ดังนั้นการเผาไหม้ส่วนใหญ่จึงถูกจำกัดอยู่ในบริเวณด้านล่างบนพื้นตะกรับ

### 3.3 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟางข้าวร่วมกับแกลบที่ผสมเกลือปริมาณ 5%, 3.7% และ 2% โดยน้ำหนักฟางข้าว มีความหนาของเดโพลิตที่ใกล้เคียงกันและลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยเดโพลิตที่เสื่อนโซผสมเกลือ 5% มีอนุภาคการเกาะที่ความหนาแน่นน้อยสุด และมีความหนาเพียง 1-2 mm ส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟางข้าวร่วมกับ

แกลบที่ผสมถ่านหินแอนทราไซต์ปริมาณ 53.6%, 32.1% และ 17.9% โดยน้ำหนักฟางข้าว ภาพรวมเดโพลิตมีลักษณะเป็นผงละเอียดมีความแน่นและเรียบ สำหรับกรณีถ่านหินแอนทราไซต์ 53.6% เดโพลิตเกิดด้านข้างเป็นชั้นบางๆ แต่สำหรับกรณี 32.1% และ 17.9% เกิดเป็นชั้นสีขาวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารเติมแต่งที่มีอนุภาคการเกาะโดยมีความหนาประมาณ 8 mm แสดงดังรูปที่ 6 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคที่เกาะจากการเผาไหม้ที่มีการผสมเกลือและถ่านหินแอนทราไซต์ โดยส่วนใหญ่เกาะบริเวณด้านหน้าปะทะแก๊สและอ้อมไปทางด้านข้างประมาณครึ่งของเส้นรอบวงท่อ และส่วนด้านหลังเป็นเพียงผงเถ้าที่วกลงมาที่บออากาศที่หมุนวนด้านหลัง เดโพลิตที่มาเกาะบริเวณด้านหน้าคาดว่าจะประกอบด้วยสารประกอบ KCl บนผิวท่อไอน้ำอนุภาคเกลือและอนุภาคถ่านหินแอนทราไซต์รวมทั้งอนุภาคเถ้าเชื้อเพลิงที่ปลิวมาปะทะและถูกดักจับไว้ การลดลงของอนุภาคนั้นเกิดจาก Al ในเกลือและถ่านหินแอนทราไซต์ เข้าไปทำปฏิกิริยากับ K ในฟางข้าวเมื่อทำปฏิกิริยากันจะได้สารประกอบใหม่ชื่อว่า K-Al-Silicate ที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1600°C [6] ส่งผลให้การลดการเกิดสารประกอบ KCl ได้ อย่างไรก็ตาม Al ในเกลือและถ่านหินแอนทราไซต์ก็ยังไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ K ได้ทั้งหมดตามสารสัมพันธ์ เนื่องจากการผสมเชื้อเพลิงกับเกลือหรือถ่านหินแอนทราไซต์ที่ไม่สามารถผสมกันได้ 100%



ด้านหน้าปะทะแก๊ส



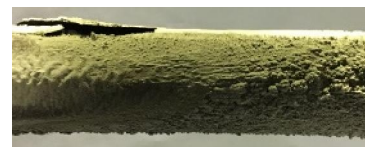
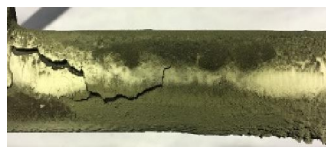
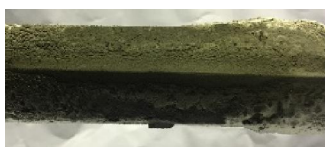
ด้านข้าง 90°



ด้านหลัง 180°

(ก) กรณีไม่เติมสารเติมแต่ง

รูปที่ 6 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคที่เกาะบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง



## AEC-016

ด้านหน้าปะทะแก๊ส

ด้านข้าง 90°C

ด้านหลัง 180°C

(ข) 5wt % เกาลิน



ด้านหน้าปะทะแก๊ส

ด้านข้าง 90°C

ด้านหลัง 180°C

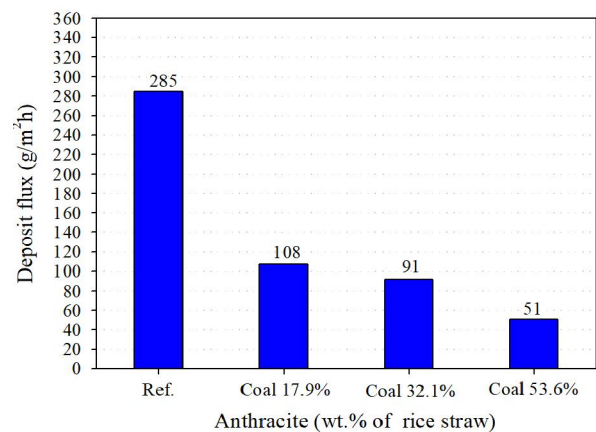
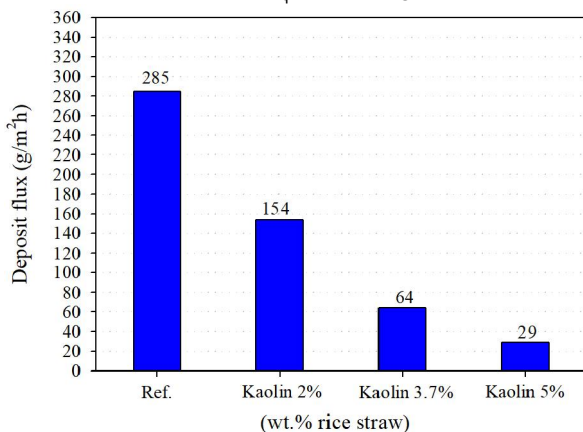
(ค) 53.6wt % ถ่านหิน

รูปที่ 6 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคที่เกาะบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง(ต่อ)

### 3.5 การสะสมของเดโพลิตบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ค่าเดโพลิตฟลักซ์ ( $g/m^2h$ ) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ฟางข้าว : แกลบ 80:20 (โดยน้ำหนัก) ร่วมกับเกาลินที่ปริมาณ 5% (ปริมาณสารสัมพันธ์) 3.7% และ 2% โดยน้ำหนักฟางข้าว ที่อากาศส่วนเกิน  $\lambda = 2.0$  ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7(ก) และการเผาไหม้ฟางข้าว : แกลบ 80 : 20 (โดยน้ำหนัก) ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ที่ปริมาณ 53.6% (ปริมาณสารสัมพันธ์) 32.1% และ 17.9% โดยน้ำหนักฟางข้าว ที่อากาศส่วนเกิน  $\lambda = 1.3, 1.6, 1.8$  ตามลำดับ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7(ข) แนวโน้มของเดโพลิตฟลักซ์ลดลงตามปริมาณสารเติมแต่งที่ใช้เพิ่มมากขึ้น โดยที่ปริมาณเกาลิน 5% มีเดโพลิตฟลักซ์ต่ำที่สุด คือ  $29 g/m^2h$  และปริมาณ

เกาลิน 3.7% และ 2% มีค่าอยู่ที่  $79 g/m^2h$  และ  $118 g/m^2h$  ตามลำดับ ส่วนในถ่านหินแอนทราไซต์ที่ปริมาณถ่านหินแอนทราไซต์ 53.6% 32.1% และ 17.9% มีค่าอยู่ที่  $51 g/m^2h$   $92 g/m^2h$  และ  $108 g/m^2h$  ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารเติมแต่งเดโพลิตฟลักซ์มีค่า  $285 g/m^2h$  [4] จะเห็นได้ว่าปริมาณของเดโพลิตฟลักซ์ลดลงถึง 6-10 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีผสมเกาลิน 5% และปริมาณเดโพลิตฟลักซ์ลดลงถึง 5-6 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีผสมถ่านหินแอนทราไซต์ 53.6% ดังนั้นจะเห็นว่าการใช้สารเติมแต่งสามารถลดการเกิดเดโพลิตฟลักซ์ได้ดี



(ก) เกาลินทุกกรณีเทียบกับกรณีไม่เติมสารเติมแต่ง

(ข) ถ่านหินแอนทราไซต์ทุกกรณีเทียบกับกรณีไม่เติมสารเติมแต่ง

รูปที่ 7 เดโพลิตฟลักซ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟางข้าว:แกลบ 80:20(โดยน้ำหนัก)

### 3.6 ความสามารถรับความร้อนบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ผลของความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจากการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับ

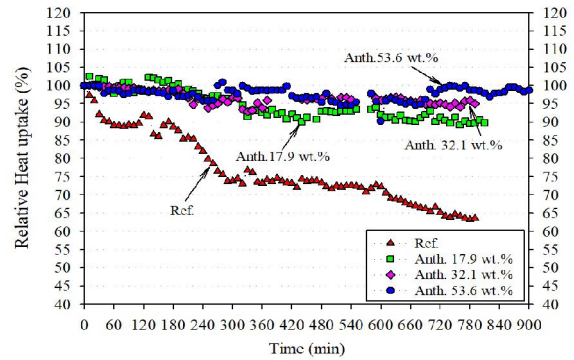
แกลบ 80:20 (โดยมวล) โดยปริมาณเกาลิน 5%, 3.7% และ 2% โดยน้ำหนักฟางข้าว ที่อากาศส่วนเกิน  $\lambda = 2.0$  พบว่าปริมาณเกาลิน 5% และ 3.7% โดยน้ำหนักฟางข้าว มีค่าใกล้เคียงกันคือ 97-98% (ลดลง 2-3%) และปริมาณ



AEC-016



เกาลิน 2% มีค่าประมาณ 94-96% (ลดลง 4-6%) เมื่อเทียบกับกรณีไม่เติมเกาลินซึ่งอยู่ที่ 60-70% (ลดลง 30-40%) ดังนั้นการใช้เกาลินเป็นสารเติมแต่งกับเชื้อเพลิงฟางข้าวสามารถลดปัญหาการถ่ายเทความร้อนของท่อไอน้ำร้อนลงได้อย่างมาก แสดงดังรูปที่ 8(ก) และผลของความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจากการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบ 80:20 (โดยมวล) โดยปริมาณถ่านหินแอนทราไซต์ 53.6%, 32.1% และ 17.9% โดยน้ำหนักฟางข้าว ที่อากาศส่วนเกิน  $\lambda = 1.3, 1.6$  และ  $1.8$  ตามลำดับ พบว่าปริมาณถ่านหินแอนทราไซต์ 53.6% 32.1% และ 17.9% โดยน้ำหนักฟางข้าว มีค่าใกล้เคียงกันคือ 90-95% (ลดลง 5-10%) โดยปริมาณถ่านหินแอนทราไซต์ 17.9% ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของท่อไอน้ำลดลงมากที่สุดคือ 10% แสดงดังรูปที่ 8(ข) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใช้เกาลิน (ที่ 5%, 3.7 และ 2% ของน้ำหนักฟางข้าว) พบว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนระหว่างเตโพลีมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเทียบกับกรณีไม่เติมเกาลินซึ่งอยู่ที่ 60-70% (ลดลง 30-40%) ดังนั้นการใช้เกาลินและถ่านหินแอนทราไซต์เป็นสารเติมแต่งกับเชื้อเพลิงฟางข้าวสามารถลดปัญหาการถ่ายเทความร้อนของท่อไอน้ำร้อนลงได้อย่างมาก

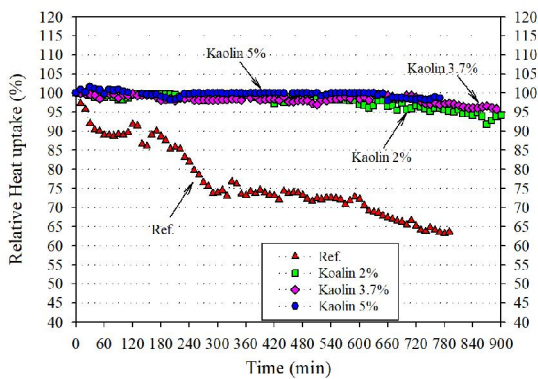


(ข) ถ่านหินแอนทราไซต์ทุกกรณีเทียบกับกรณีไม่เติมสารเติมแต่ง  
รูปที่ 8 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อน

4.สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของการการแก้ปัญหาฟาล์วลิ่ง โดยใช้สารเติมแต่งและการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ในการเผาไหม้ฟางข้าวในเตาเผาไหม้แบบตะกรับสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลของการใช้เกาลินส่งผลให้การเผาไหม้ในเบตเชื้อเพลิงค่อนข้างดี ไม่มีการเกาะตัวกันเป็นก้อนของเบตเชื้อเพลิงแลผลของการใช้ถ่านหินแอนทราไซต์พบว่าเปลวไฟมีความรุนแรงมากและสามารถเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง แต่สังเกตว่ามีการหลุดลอยออกไปจากเบตเชื้อเพลิงของอนุภาคถ่านหินที่กำลังเผาไหม้
2. แนวทางการแก้ปัญหาฟาล์วลิ่งพบว่าผลของการใช้เกาลินและถ่านหินแอนทราไซต์ มีอนุภาคที่เกาะบนผิวท่อน้อยมาก โดยที่เกาลิน มีความหนาประมาณ 1-2 mm คิดเป็นฟลักซ์ของการเกาะตัว มีค่า 29-118. g/m<sup>2</sup>h ส่วนของถ่านหินแอนทราไซต์ พบว่าอนุภาคที่เกาะด้านหน้ามีลักษณะรูปสามเหลี่ยม ฟลักซ์ของการเกาะตัว มีค่า 50-107 g/m<sup>2</sup>h ซึ่งเมื่อเทียบกับกรณีไม่เติมสารเติมแต่งมีค่า 188-285 g/m<sup>2</sup>h ลดลงได้มากถึง 90%
3. ผลงานวิจัยนี้ในการแก้ปัญหาฟาล์วลิ่งบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งการใช้สารเติมแต่งหรือการเผาไหม้กับถ่านหินแอนทราไซต์ในปริมาณไม่เกิน 50%ของปริมาณสารสัมพันธ์ก็สามารถตอบโจทย์ได้เป็นอย่างดี



(ก) เกาลินทุกกรณีเทียบกับกรณีไม่เติมสารเติมแต่ง



## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก ฝ่าย  
บริหารคลัสเตอร์และโปรแกรมวิจัย สำนักงานพัฒนา  
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และสำนักงาน  
นโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (กัณยานน 2558) แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015)
- [2] Jensen, P.A.; Stenholm, M.; Hald, P. Deposition Investigation in Straw-Fired Boilers. *Energy Fuels* 1997, 11 (5), 1048–1055.
- [3] Michelsen, H.P.; Frandsen, F.; Dam-Johansen, K.; Larsen, O.H. Deposition and high temperature corrosion in a 10 MW straw fired boiler. *Fuel Processing Technology* 1998, 54, 95–108.
- [4] Sungworagarn, S., Madhiyanon, T., Effect of Air Preheater use in Co-firing Rice Straw with Rice Husk in A Step Grate-Fired Combustor on Heat Exchange Ability of Superheated Steam Tube. *Proc. of 16<sup>th</sup> Conference of Heat and mass transfer in heat transfer equipment and processes, 2017, 23-24 February 2017, Chiang Mai. (in Thai), paper no.11*
- [5] Xu, L.; Liu, J.; Kang, Y.; Miao, Y.; Ren, W.; Wang, T. Safely Burning High Alkali Coal with Kaolin Additive in a Pulverized Fuel Boiler. *Energy Fuels* 2014, 28(9), 5640–5648.
- [6] Madhiyanon, T.; Sathitruangsak, P.; Sungworagarn, S.; Fukuda, S.; Tia, S. Ash and deposit characteristics from oil-palm empty-fruit-bunch (EFB) firing with kaolin additive in a pilot-scale grate-fired combustor. *Fuel Processing Technology* 2013, 115, 182-191.