



ผลกระทบของอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้น  
ต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Effect of Excess Air for Co-firing Rice Straw and Rice Husk Fuel in A Step  
Grate-Fired Combustor on Heat Exchange Ability of Superheated Steam Tube

สรารวุฒิ สัจจวรกาญจน์<sup>1\*</sup>, ฐานิตย์ เมธิยานนท์<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10530

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

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบในสัดส่วนฟางข้าว:แกลบ 40:60 ในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นขนาดพิกัด 150 kW<sub>th</sub> ต่อลักษณะการเผาไหม้ การเกิดเดโพสิตบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง และการรับความร้อนสัมพัทธ์ของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง โดยอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ถูกแบ่งจ่ายสองส่วนคือ อากาศปฐมภูมิสำหรับเผาไหม้เบดเชื้อเพลิง 67% และอากาศทุติยภูมิเผาไหม้สารระเหยเหนือห้องเผาไหม้ 33% ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินเป็น 30, 50, 70% ( $\lambda = 1.3, 1.5, 1.7$ ) ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้ที่  $\lambda = 1.3$  มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้เท่ากับ 728°C ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมของ KCl (740°C) ส่งผลให้การปลดปล่อย KCl ออกจากเชื้อเพลิงและเกิดเดโพสิตบนท่อน้อยที่มีค่าเดโพสิตฟลักซ์ 26 g/m<sup>2</sup>h และส่งผลกระทบต่อ การรับความร้อนสัมพัทธ์ของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองเพียงเล็กน้อย ส่วนในเงื่อนไขที่  $\lambda = 1.5$  และ 1.7 อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องเผาไหม้ในช่วง 750-760°C สูงกว่าอุณหภูมิจุดที่หลอมของ KCl จึงก่อให้เกิดเดโพสิตบนท่อไอน้ำยวดยิ่งจำลองสูงกว่า  $\lambda = 1.3$  และส่งผลให้การรับความร้อนสัมพัทธ์ของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองลดลง 15-20% ในระยะเวลา 12 ชม.

**คำหลัก:** ชีวมวล; เดโพสิต; เตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้น; ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง; ฟางข้าว

**Abstract**

This research studied the effects of excess air in co-firing of rice husk with rice straw at the ratio of 40:60 by using a 150 kW<sub>th</sub> grate-fired combustor on the combustion characteristics, fouling on superheated steam tube and relative heat uptake of superheated steam tube. The combustion air is divided into two parts: the primary air for the combustion bed of 67% and the secondary air for combustion volatile matter over the combustion bed of 33% which vary the excess air of 30, 50, 70% ( $\lambda = 1.3, 1.5, 1.7$ ). The results showed that the average temperature in the combustion chamber at  $\lambda = 1.3$  was 728°C which is lower than the melting point of KCl (740°C) resulting in a low of KCl release from fuel and deposit on superheated steam tube with the deposit flux of 26 g/m<sup>2</sup>h, and slightly effect on a relative heat uptake. In case of  $\lambda = 1.5$  and 1.7, the average temperature in the combustion

chamber was in the range of 750-760°C which is higher than the melting point of KCl. Consequently, the deposit flux on superheated steam tube appeared more than the deposit flux in case of  $\lambda=1.3$  and decreased the relative heat uptake of 15-20% within 12 hours.

**Keywords:** deposit, deposit probe, grate-fired combustor, rice straw

## 1. บทนำ

การส่งเสริมใช้ชีวมวลเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล จำพวกน้ำมันดีเซล น้ำมันเตา หรือถ่านหินที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปใช้นั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น การเผาไหม้โดยตรง หรือ การผลิตเป็นไบโอแก๊ส และไบโอดีเซล แต่ส่วนใหญ่มีก่นำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้โดยตรงเพราะสะดวกและมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง เชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรในประเทศไทยนั้นมีหลากหลายชนิดได้แก่ แกลบ ชี้เลี้ยง ฟางข้าว ทะลายปาล์ม และซังข้าวโพด ฯลฯ อย่างไรก็ตามชีวมวลที่กล่าวมาข้างต้นไม่ได้มีศักยภาพในการใช้งานเท่าเทียมกันทุกชนิด เพราะอาจมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณที่เหลือในแต่ละฤดูกาล ฟางข้าวเป็นวัสดุที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวข้าวประมาณ 15.69 ตัน/ปี มีค่าความร้อนสูงสุด 15.21 MJ/kg ซึ่งมีการนำไปใช้น้อยมาก[1] ดังนั้นจึงเป็นโอกาสดีหากจะนำฟางข้าวเหล่านี้มาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก

จากงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ พบว่าการนำฟางข้าวมาเผาไหม้จะประสบปัญหาทางด้านเทคนิคที่ตามมาจากการใช้ฟางข้าวอาจทำให้โรงงานต้องหยุดเดินระบบ (shut-down) ทั้งปัญหาที่เกิดขึ้นในหม้อไอน้ำซึ่งเกิดจากการมีสิ่งสกปรกเกาะชุดทำไอน้ำส่งผลให้ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำต่ำลง (fouling) โดยปัญหาเหล่านี้เกิดจากสารประกอบบางส่วนในเชื้อเพลิงชีวมวล คือ Potassium (K) Chlorine (Cl) และ Sulfur (S) [2-3] เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้สารประกอบเหล่านี้จะทำ

ปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ 750 °C

ในการศึกษางานวิจัยนี้เป็นต่อเนื่องจากก่อนหน้าที่ได้ทำการวิจัยศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฟางข้าวมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาไหม้ตะหรับแบบชั้นพบว่า การเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบมีความเป็นไปได้สูงในระดับห้องปฏิบัติการ[4] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาลักษณะของปริมาณอากาศส่วนเกินโดยแสดงในรูปแบบสัดส่วนอากาศส่วนเกิน ( $\lambda$ ) ที่ใช้เผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบ ต่อการเผาไหม้และผลกระทบของการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองและความรุนแรงการเกาะตัวของอนุภาคบนผิวท่อ

## 2. วัตถุประสงค์ในการทดลองและการทดลอง

### 2.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองคือฟางข้าวแห้งที่หั่นเล็กลง โดยนำมาผ่านกระบวนการสับให้มีความยาวประมาณ 3-5 cm สำหรับแกลบที่ใช้นำมาจากโรงสีข้าวทั่วไป ดังรูปที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง ดังแสดงในตารางที่ 1



(ก) ฟางข้าว

(ข) แกลบ

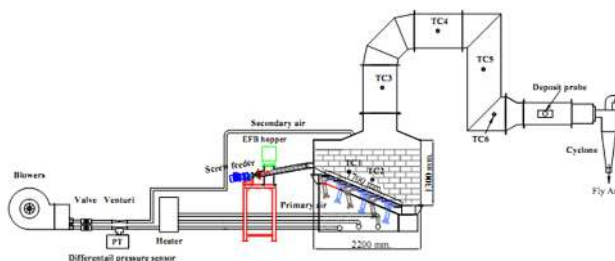
รูปที่ 1 ลักษณะเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

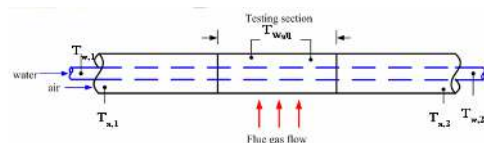
Parameter	Rice Husk	Rice Straw	combustor) พิกัด 150 kW <sub>th</sub> ขนาดของตะกรับซึ่งจัดวาง
<b>Proximate analysis</b>	wt.%, as received		ในแนวเอียงมีขนาด 0.7 x 1.7 m มิติภายนอกของเตาคือ 1.15x2.35x4.40 m (กxยxส) ในรูปที่ 2 สำหรับแผนภาพแสดงอุปกรณ์และตำแหน่งจัดวางอุปกรณ์ภายในระบบในเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าทางด้านหน้าเตาด้วยสกรูลำเลียงจำนวน 2 ชุด ซึ่งควบคุมความเร็วรอบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ขณะที่กระบวนการเผาไหม้ดำเนินไปเชื้อเพลิงจะถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปทางด้านท้ายของห้องเผาไหม้โดยการเคลื่อนที่ที่กลับไป-มาของใบกวาดที่ติดตั้งอยู่เหนือชั้นบันไดซึ่งอยู่กับที่ ถ้าเชื้อเพลิงที่อยู่ในบริเวณด้านท้ายสุดของห้องเผาไหม้จะตกลงสู่รางรองรับและสกรูลำเลียงออกไปจากห้องเผาไหม้โดยสกรูลำเลียง ถ้าอากาศเผาไหม้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ
Volatiles	55.60	62.54	
Fixed Carbon	20.10	14.74	
Moisture(w.t%)	10.3	10.09	
Ash	14.0	14.13	
HHV (MJ/kg dry)	14.98	15.21	
<b>Ultimate analysis</b>	wt.%, as received		1) อากาศปฐมภูมิซึ่งถูกจ่ายเข้าทางด้านล่างของพื้นตะกรับ 67% และ 2) อากาศทุติยภูมิซึ่งถูกจ่ายเข้าไปภายในห้องเผาไหม้ที่บริเวณเหนือกองเบดเชื้อเพลิงซึ่งมีความสูงจากพื้นตะกรับประมาณ 1.5 m 33% เพื่อเผาไหม้สารระเหยและอนุภาคเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด
Carbon	38.00	25.76	
Hydrogen	4.55	3.38	
Oxygen	32.40	47.24	
Nitrogen	0.06	0.89	
Sulphur	0.69	0.08	
<b>Ash composition</b>	Wt.%, on dry basis		ในการวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้เวเนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่าง (differential pressure transmitter) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน ±3% ของย่านการวัด เป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ ส่วนการวัดอุณหภูมิในการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลซึ่งมีความละเอียด ±1% ซึ่งทำการวัด 6 ตำแหน่ง
Si <sub>2</sub> O	90.30	60.1	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.17	0.00	
TiO <sub>2</sub>	0.01	N/A	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	0.20	
CaO	0.49	0.80	
K <sub>2</sub> O	2.68	10.57	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.54	2.45	
SO <sub>3</sub>	0.34	N/A	
Cl	N/A	0.02	

2.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองทั้งหมดจะดำเนินการในเตาเผาไหม้ ตะกรับ แบบ ชั้น บัน ได (Step grate-fired



(ก) แผนภาพเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้น



(ข) แผนภาพท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดลองเผาไหม้ฟางข้าวในระดับห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

สัดส่วน	อัตรา	อุณหภูมิ	สัดส่วน
ฟางข้าว :	การป้อน	เหนือเบด	อากาศ
แกลบ	เชื้อเพลิง	T1	ส่วนเกินรวม
	Kg/h	(°C)	( $\lambda_{Total}$ )
40:60	38.7	734	1.3
40:60	36.6	875	1.5
40:60	36.9	765	1.7

ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองหรือท่อเดโพสิท (Deposit probe) [2-6] ซึ่งติดตั้งในบริเวณท้ายของท่อไอเสีย (ดรูปที่ 2(ข) ) เพื่อจำลองสภาวะการทำงานของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ท่อเดโพสิทถูกออกแบบด้วยจุดประสงค์ คือ ศึกษาผลกระทบของการเกิดเดโพสิทหรือฟาวลิงต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน ท่อเดโพสิทมีลักษณะเป็นท่อซ้อนสองชั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 35 mm ท่อชั้นในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 16 mm โดยท่อชั้นในมีน้ำและอากาศเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนชั้นวงแหวนใช้อากาศเป็นตัวกลาง อุณหภูมิผิวท่อเดโพสิท (T<sub>wall</sub>) วัดโดยเทอร์โมคัปเปิล ในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำและอากาศใช้โรตاميเตอร์ (Rota meter) และวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและอากาศที่ไหลผ่านท่อเดโพสิทด้วยเทอร์โมคัปเปิลสำหรับนำไปคำนวณความสามารถรับความร้อน

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่ออุ่นเตาให้อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 800-900°C แล้วเริ่มป้อนเชื้อเพลิงผสมสู่ห้องเผาไหม้ซึ่งควบคุมอัตราการป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ เมื่อสภาวะการทำงานของเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60 นาที จากนั้นทำการติดตั้งท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง การควบคุมอัตราการไหลอากาศและน้ำโดยใช้วาล์วและวัดอัตราการไหลด้วยโรตاميเตอร์ (Rota meter) แล้วเริ่มวัดค่าต่างๆดังนี้คือ อุณหภูมิตำแหน่ง

ต่างๆของเตาเผาไหม้และอุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำและอากาศ เพื่อนำไปคำนวณหาความสามารถในการรับความร้อน (Heat uptake) ดังสมการที่ 1, 2 และคำนวณความสามารถถ่ายเทความร้อนสัมพันธ์ ดังสมการที่ 3 สมการที่ใช้ในการคำนวณความสามารถการรับความร้อน

$$Q_{th} = Q_w + Q_a \quad (1)$$

$$Q_{th} = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) + \dot{m}_a c_{p,a} (T_{a,out} - T_{a,in}) \quad (2)$$

ความสามารถถ่ายเทความร้อนสัมพันธ์

$$Relative\ heat\ uptake\ (\%) = \left[ \frac{Q_t}{Q_{max}} \right] \times 100\ \% \quad (3)$$

กำหนดให้

$$Q_{th} = \text{อัตราการรับความร้อนรวม}$$

$$Q_a = \text{อัตราการรับความร้อนของอากาศ}$$

$$Q_w = \text{อัตราการรับความร้อนของน้ำ}$$

$$Q_t = \text{อัตราการรับเทความร้อนรวมที่เวลาใดๆ}$$

$Q_{Max}$  = อัตราการรับเทความร้อนรวมสูงสุด (เวลาเริ่มต้น)

$$\dot{m}_a, \dot{m}_w = \text{อัตราการไหลของน้ำและอากาศ}$$

$$c_{p,a}, c_{p,w} = \text{ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำและอากาศ}$$

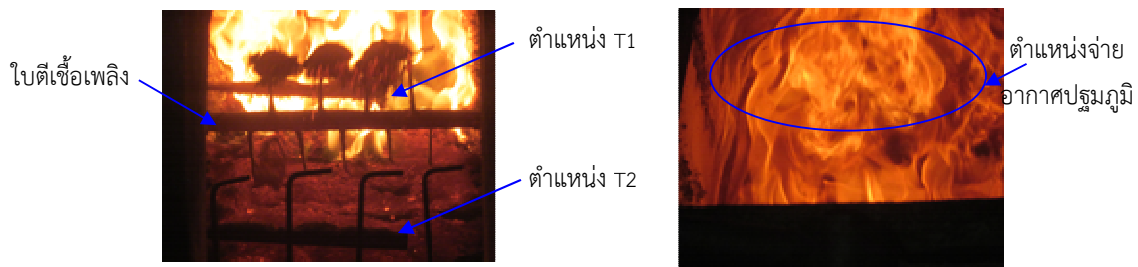
### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้เผาไหม้จ่ายเข้าเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นในการเผาไหม้แกลบร่วมกับฟางข้าว ซึ่งศึกษาผลกระทบต่อการเผาไหม้ โดยพิจารณาเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆและองค์ประกอบแก๊สไอเสียทองออกและ ศึกษาผลกระทบของความรุนแรงของการเกิดฟาวลิงบนท่อจำลองสภาพท่อไอน้ำ โดยพิจารณาผลกระทบต่อความสามารถรับความร้อนของท่อไอน้ำและลักษณะทางกายภาพของอนุภาคที่เกาะบนท่อไอน้ำจำลอง และภายใต้เงื่อนไข เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง 10-14 ชั่วโมง ได้แสดงผลการทดลองดังหัวข้อต่อไปนี้

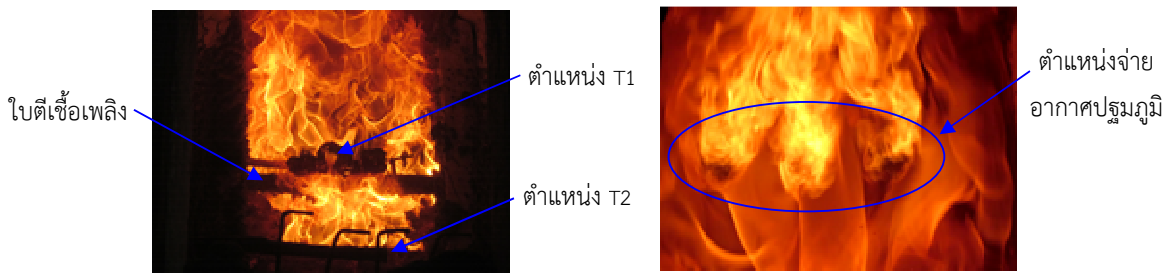
### 3.1 พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้

ลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมฟางข้าว: แกลบ 40:60 ที่  $\lambda = 1.3$  พบว่าการเผาไหม้ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง โดยสังเกตจากเขตเชื้อเพลิงเปลวไฟที่เริ่มลุกไหม้ แถวบริเวณตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิ T1 ซึ่งอยู่ห่างจากทางเข้าประมาณ 1/3 ของความยาวพื้นตะแกรง เปลวไฟจะดับลงเมื่อเคลื่อนตัว ซึ่งเหลือเป็นเขตถ่านเมื่อเคลื่อนที่มาถึงบริเวณตำแหน่งวัดอุณหภูมิ T2 (ระยะ 2/3 ของความยาวตะแกรง) แต่ไม่มีการลุกไหม้ของเปลวไฟ ส่วนบริเวณเหนือขึ้นไปจากเขตเชื้อเพลิงสารถะเหยกกับอากาศทุติยภูมิ (secondary air) บริเวณเหนือห้องเผาไหม้ ซึ่งเห็นได้จากเปลวไฟที่สว่างวาบขึ้นมาจากบริเวณจ่าย

อากาศทุติยภูมิดังรูปที่ 3(ก) สำหรับกรณี  $\lambda = 1.5$  และ 1.7 การเผาไหม้มีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งการลุกติดของเชื้อเพลิงที่แตกต่างจาก  $\lambda = 1.3$  คือเขตเชื้อเพลิงเริ่มลุกติดตั้งแต่บริเวณทางเข้าเชื้อเพลิงและสังเกตได้ว่าเปลวไฟมีความเข้มข้น (หนาแน่น) รุนแรงและปั่นป่วนมากกว่า โดยเปลวไฟยังคงอยู่เป็นระยะทางที่มากขึ้นโดยเปลวไฟแล้วจะเริ่มดับลงเมื่อเชื้อเพลิงเคลื่อนที่ห่างออกมาจากบริเวณตำแหน่งวัดอุณหภูมิ T1 แต่เขตเชื้อเพลิงก็ยังคงอยู่ต่อเนื่องจนเคลื่อนตัวมาถึงตำแหน่งวัดอุณหภูมิ T2 นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ที่บริเวณตำแหน่งจ่ายอากาศทุติยภูมิมีความสว่างจ้ามากขึ้นกว่า  $\lambda = 1.3$



(ก) การเผาไหม้เชื้อเพลิง ฟางข้าว:แกลบ = 40:60  $\lambda = 1.3$



(ข) การเผาไหม้เชื้อเพลิง ฟางข้าว:แกลบ = 40:60  $\lambda = 1.5, 1.7$

รูปที่ 3 พฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมแกลบกับฟางข้าวภายในเตาเผาไหม้

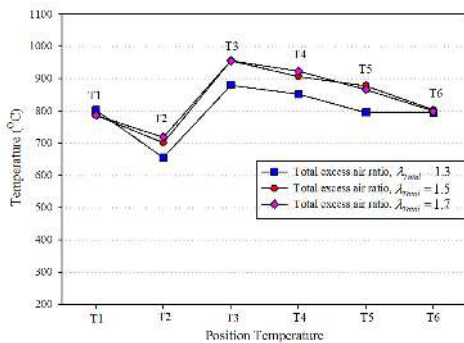
### 3.2 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้

จากการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาเผาไหม้ โดยมีตำแหน่งการบันทึกอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 2 ตำแหน่ง T1 และ 2 และภายในท่อลำเลียงแก๊สเผาไหม้ T3-T6 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมฟางข้าว:แกลบ เท่ากับ 40:60 สัดส่วนอากาศส่วนเกิน

$\lambda = 1.3, 1.5$  และ 1.7 จากรูปที่ 4 พบว่าการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ทั้งสาม  $\lambda$  อุณหภูมิตำแหน่ง T1 มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากเป็นอุณหภูมิของเปลวไฟ เมื่อเชื้อเพลิงเคลื่อนตัวมายังตำแหน่ง T2 ที่  $\lambda = 1.3$  อุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเขตเชื้อเพลิงเริ่มดับซึ่งต่างจากกรณี  $\lambda = 1.5$  และ 1.7 ที่แนวโน้มการลดลงที่ช้ากว่า



นั้นเป็นเพราะปริมาณอากาศยังเพียงพอต่อการเผาไหม้เบดถ่านที่ยังอยู่ในตำแหน่งวัดอุณหภูมิ T2 ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น สำหรับการเผาไหม้เหนือห้องเผาไหม้ด้วยอากาศหตุยภูมิการลุกโชนของเปลวไฟน้อยของกรณี  $\lambda = 1.3$  ส่งผลให้อุณหภูมิ T3 ต่ำกว่าเงื่อนไขที่  $\lambda = 1.5$  และ 1.7 อย่างไรก็ตามการเผาไหม้สารระเหยและคาร์บอนมอนอกไซด์ก็ยังเผาไหม้ต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงซึ่งสังเกตได้ว่ามีแนวโน้มลดลงช้า ส่วนการเผาไหม้ของเงื่อนไขที่  $\lambda = 1.5$  และ 1.7 ด้วยอากาศหตุยภูมิในปริมาณ 33% ของอากาศทั้งหมดส่งผลให้การเผาไหม้ในบริเวณนี้รุนแรงสังเกตจากอุณหภูมิบริเวณตำแหน่งวัดอุณหภูมิ T3 และลดลงตามการสูญเสียตามท่อลำเลียงแก๊สจนถึงอุณหภูมิตำแหน่งวัด T6 ในทุกเงื่อนไขควบคุมไว้ที่ประมาณ 800°C ด้วยการควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งเป็นอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่เข้าปะทะท่อไอน้ำร้อนยวดย (upstream temperature) ยิ่งเพื่อตัดปัญหาผลกระทบต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยจึงจำลองจากอุณหภูมิแก๊ส

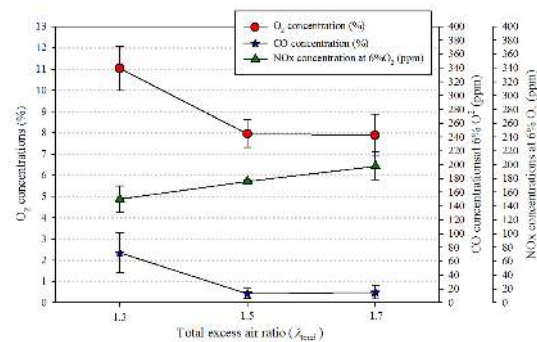


$\lambda = 1.3$  ไม่เพียงพอทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบในเชื้อเพลิงส่งผลให้การปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (76%) ซึ่งมีค่าสูงกว่า  $\lambda = 1.5$  และ 1.7 มีค่าเพียง 14-15% ส่วนไนโตรเจนออกไซด์ในทุกสัดส่วนอากาศส่วนเกินในเชื้อเพลิงมีค่าน้อยใกล้เคียงกัน

รูปที่ 4 การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไหม้

### 3.3 องค์ประกอบแก๊สไอเสียออกจากเตาเผาไหม้

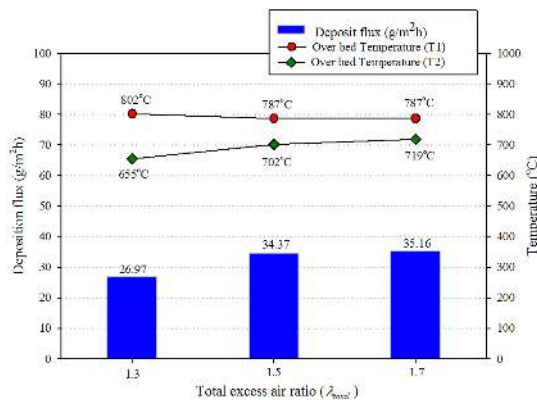
ผลขององค์ประกอบแก๊สไอเสียปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมฟางข้าว:กลบเท่ากับ 40:60 จากผลสัดส่วนอากาศส่วนเกินที่ใช้เผาไหม้  $\lambda = 1.3, 1.5$  และ 1.7 จากรูปที่ 5 แสดงองค์ประกอบออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่เหลือจากการเผาไหม้และองค์ประกอบของแก๊สที่เผาไหม้ไม่หมดเหลือออกมาในรูปของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) เทียบกับสัดส่วนอากาศส่วนเกิน ( $\lambda$ ) จากข้อมูลในรูปจะเห็นได้ว่าที่  $\lambda = 1.3$  มีออกซิเจนเหลืออยู่ในแก๊สเสียเป็นปริมาณมาก (11.03%) ในขณะที่  $\lambda = 1.5$  และ 1.7 มีออกซิเจนเหลืออยู่น้อยกว่า (7.96 และ 7.89%) แสดงให้เห็นว่าในกรณี  $\lambda = 1.3$  ออกซิเจนแพร่เข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้ไม่ดีจึงมีออกซิเจนที่ไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยาเหลืออยู่มากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของ  $\lambda = 1.5$  และ 1.7 ซึ่งก็สอดคล้องกับข้อมูลของอุณหภูมิเบดที่ต่ำ (728°C) ในขณะที่อุณหภูมิเบดเฉลี่ยของ  $\lambda = 1.5$  และ 1.7 มีค่าสูงกว่า ( $\approx 750^\circ\text{C}$ ) สำหรับองค์ประกอบคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลือสอดคล้องกับองค์ประกอบออกซิเจนที่กล่าวมาข้างต้นคือปริมาณออกซิเจนที่



รูปที่ 5 องค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้

### 3.4 การเกิดเตโพลิตบนท่อไอน้ำจำลอง

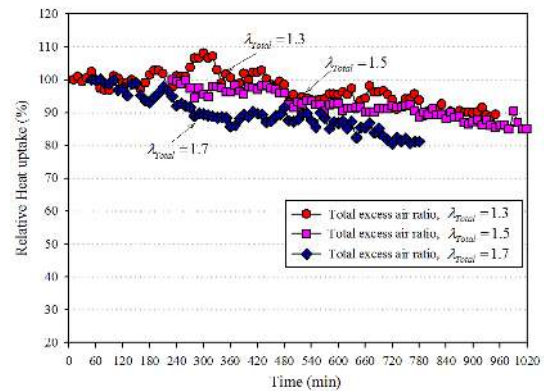
ผลของค่าฟลักซ์ของการเกาะตัวที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมฟางข้าว: แกลบ 40:60 ที่  $\lambda = 1.3, 1.5$  และ  $1.7$  ทั้งสามกรณีแสดงไว้ในรูปที่ 6 พบว่ากรณี  $\lambda = 1.3$  มีค่าฟลักซ์ของการเกาะตัวต่ำสุดเท่ากับ  $27 \text{ g/m}^2\text{h}$  ในขณะที่กรณี  $\lambda = 1.5$  และ  $1.7$  ฟลักซ์ของการเกาะตัวมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ  $35 \text{ g/m}^2\text{h}$  คาดว่าค่าฟลักซ์ของการเกาะตัวที่แตกต่างกันน่าจะเกี่ยวข้องกับการที่อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิระเหยของสารประกอบโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) มากน้อยเพียงใด โดยที่โพแทสเซียม (K) และคลอไรด์ KCl ในรูปของ KCl จะระเหยออกมาจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิประมาณ  $740^\circ\text{C}$  [8-9]



รูปที่ 6 อุณหภูมิเบดเฉลี่ยและฟลักซ์ของการเกาะตัว KCl เป็นตัวการสำคัญต่อการเกาะตัวของอนุภาคที่ก่อไปเกาะบนผิวท่อไอน้ำซึ่งเห็นได้ว่าในกรณี  $\lambda = 1.3$  อุณหภูมิเฉลี่ย ( $730^\circ\text{C}$ ) มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิระเหยของ KCl ในขณะที่กรณี  $\lambda = 1.5$  และ  $1.7$  มีอุณหภูมิเบดเฉลี่ย ( $750^\circ\text{C}$ ) สูงกว่าอุณหภูมิระเหยของ KCl ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ค่าฟลักซ์ของการเกาะตัวที่สูงขึ้นในกรณีของ  $\lambda = 1.5$  และ  $1.7$










### 4.4 ความสามารถในการรับความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

จากผลของการเกิดการเกาะตัวของอนุภาคบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมฟางข้าว: แกลบ 40:60 (โดยมวล) ที่ค่า  $\lambda$  เท่ากับ  $1.3, 1.5$  และ  $1.7$  ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าในทุกกรณีก่อเกิดปัญหาในการถ่ายเทความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองซึ่งมีค่าลดลงไปตามเวลาเนื่องจากมวลของอนุภาคที่ไปเกาะอยู่บนผิวท่อไอน้ำ การถ่ายเทความร้อนพบว่าลดลงไป  $15\text{-}20\%$  (เมื่อเทียบค่าเริ่มต้น) ภายในเวลา 12 ชม. สำหรับอนุภาคที่เกิดขึ้นคิดเป็นค่าฟลักซ์ของการเกาะตัวได้ในช่วง  $27\text{-}35 \text{ g/m}^2\text{h}$  อย่างไรก็ตาม ค่าฟลักซ์ของการเกาะตัวที่ต่างกันไปในแต่ละกรณีของค่า  $\lambda$  นั้นอาจไม่ได้เป็นผลของโดยตรงจากค่า  $\lambda$  ที่เปลี่ยนแปลงไป แต่เป็นผลมาจากอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ต่างกัน



รูปที่ 7 ความสามารถในการรับร้อนสัมพัทธ์ของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งเทียบเทียบเวลา

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของการเกาะของอนุภาคบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

การทดลองที่	ลักษณะการเกาะ ด้านหน้า	ลักษณะการเกาะ ด้านข้าง	ลักษณะการเกาะ ด้านหลัง	Deposit flux (g/m <sup>2</sup> .h)
ฟางข้าว:แกลป 40:60 $\lambda = 1.3$				26.97
ฟางข้าว:แกลป 40:60 $\lambda = 1.5$				34.37
ฟางข้าว:แกลป 40:60 $\lambda = 1.7$				35.16

### 3.5 ลักษณะทางกายภาพของการเกาะบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

ในตารางที่ 3 รูปภาพของการสะสมอนุภาค (เดโพสิต) ที่เกาะบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม แกลป:ฟางข้าว 40:60 ที่สัดส่วนอากาศส่วนเกิน  $\lambda = 1.3$  1.5 และ 1.7 พบว่าส่วนใหญ่เกิดขึ้นนับจากบริเวณด้านหน้าของท่อที่หันเข้าหาแก๊สเผาไหม้และอ้อมไปทางข้างเป็นระยะทางประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นรอบวง โดยอนุภาคส่วนใหญ่มีสีขาวและปะปนไปอนุภาคสีเทาดำขนาดเล็กปะปนอยู่อย่างชัดเจนซึ่งคาดว่า เป็นเถ้าลอยหยาบที่ถูกพัดพามากับกระแสแก๊สเผาไหม้ที่  $\lambda = 1.3$  จะไม่หนาแน่นมากต่างจากกรณี  $\lambda = 1.5$  และ 1.7 ส่วนชั้นอนุภาคด้านข้างสีขาวนี้มีผิวค่อนข้างเรียบและแน่นโดยมีความหนาประมาณ 1 mm ในบริเวณด้านหลังของท่อก็มีอนุภาคเกาะเช่นกัน แต่มีลักษณะเป็นผงมาเกาะรวมกัน มีความร่วน และอนุภาคขนาดเล็กสีเทาดำปะปนอยู่ทั่วไป

การสะสมของอนุภาค(เดโพสิต)บริเวณส่วนด้านหน้าของท่อซึ่งมีสีขาว คาดว่าเป็นสารประกอบโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งมาเกาะและสะสมบนผิวท่อผ่านทางกลไกการเกิดการเกาะสะสมของอนุภาคมีอยู่

สองกลไก คือ 1) การควบแน่น (Condensation) บริเวณท่อโดยตรง เนื่องจากอุณหภูมิที่ผิวท่อต่ำกว่าอุณหภูมิควบแน่นของ KCl มาก ( $\approx 750^{\circ}\text{C}$ ) และ 2) เทอร์โมโฟริซิส (Thermophoresis)[3,8,9] ซึ่งเป็นกระบวนการขนถ่ายอนุภาคในแก๊สเนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิในกระแสแก๊ส ทั้งนี้ อนุภาคของไอระเหย KCl ในกระแสแก๊สรวมตัวกันเป็นนิวเคลียส (เรียกกระบวนการ Nucleation) และ จากนั้น จับตัวกันเป็นก้อน (Coagulation) และรวมตัว (Agglomeration) เกิดเป็นอนุภาคละอองลอย หรือ แอโรซอล (Aerosol) ของสารประกอบ KCl (มีขนาดซับไมครอน) ซึ่งเคลื่อนที่เข้าหาผิวท่อโดยกระบวนการเทอร์โมโฟริซิส ดังกล่าว แอโรซอลปรากฏอย่างชัดเจนที่บริเวณด้านหลังท่อซึ่งอนุภาคที่เกาะมีลักษณะเป็นผงเกาะตัวรวมกัน การเกาะของแอโรซอลที่บริเวณด้านหลังท่อส่วนหนึ่งมาจากการที่บริเวณนี้มีการไหลวน (Eddy) ของกระแสแก๊สจึงมีโอกาสอย่างมากที่ แอโรซอลจะไปเกาะที่ผิวท่อด้านหลัง





## 5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมฟางข้าวกับแกลบ 40:60 สัดส่วนอากาศส่วนเกิน  $\lambda = 1.3, 1.5$  และ  $1.7$  ต่อการเผาไหม้และผลกระทบของความรุนแรงของการเกิดการเกาะตัวบนท่อจำลองสภาพท่อไอน้ำ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้พบว่าการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในตำแหน่งวัดอุณหภูมิ T1 ทั้งสามกรณีแต่กรณี  $\lambda = 1.3$  ความรุนแรงของเปลวไฟที่น้อยซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิเบดต่ำเฉลี่ย  $730^{\circ}\text{C}$  ส่วน  $\lambda = 1.5$  และ  $1.7$  เปลวไฟรุนแรงส่วนเบดถ่านคุดลดความยาวพื้นตะกั่วส่งผลให้อุณหภูมิเบดเฉลี่ยสูงกว่าประมาณ  $750^{\circ}\text{C}$  สามารถสรุปได้ว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมในสัดส่วนนี้ต้องใช้สัดส่วนอากาศส่วนเกินไม่น้อยกว่า  $\lambda = 1.5$  ถึงสามารถเพียงพอในการเผาไหม้
2. จากองค์ประกอบของแก๊สไอเสีย  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  และ  $\text{NO}_x$  พบว่ากรณี  $\lambda = 1.3$  องค์ประกอบ  $\text{O}_2$  เหลือ  $(11.03\%)$   $\lambda = 1.5$  และ  $1.7$   $\text{O}_2$  มีค่า 7.96 และ 7.89 ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบ  $\text{CO}$  ที่มีค่าสูงกรณี  $\lambda = 1.3$  คาดว่าที่  $\lambda = 1.3$  อากาศไม่เพียงพอที่จะสร้างความปั่นป่วนเพื่อช่วยให้  $\text{O}_2$  เข้าทำปฏิกิริยาการเชื้อเพลิง
3. การเกาะของอนุภาคคิดเป็นฟลักซ์ของการเกาะตัวที่  $\lambda = 1.3$  น้อยกว่ากรณี  $\lambda = 1.5$  และ  $1.7$  อาจเป็นเพราะอุณหภูมิภายในเบดต่ำกว่าจุดหลอมของ  $\text{KCl}$  ส่งผลให้การปลดปล่อย  $\text{KCl}$  ที่ก่อให้เกิดอนุภาคที่เกาะน้อยลงไปด้วย กรณี  $\lambda = 1.3$  ฟลักซ์ของการเกาะตัว (Deposit Flux) มีค่า 26.97 และ กรณี  $\lambda = 1.5$  และ  $1.7$  มีค่าประมาณ 35  $\text{g/m}^2\text{h}$  ส่งความสามารถในการรับความร้อนของท่อไอน้ำ ลดลงประมาณ 10-15% ภายในเวลา 12 ชั่วโมง
4. ลักษณะการเกาะตัวของอนุภาคในกรณีต่างๆ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นนับจากบริเวณด้านหน้าของท่อที่หันเข้าหาแก๊สเผาไหม้และอ้อมไปทางข้างเป็นระยะทางประมาณ

ครึ่งหนึ่งของเส้นรอบวงมีความหนาแน่นหน้า 1-1.5 mm.

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก ฝ่ายบริหารคณบดีเตอร์และโปรแกรมวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (สนพ.)

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Agricultural Economics ; 2543-2545
- [2] T.Madhiyanon.,P.Sathitruangsak.,S. Sungworagarn., S. Pipatmanomai., S. Tia., (2012), “A pilot-scale investigation of ash and deposition formation during oil-palm empty-fruit-bunch (EFB) combustion”, *Fuel Processing Technology*, vol.96, pp. 250-264.
- [3] Frandsen, F., Hansen, J., Jensen, P., Dam-Johansen, K., Horlyck, S. and Karlsson, A., (2003), “Ash and deposit formation in the biomass co-fired Masnedo combined heat and power production plant”, *IFRR combustion journal*, Article number 200304, pp. 1-17.
- [4] S.Sungworagarn.,T.Madhiyanon.,(2015), “Effect of Blending Ratios Between Rice Straw and Rice Husk Fuel Combustion in A Step Grate-Fired Combustor on Heat Exchange Ability of Superheated Steam Tube”, Proc. of 29<sup>th</sup> Conference of mechanical engineering network of Thailand, 1-3 October 2012, Thailand, paper no. AEC20



- [5] Michelsen H.P., Frandsen, F., Dam-Johansen, K., Larsen, O.H., (1998), “Deposition and high temperature corrosion in a 10 MW straw fired boiler”, *Fuel processing technology*, vol. 54, pp. 95-108.
- [6] Y. Zheng, P.A. Jensen, et al., (2007), “Ash transformation during co-firing coal and straw.” *Fuel*, vol. 86 , pp.1008-1020.
- [7] S. Jimenez, J. Ballester.,(2006) “Formation of alkali sulphate aerosols in biomass combustion.” *Fuel*, vol.86, pp.486-493.
- [8] M. Theis, B.J. Skrifvars, et al.,(2006), “Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels.” Part2: Deposit chemistry. *Fuel*, vol. 85, pp. 1992-2001.
- [9] 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.