ผลกระทบและแนวทางการแก้ปัญหาการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจากเผาไหม้วัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นบันได

Effects of fouling and method for solving the deposits formed on a superheater tube from firing palm-oil residues in a step grate-fired combustor

สุขสวัสดิ์ คงกล้า[1] และ ฐานิตย์ เมธิยานนท์[2*]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
[*] ติดต่อ: โทร 0-2988-3655 ต่อ 3107 E-mail: thanid_m@yahoo.com[*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มเช่น ทะลายปาล์มเปล่า (EFB) ,กะลาปาล์ม (Shell) และใยปาล์ม (FB) ที่มีต่อการเกิดปัญหาการเกาะตัวของเถ้าบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งพิจารณาในด้านความสามารถในการรับความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองและฟลักซ์ของการเกาะตัวของเถ้า นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงแนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการใช้ดินขาวเป็นสารเติมแต่งในการเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิง การทดลองได้ใช้ส่วนผสมของ EFB:FB:Shell ที่ 100:0:0, 30:50:20 และ 40:45:15 สำหรับปริมาณการผสมดินขาวนั้นได้ใช้สัดส่วนการผสมโดยน้ำหนักของทะลายปาล์มเปล่าแห้งที่ 7.8% และ10% อุณหภูมิเหนือเบดถูกควบคุมไว้ในช่วง 860-900°C ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิแก๊สร้อนที่ไหลผ่านท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองมีค่าในช่วง 750-850°C ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองถูกควบคุมอุณหภูมิผิวในช่วง 450-500°C โดยใช้น้ำและอากาศเป็นตัวกลางในการรับความร้อน ในขณะที่การเกาะตัวของเถ้าบนผิวท่อวัดด้วยโหลดเซลล์ ผลการทดลองพบว่าในกรณีไม่ผสมดินขาว การเกาะตัวของเถ้าบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองเกิดขึ้นมากในด้านที่ปะทะกับแก๊สร้อน โดยในช่วงเวลาทดลอง 17, 18 ชั่วโมง ความหนาของเถ้าที่เกาะบนผิวท่อมีค่าในช่วง 4-7 mm ซึ่งทำให้ความสามารถในการรับความร้อนของท่อลดลงเหลือ 70% ของค่าเริ่มต้นตามลำดับ นอกจากนี้สามารถคิดเป็นฟลักซ์ของการเกาะตัวของเถ้าและค่าความต้านทานความร้อนอันเนื่องจากการเกาะตัวของเถ้ามีค่า 120, 166 $g/m^2.h$ และ 0.023, 0.025 $K.m^2/W$ ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ผสมดินขาวพบว่าความสามารถในการรับความร้อนของท่อไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาการทดลอง 18, 20 ชั่วโมง และฟลักซ์ของการเกาะตัวของเถ้าต่ำเพียง 1.8, 5.3 $g/m^2.h$ นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าการใช้สัดส่วนการผสมดินขาวที่ 7.8% โดยน้ำหนักของ EFB แห้งเพียงพอแล้วต่อการแก้ปัญหาการเกิดฟาวลิ่งบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองทุกสัดส่วนของเชื้อเพลิง

คำสำคัญ: กะลาปาล์ม/ ดินขาว/ ทะลายปาล์มเปล่า/ ใยผลปาล์ม/ ฟาวลิ่ง

Abstract

This research studied the effects of burning palm oil residues, i.e., empty fruit bunch (EFB), shell, and fiber (FB) ,in a grate-fired combustor, on the ash-deposition problem forming on a superheater tube,

in terms of heat uptake ability of a simulated superheater tube (probe) as well as deposition flux. Moreover, an utilization of kaolin as an additive in firing with fuel (a way to solve the problem) was also investigated. In the experiments, the mixing ratios of EFB:FB:Shell at 100:0:0, 30:50:20 and 40:45:20 were employed; while the mixing ratios of kaolin at 7.8 and 10% based on a weight of dry EFB were blended. The bed temperature was controlled in a range of 860-900°C, corresponding to the temperature of flue gas flowing across the probe at 750-850°C. Regulated by using air and water as heat-absorbing medium, the probe surface temperature was controlled in the range of 450-500°C, while the ash-deposition rate on the probe was measured by the load cells. The results showed that in the case of unmixed kaolin over a testing period of 17, 18 h, the ash depositions were generally formed on the upstream side of the probe with a thickness of 4-7 mm, resulting in a reduction of heat uptake ability to 70% of the initial values. Moreover, the corresponding deposition flux and fouling resistance were in the range 120,166 g/m^2.h, and 0.023,0.025 K.m^2/W, respectively. In the case of kaolin being blended with the fuel, the heat uptake ability seemed unchanged over the testing period of 18, 20 h. A somewhat low deposition flux at 1.8, 5.3 g/m^2.h was detected.Finally, the results concluded that the mixing ratio of kaolin at 7.8% based on a weight of dry EFB is sufficient to eliminate the fouling problems occurred on the simulated-superheater tube in all fuel blending ratios.

Keywords: Empty Fruit Bunch/ Fiber/ Fouling/ Kaolin/ Shell

1. บทนำ

รัฐบาลได้ส่งเสริมให้มีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มมากขึ้น เพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลจำพวกถ่านหิน น้ำมันเตาประกอบกับแนวโน้มของราคาที่เพิ่มสูงขึ้นและปริมาณที่ลดน้อยลง สำหรับการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้นั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบเช่น การนำมาเผาไหม้โดยตรงหรือการผลิตไบโอแก๊ส แต่ส่วนใหญ่นำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้โดยตรงเพราะมีประสิทธิภาพสูง เชื้อเพลิงชีวมวลนั้นเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตรในประเทศนั้นมีมากมายหลายชนิด เช่น แกลบ ฟางข้าว ซังข้าวโพด ซากอ้อย ทะลายปาล์มเปล่า ฯลฯ แต่อย่างไรก็ตามชีวมวลไม่ได้มีศักยภาพในการใช้งานที่เท่าเทียบกันเพราะขึ้นอยู่กับประมาณการเพาะปลูกและปริมาณผลผลิตของแต่ฤดูกาล ในขณะที่ทะลายปาล์มเปล่า (Empty Fruit Bunch; EFB) ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปาล์มน้ำมันซึ่งมีปริมาณมากในทางภาคใต้ของประเทศ(920,230ตันต่อปี [1]) และมีโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มบางแห่งได้นำทะลายปาล์มเปล่ามาใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมร่วมกับใยผลปาล์มและกะปาล์มในการเผาไหม้ แต่ก็เกิดปัญหาการฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำและเกิดการหลอมของขี้เถ้าบนตะกรับ ทำให้ต้องหยุดระบบทำความสะอาดและซ่อมบำรุงบ่อยครั้ง คาดว่าปัญหาเกิดจากสารประกอบบางส่วนของ Potassium (K) Chlorine (Cl) และ Sulfur (S) [2] ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อยู่ในรูปของสารระเหยก่อให้เกิดปัญหาอนุภาคเกาะตัวที่ชุดอุปกรณ์ผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งได้มีงานวิจัยต่างประเทศทำการศึกษาโดยการติดตั้ง air-cooled probe เพื่อศึกษาการเกาะตัวที่เกิดขึ้นในบริเวณท่อผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง [2-5] และยังมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาแนวทางการลดปัญหาการเกาะตัวที่เกิดขึ้นบนท่อไอน้ำโดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) ที่มีสารประกอบจำพวก Aluminum (Al) และ Silicon (Si) เป็นหลักผสมกับเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อให้ Al และ Si ทำปฏิกิริยากับ K ในเถ้าของเชื้อเพลิงเพื่อลดปัญหาการเกาะตัวดังกล่าว [6-7]

ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้นจึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาไหม้ อุณหภูมิเหนือเบดที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถการรับความร้อนของท่อผลิตไอน้ำ เนื่องจากการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นบันได

2. วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

2.1 วัตถุดิบในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง ทะลายปาล์มเปล่า ใยผลปาล์ม และกะลาปาล์ม มีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงดังตารางที่ 1 และทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงร่วมกับสารเติมแต่งซึ่งจะใช้ดินขาวเป็นสารเติมแต่งที่หาได้ภายในประเทศมีองค์ประกอบของดินขาวดังตารางที่ 2

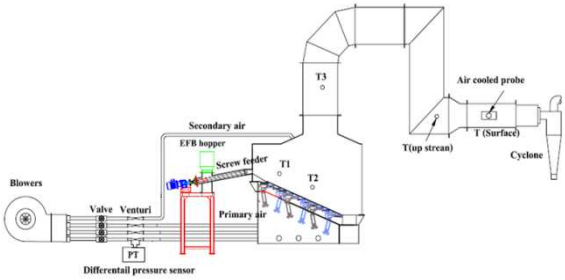
ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

องค์ประกอบในเชื้อเพลิง	ปริมาณโดยน้ำหนักเปียก %		
	ทะลายปาล์มเปล่า	ใยผลปาล์ม	กะลาปาล์ม
Carbon	21.15	30.82	44.44
Hydrogen	2.56	3.74	5.01
Oxygen	15.34	21.61	34.70
Nitrogen	0.27	0.84	0.28
Sulphur	0.04	0.08	0.02
Moisture	58.60	38.50	12.00
Ash	2.03	4.42	3.52
Higher heating value (MJ/kg)	9.2	13.13	18.27

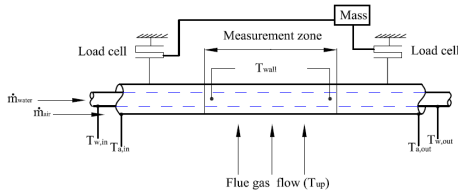
ตารางที่ 2 ปริมาณองค์ประกอบของดินขาว

องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)
SiO_2	49.00
Al_2O_3	34.30
K_2O	1.80
TiO_2	0.52
Fe_2O_3	1.00
CaO	0.01
MgO	0.35
Na_2O	0.07

2.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง



รูปที่ 1 ลักษณะเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นบันไดและตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัด



รูปที่ 2 ลักษณะของชุดท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง (air & water cooled probe)

รูปที่ 1 แสดงถึงไดอะแกรมเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นบันไดและตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง เตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นบันไดนั้นมีขนาด 1.15x2.35x4.40 m โดยมีลักษณะเป็นแบบขั้นบันได ซึ่งมีบันไดจำนวนทั้งหมด 13 ขั้นและมีใบกวาดจำนวน 12 ชุด อยู่ระหว่างขั้นบันไดแต่ละขั้น ซึ่งใบกวาดจะทำหน้าที่กวาดเชื้อเพลิงให้เคลื่อนที่ไปยังบันไดขั้นถัดไปที่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า สำหรับการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาไหม้จะใช้สกรูลำเลียงจำนวน 2 ชุด ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการป้อนโดยใช้อินเวอร์เตอร์ การจ่ายอากาศได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คืออากาศส่วนที่ 1 เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงบนบันได และอากาศส่วนที่ 2 เป็นอากาศที่เข้าไปช่วยเผาไหม้สารระเหยที่ออกจากเชื้อเพลิง ได้จ่ายอากาศส่วนที่สองเข้าทางหลังคาห้องเผาไหม้ สำหรับขี้เถ้าจะถูกลำเลียงออกมาด้วยสกรูลำเลียงนอกจากนี้เถ้าที่ลอยติดมากับแก๊สเผาไหม้จะถูกดักด้วยไซโคลน ในส่วนของการวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองได้ใช้เวนจูรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน ± 3% ของย่านการวัด ส่วนการวัดอุณหภูมิในการทดลองจะใช้เทอร์มอคัปเปิลชนิด K

คู่กับอุปกรณ์แสดงผลที่มีความละเอียด ±1% ซึ่งทำการวัด 5 ตำแหน่ง

สำหรับการศึกษาถึงความสามารถการรับความร้อนที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำร้อน การจำลองชุดท่อรับความร้อนด้วยอากาศร่วมกับน้ำเป็นแบบท่อซ้อน 2 ชั้น โดยอากาศจะไหลในท่อชั้นนอก (ขนาด 25 mm.) ส่วนน้ำจะไหลในท่อชั้นใน (ขนาด16 mm.) ทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิผิวท่อ (T_{wall}) อยู่ในช่วง 400-500 °C ท่อที่ใช้เป็นท่อไอน้ำ Sch40 ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกับท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งในหม้อไอน้ำทั่วไป ลักษณะการทำงานของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งคือแก๊สไอเสียไหลผ่านท่อถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศและน้ำที่ไหลอยู่ภายใน สำหรับการควบคุมอุณหภูมิผิวท่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศและน้ำโดยใช้โรตามิเตอร์ เพื่อให้สามารถบันทึกการเปลี่ยนแปลงอย่างมีประสิทธิภาพและในการถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะทำการวัดอุณหภูมิทางเข้า-ออกของอากาศและน้ำด้วยTP100 สามารถคำนวณได้ตามสมการสมดุลพลังงานดังสมการ(1) และ (2) และทำการติดตั้งโหลดเซลล์เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของท่ออันเนื่องมาจากอนุภาคเกาะบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งนำมาคำนวณฟลักซ์ของการเกาะตัวดังสมการที่ (7)

ขั้นตอนการทดลองปรับปริมาณอากาศในส่วนต่างๆตามเงื่อนไขจากนั้นทำการจุดเตาโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เพื่ออุ่นเตาเผาไหม้ให้อุณหภูมิสูงประมาณ 860-900°C แล้วค่อยเริ่มเปลี่ยนเชื้อเพลิงทำการปรับอัตราการป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ เมื่ออุณหภูมิภายเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัวใช้เวลาประมาณ 60-90 นาที จากนั้นทำการติดท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง แล้วเริ่มทำการบันทึกผลการทดลองเพื่อนำค่าไปคำนวณหาค่าดังสมการต่อไปนี้

ความสามารถในการรับความร้อน

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

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

ความสามารถการรับความร้อนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ %

$$\text{Relativeheat uptake } (\%) = \left[\frac{Q_{th}}{Q_{IC}}\right] \times 100\% \quad (3)$$

$Q_a =$ อัตราการรับความร้อนของอากาศ (W)

$Q_w =$ อัตราการรับความร้อนของน้ำ (W)

$Q_{th} =$ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมที่เวลาใดๆ (W)

$Q_{IC} =$ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมที่เวลาเริ่มต้นการทดลอง (W)

$\dot{m}_{air}, \dot{m}_{water} =$ อัตราการไหลของน้ำและอากาศ (kg/s)

$c_{p,a}, c_{p,w} =$ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำและอากาศ (KJ/Kg.K)

สมการที่ใช้คำนวณหาค่าความสกปรกเกาะที่ผิวท่อ (fouling resistance, m^2.K/W)

$$Q_{th} = \frac{T_{up} - T_{wall}}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

$$R_1 = \frac{T_{up} - T_{wall}}{Q_{th}} \quad (5)$$

$$\text{Fouling resistance} = R_2 \times A \quad (m^2.K/W) \quad (6)$$

$Q_{th} =$ อัตราการรับความร้อนรวม (W)

$T_{up} =$ อุณหภูมิแก๊สไอเสีย (°C)

$A_o =$ พื้นที่การรับความร้อนด้านนอก $= \pi D_0 L$ (m^2)

$T_{wall} =$ อุณหภูมิผิว Probe (°C)

$R1 =$ การต้านทานความร้อนที่ไม่มีอนุภาคเกาะตัว (K/W)

$R2 =$ การต้านทานความร้อนที่มีอนุภาคเกาะตัว (K/W)

สมการที่ใช้คำนวณหาฟลักซ์ของการเกาะตัว (deposition flux, g/m^2-h)

$$Deposition\ flux = \frac{Mass}{Area \times Time} \quad (7)$$

$Mass =$ น้ำหนักของ deposit ที่เพิ่มขึ้น (g)

$Time =$ เวลาที่ใช้ในการทดลอง (h)

$Area =$ พื้นที่ฉายด้านปะทะแก๊สเผาไหม้ (Projected area) = $D_o \times L$ (m^2)

ในการทดลองได้ใช้ส่วนผสมของเชื้อเพลิง ทะลายปาล์มเปล่า:ใยผลปาล์ม:กะลาปาล์ม ที่สัดส่วน 100:0:0 30:50:20 และ45:40:15 และเงื่อนไขการทดลองศึกษาแนวทางการใช้ดินขาวเป็นสารเติมแต่งในสัดส่วนของเชื้อเพลิง 30:50:20 และ 45:40:15 ใช้ดินขาว 7.8 wt% ของมวลแห้ง EFB (EFB:kaolin =100:7.8) หรือ

5.6 wt% ของมวลเปียก EFB (ที่ความชื้น 40% มาตรฐานเปียก) ซึ่งเท่ากับปริมาณดินขาวที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับโปแตสเซียม (K) ในเถ้าทะลายปาล์มทางทฤษฎี ซึ่งวิธีการได้ผสมดินขาวเข้าไปกับเชื้อเพลิงล่วงหน้าก่อนการเผาไหม้ ซึ่งแสดงเงื่อนไขการทดลองไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม

เงื่อนไขการทดลอง	การทดลอง				
	1	2[9]	3[9]	4	5
	EFB:FB:Shell = 100:0:0 No	**EFB:FB:Shell = 30:50:20 No**	**EFB:FB:Shell = 30:50:20 with**	**EFB:FB:Shell = 45:40:15 with**	**EFB:FB:Shell = 45:40:15 with**
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/h)	35	35	36	33	33
ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA%)	113	48	48	60	61
สัดส่วน อากาศส่วนที่1 : อากาศส่วนที่2	74:26	74:26	74:26	74:26	74:26
อุณหภูมิเหนือเบด (°C)	903	908	890	840	890
อุณหภูมิแก๊สไอเสีย (°C)	878	860	850	780	771
อุณหภูมิผิวท่อ (°C)	400-320	500-300	450-413	480	475
เวลาในการทดลอง (h)	17	18	20	18	18

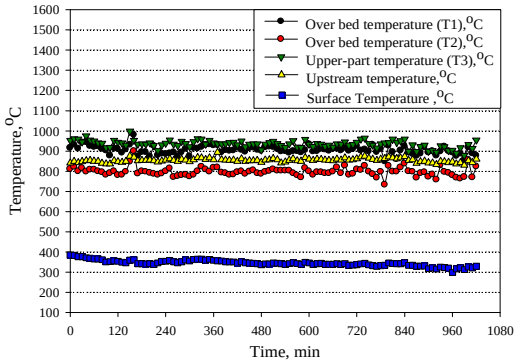
3. ผลการทดลองและการวิจารณ์การทดลอง

จากการศึกษาปัญหาการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำและการหลอมของเถ้า จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและแนวทางการแก้ปัญหาการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำและการหลอมของเถ้าโดยการใช้ดินขาวเป็นสารเติมแต่ง ซึ่งได้พิจารณาถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ สำหรับในส่วนของผลกระทบต่อท่อไอน้ำ ต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและลักษณะทางกายภาพของการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำ แสดงผลการทดลองดังหัวข้อต่อไปนี้

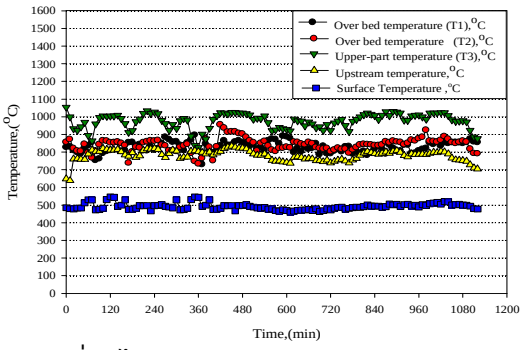
3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเผาไหม้ภายในเตาตะกรับแบบขั้นบันได

จากรูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆภายในเตาเผาไหม้ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม โดยมีสัดส่วนการผสมของเชื้อเพลิงในการทดลองดังตารางที่ 3 จากการสังเกตการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้พบว่าในเงื่อนไขการทดลองที่ไม่มีการผสมดินขาวเชื้อเพลิงมีการสานเป็นก้อนขณะการเผาไหม้ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของทะลายปาล์มเปล่าและใยผลปาล์มมีลักษณะเป็นเส้นใยทำให้อากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาเผาไหม้ได้ไม่ทั่วถึง ส่วนการทดลองที่มีการผสมดินขาวพบว่าเชื้อเพลิงมีการกระจ่ายตัวดีขึ้นและมีการปะทุของสะเก็ดไฟ เมื่อพิจารณาส่วนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเผาไหม้ที่ตำแหน่งต่างๆ และอุณหภูมิผิวท่อ (แสดงดังตารางที่3) ในทุกเงื่อนไขการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน อุณหภูมิการเผาไหม้เหนือบริเวณตะกรับ T1 เป็นตำแหน่งถัดจากช่องทางเข้าเชื้อเพลิง (มีระยะหนึ่งในสามส่วนของความยาวห้องเผาไหม้นับจากทางเข้าเชื้อเพลิง) ในส่วนนี้เป็นช่วงที่มีการเผาไหม้คาร์บอนเสถียรและสารระเหยและควบคุมให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 860-900°C ตำแหน่งเหนือตะกรับ T2 (มีระยะสองในสามส่วนของความยาวห้องเผาไหม้นับจากทางเข้าเชื้อเพลิง) อุณหภูมิต่ำกว่าตำแหน่ง T1 เนื่องจากคาร์บอนเสถียรและสารระเหยได้ถูกเผาไหม้ที่ตำแหน่ง T1 และมีบางส่วนที่ยังไม่ได้ถูกเผาไหม้มาเผาไหม้ต่อที่ตำแหน่ง T2 เป็นส่วนน้อย สำหรับอุณหภูมิที่บริเวณด้านบนของห้องเผาไหม้ T3 ทุกเงื่อนไขการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงกว่าที่บริเวณ T1 และT2 คาดว่าเป็นเพราะปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยออกมาในปริมาณมากภายใต้อุณหภูมิสูงจึงทำให้มีความเป็นไปได้ที่สารระเหยบางส่วนที่ยัง

ไม่ได้ถูกเผาไหม้ภายในเบดหรือเหนือเบดลอยมาเผาไหม้ต่อกับอากาศส่วนที่สองที่จ่ายบริเวณเหนือห้องเผาไหม้จึงทำให้อุณหภูมิที่บริเวณนี้สูงขึ้น สำหรับอุณหภูมิแก๊สร้อนที่ไหลผ่านท่อมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 750-850°C ส่วนอุณหภูมิผิวท่อเริ่มต้นมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 450-500°C ส่วนการทดลองที่ไม่มีการผสมดินพบว่าทดลองผ่านไปประมาณ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิผิวท่อเริ่มลดลงเมื่อสิ้นสุดการทดลองใช้เวลาประมาณ 17, 18 ชั่วโมง อุณหภูมิลดลงเหลือประมาณ 400-320, 500-300 °C นั้นคาดว่าเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำทำให้ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สร้อนกับผิวท่อน้อยลง ส่วนเงื่อนไขการทดลองที่มีการผสมดินขาวพบว่าทดลองผ่านไป 18, 20 ชั่วโมง อุณหภูมิลดลงเล็กน้อยเหลือประมาณ 450-413 °C เนื่องจากอนุภาคเกาะบนท่อไอน้ำน้อยทำให้อุณหภูมิไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง(แสดงดังตารางที่ 4)



(ก) เงื่อนไขการทดลอง EFB:FB:Shell = 100:0:0 ไม่ผสมดินขาว



(ข) เงื่อนไขการทดลอง EFB:FB:Shell = 40:45:15 ผสมดินขาว 7.8%wt. EFB

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้

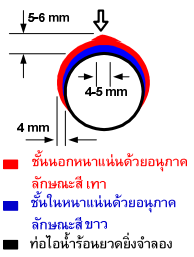
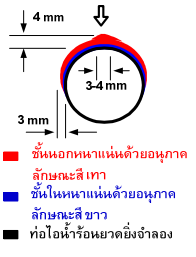
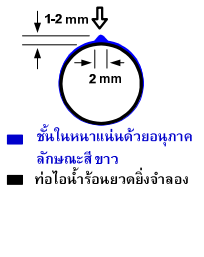
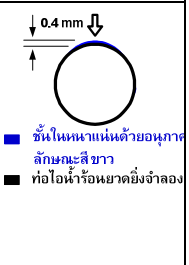
ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

การทดลอง		1	2 [9]	3 [9]	4	5
เงื่อนไขทดลอง		EFB:FB:Shell = 100:0:0	EFB:FB:Shell =30:50:20	EFB:FB:Shell = 30:50:20	EFB:FB:Shell = 45:40:15	EFB:FB:Shell = 45:40:15
ดินขาว	ไม่ผสม	-	-	-	-	-
	ผสม	-	-	7.8%wt. EFB	7.8%wt. EFB	10%wt. EFB
อุณหภูมิเหนือเบด T1 [°C]		910	908	890	840	900
อุณหภูมิเหนือเบดT2 [°C]		800	830	820	820	850
อุณหภูมิเหนือห้องเผาไหม้T3 [°C]		950	1000	1020	970	1020
อุณหภูมิแก๊สร้อน [°C]		850	860	850	790	820
อุณหภูมิผิวท่อ [°C]		384-329	500-300	450-413	480	440
เวลาในการทดลอง (h)		17	18	20	18	18

3.2 ลักษณะทางกายภาพของการเกิดฟาวลิ่งบนท่อและภาพสเกตซ์บนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

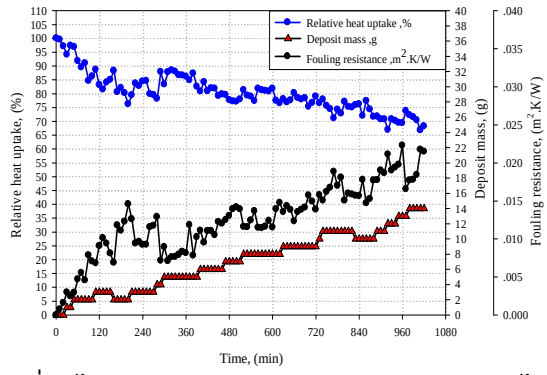
ลักษณะทางกายภาพของการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมสังเกตได้จากภาพถ่ายและภาพเกตซ์จากการทดลองดังแสดงในตารางสรุปของแต่ละเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 4 พบว่าในการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมโดยไม่มีการผสมเติมแต่งดินขาวสามารถแบ่งชั้นของการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองได้เป็น 2 ชั้นหลักๆ ชั้นที่ติดกับผิวท่อนั้นมีลักษณะเป็นสีขาวมีความหนาประมาณ 1-4 มิลลิเมตร คาดว่าน่าจะเกิดจากสารประกอบ KCl ที่ออกมาจากเชื้อเพลิงขณะการเผาไหม้ (อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว KCl ประมาณ 750°C) อยู่ในรูปของแก๊สไหลมากับแก๊สร้อนมาควบแน่นบนผิวท่อซึ่งที่ผิวท่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลว KCl เป็นลักษณะยางเหนียวทำให้อนุภาคของเถ้าที่ลอยมากับแก๊สร้อนมาเกาะติดมีลักษณะเป็นชั้นสีเทามีความหนาประมาณ 4-7 มิลลิเมตร ลักษณะเป็นชั้นแข็งและทำความสะอาดได้ยาก สำหรับการทดลองที่มีการผสมดินขาวเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงพบว่าการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมสูงประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ฐานกว้าง 6-10 มิลลิเมตร เป็นชั้นสีขาวขุ่นน่าจะมาจากอนุภาคของดินขาวที่ลอยมาเกาะติดกับผิวท่อ ส่วนบริเวณด้านข้างและด้านหลังมีลักษณะการเกาะเป็นเม็ดเล็กๆเป็นสีขาวออกเทาและร่วนสามารถขูดออกได้โดยง่าย อนุภาคที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นตรงบริเวณหน้าท่อที่ปะทะกับแก๊สร้อนเป็นหลัก

ตารางที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของการเกิดฟาวลิ่งบนท่อและภาพสเกตซ์บนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

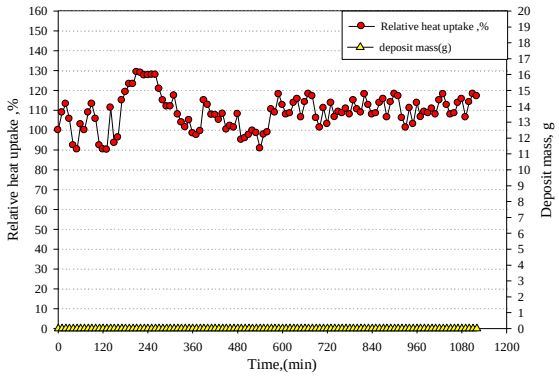
การทดลอง		1	2[9]	3[9]	4	5
เงื่อนไขทดลอง		EFB:FB:Shell = 100:0:0	EFB:FB:Shell =30:50:20	EFB:FB:Shell = 30:50:20	EFB:FB:Shell = 45:40:15	EFB:FB:Shell = 45:40:15
ดินขาว	ไม่ผสม	-	-	-	-	-
	ผสม	-	-	7.8%wt. EFB	7.8%wt. EFB	10%wt. EFB
ลักษณะการเกาะด้านหน้าท่อ						
ลักษณะการเกาะด้านข้างท่อ						
ลักษณะการเกาะด้านหลังท่อ						
ภาพสเกตซ์ของอนุภาคที่เกาะบนผิวท่อ						

3.3 ค่าความสกปรกที่เกาะตัวบนท่อและความสามารถในการรับความร้อนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

จากรูปที่ 4 แสดงถึงผลกระทบของการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำต่อความสามารถในการรับความร้อนจากปริมาณความร้อนรวมจากน้ำและอากาศดังสมการที่ 1และ2 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับความสามารถในการรับความร้อนที่เวลาเริ่มการทดลองดังสมการที่ 3 พบว่าในการทดลองที่ไม่มีการผสมดินขาว ความสามารถของการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงตามการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักของอนุภาคบนท่อ เนื่องจากการเกาะตัวบนท่อเป็นเหมือนฉนวนความร้อน จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สร้อนกับท่อไอน้ำร้อนจำลองลดลง สำหรับการทดลองที่มีการผสมดินขาวความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนค่อนข้างคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักของอนุภาคบนท่อไอน้ำที่มีค่าน้อยมาก ส่วนค่าความสกปรกที่เกิดการเกาะบนท่อไอน้ำร้อนจำลองดังสมการที่ 6 พบว่าค่าความสกปรกที่ท่อเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักที่เพิ่มของอนุภาคบนท่อไอน้ำเมื่อการทดลองสิ้นสุดพบว่าค่าความสกปรกในการทดลอง คิดพื้นที่การปกคลุมของฟาวลิ่งบนท่อประมาณ 60% ของพื้นที่ผิวท่อคิดเป็นฟลักซ์การเกาะตัวของเถ้าบนท่อมีค่าเท่ากับ 166, 120 g/m^2.h ส่งผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนของท่อ ส่วนเงื่อนไขการทดลองที่มีการผสมดินขาว คิดเป็นพื้นที่การปกคลุมของฟาวลิ่งบนท่อประมาณ 10% ของพื้นที่ผิวท่อคิดเป็นฟลักซ์การเกาะตัวของเถ้าบนท่อมีค่าเท่ากับ 11, 5.3 และ 1.8 g/m^2.h ไม่ส่งผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนของท่อ



(ก) เงื่อนไขการทดลอง EFB:FB:Shell = 100:0:0 ไม่ผสมดินขาว



(ข) เงื่อนไขการทดลอง EFB:FB:Shell = 40:45:15 ผสมดินขาว

รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความสามารถการรับความร้อน ความสกปรกที่เกาะบนท่อและการเพิ่มขึ้นของอนุภาค

ตารางที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความสามารถการรับความร้อน ความสกปรกที่เกาะบนท่อและการเพิ่มขึ้นของอนุภาค

การทดลอง		1	2 [9]	3 [9]	4	5
เงื่อนไขการทดลอง		EFB:FB:Shell = 100:0:0	EFB:FB:Shell = 30:50:20	EFB:FB:Shell = 30:50:20	EFB:FB:Shell = 45:40:15	EFB:FB:Shell = 45:40:15
ดินขาว	ไม่ผสม	-	-	-	-	-
	ผสม	-	-	7.8%wt. EFB	7.8%wt. EFB	10%wt. EFB
การเปลี่ยนแปลงการรับความร้อน (%)		68	73	-	-	-
การเพิ่มขึ้นของอนุภาค (g)		14	11	1	0.5	0.16
ความสกปรกที่เกาะบนท่อ (m^2.K/W)		0.023	0.025	-	-	-
ฟลักซ์การเกาะตัว [g/m^2.h]		166	120	11	5.3	1.8
ผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อน		ส่งผล	ส่งผล	ไม่ส่งผล	ไม่ส่งผล	ไม่ส่งผล
เวลาในการทดลอง (h)		17	18	20	18	18

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมจากวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นบันได ต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง เงื่อนไขการเผาไหม้อุณหภูมิเหนือเบด 900°C และแนวทางการใช้สารเติมแต่งเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงสามารถสรุปได้ดังนี้ (ดังแสดงในตารางที่ 6)

1. การเผาไหม้เชื้อเพลิงเงื่อนไขการทดลองที่ไม่ผสมดินขาว พบว่าเชื้อเพลิงสานกันเป็นก้อนและขี้เถ้าเกิดการหลอมตัวภายในห้องเผาไหม้ส่วนเงื่อนไขการทดลองที่มีการผสมดินขาวเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงพบว่าการเผาไหม้ดีขึ้นสังเกตจากการกระจายตัวของเชื้อเพลิงและขี้เถ้าไม่เกิดการหลอมตัวภายในห้องเผาไหม้ ส่วนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเผาไหม้ทุกเงื่อนไขการทดลองมีลักษณะคล้ายคลึงกัน

2. การเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองส่วนใหญ่เกิดขึ้นในทิศทางที่สัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรงมีความหนา 4-7 มิลลิเมตร ของเงื่อนไขการทดลองที่ไม่ผสมดินขาว ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงเหลือประมาณ 70% ในเวลาการทดลอง 17, 18 ชั่วโมง ส่วนเงื่อนไขการทดลองที่มีการผสมดินร่วมกับเชื้อเพลิงพบว่าการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองเกิดขึ้นน้อย ไม่ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน

3. การถ่ายเทความร้อนของแก๊สร้อนกับท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองพบว่าในเงื่อนไขการทดลองที่ไม่มีการผสมดินขาวจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักของการเกาะของอนุภาคบนท่อไอน้ำเมื่อนำมาคิดเป็นฟลักซ์ของอนุภาคมีค่า 166 และ 120 $g/m^2.h$ ส่วนค่าความสกปรกมีค่าเท่ากับ 0.023 และ 0.025 $m^2.K/W$ แต่ในการทดลองที่มีการผสมดินขาวการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำเกิดขึ้นน้อยไม่สามารถคำนวณค่าความสกปรกได้

5. กิตกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ที่ให้เงินสนับสนุนวิจัย และบริษัทชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มจำกัด (มหาชน) บริษัทไทยทาโลว์แอนด์ออยล์จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Office of Agricultural Economics ; 2543-2545

[2] 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”, IFRF combustion journal, Article number 200304, PP. 1-17.

[3] 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.

[4] Zbogar, A., Jensen, P., Frandsen, F., Hansen, J., Glarbprg, P., 2006, “Experimental investigation of ash deposit shedding in a straw-fired boiler”, Energy&Fuel, Vol. 20, PP.512-519.

[5] Thsis, M., Skrifvars B-J., Hupa, M. and Tran H., 2006, “Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1: Deposition rate”, Fuel, Vol. 85, PP. 1125-1130.

[6] Zbogar, A., Jensen, P., Frandsen, F., Hansen, J., Glarbprg, P., 2006, “Experimental investigation of ash deposit shedding in a straw-fired boiler”, Energy&Fuel, Vol. 20, PP.512-519

[7] Tran, K-Q., Iisa, K., Hagstrom, M., Steenari, B-M., Lindqvist, O., and Petersson, Jan B.C., 2004, “On the application of surface ionization detector for the study of akali capture by kaolin in a fixed bed reactor”, Fuel, Vol.83, PP.807-812.

[8] Madhiyanon, T, Sathitrungsak, P., Sungworagarn, S., Khongkla, S. and Tia, S., Impact of Empty Fruit Bunch (EFB) Using as Fuel in a Grate Fired Combustor on Heat Exchange of a Superheater Steam Tube, Proc. of 23rd Conference of mechanical engineering network of Thailand, 2009, 4-7 November 2009, ChiangMai. (InThai), paperno.AEC01

[9] สุขสวัสดิ์ คงกล้า, ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2554). ผลกระทบของการเผาไหม้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างทะลายปาล์มเปล่า ใยผลปาล์มและกะลาปาล์ม ในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นบันไดต่อความสามารถการรับความร้อนท่อผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กทม.