

ผลกระทบของสัดส่วนการผสมเกาลินที่มีต่อการเกิดฟาวลิงและการหลอมตัวของเถ้า ในการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้จากการผลิตน้ำมันปาล์มในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นบันได

Effects of Kaolin-mixing ratios on Fouling and Sintering Formations in Firing of Palm Oil Residues in a Step Grate-fired Combustor

ฐานิตย์ เมธิยานนท์^{1*}, ประสาน สถิตยธิ์เรืองศักดิ์¹, สราวุฒิ สังวรกาญจน์¹, วิชชุลดา ชัยพร¹ และสุวิทย์ เตีย²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประจักษ์ศิลปาคม แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

*ติดต่อ: thanid_m@yahoo.com, 0-2988-3655 ต่อ 107

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของสัดส่วนการผสมเกาลินในการเผาไหม้ร่วมกับใยผลปาล์ม (FB) และกะลาปาล์ม (Shell) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มที่มีต่อการเกิดฟาวลิงบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง และการหลอมตัวของเถ้าบนตะกรับเตาเผาไหม้แบบขั้นบันได ซึ่งพิจารณาในด้านความสามารถในการรับความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองและฟลักซ์ของการเกาะตัวของเถ้า การทดลองได้ใช้ส่วนผสมของ FB:Shell ที่ 80:20 และใช้เกาลินผสมในสัดส่วน 0, 4 และ 8% โดยน้ำหนักของใยผลปาล์มแห้ง การเผาไหม้เกิดขึ้นภายในช่วงอุณหภูมิ 860-900°C ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิแก๊สร้อนเข้าปะทะท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองมีค่าในช่วง 750-850°C ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองถูกควบคุมอุณหภูมิผิวท่อในช่วง 450-550°C โดยใช้น้ำและอากาศเป็นตัวกลางในการรับความร้อน ในขณะที่ปริมาณการเกาะตัวของเถ้าบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองวัดด้วยโหลดเซลล์ ผลการทดลองพบว่าในกรณีไม่ผสมเกาลิน การเกาะตัวของเถ้าบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองเกิดขึ้นมาก ส่วนความสามารถในการรับความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งลดลงเหลือ 79% ของค่าเริ่มต้นภายในช่วงเวลา 20 ชั่วโมง เนื่องจากฟาวลิงบนผิวท่อซึ่งคิดฟลักซ์ของการเกาะตัวได้เท่ากับ 149 g/m².h นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นถึงการหลอมตัวของเถ้าบนตะกรับเตา ในขณะที่ความสามารถในการรับความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีที่ผสมเกาลินทุกสัดส่วน โดยมีฟลักซ์ของการเกาะตัวในช่วง 15-30 g/m².h และไม่พบการหลอมตัวของเถ้าบนตะกรับ ผลการทดลองสรุปได้ว่าสัดส่วนการผสมเกาลินที่ 4% เพียงพอแล้วต่อการแก้ไขปัญหาฟาวลิงและการหลอมตัวของเถ้าจากการเผาไหม้ ใยผลปาล์มและกะลาปาล์ม

คำหลัก: กะลาปาล์ม/ ดินขาว/ ใยผลปาล์ม/ ฟาวลิง

Abstract

This research presents the effects of kaolin-blending ratios in firing of the palm fiber (FB) with the palm shell (shell) on the formations of fouling on simulated superheater tube (probe), and the ash sintering on the grate of a step grate-fired combustor. The pre-mixed of FB:Shell at 80:20, and the mixing-ratios of kaolin: 0, 4, and 8% wt. of dry FB were performed. The combustion temperatures ranging 860-900°C were controlled, corresponding the up-stream gas temperatures in the range 750-800°C. The

results showed that the heat uptake of the probe, in the case of unmixed-kaolin, was reduced to 79% of the initial value within a testing period of 20 hours because the fouling formed on the probe. The deposition flux of $149 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ was detected, and the sintering of bottom ash in this case was found. The heat uptake, for all kaolin-mixing ratios, seemed unchanged over the same testing period. Low deposition fluxes ranging $15\text{-}30 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ were evaluated, and the on-grate ash-sintering was not found. The experimental results concluded that the kaolin-mixing ratio of 4% was sufficient for solving the fouling and sintering problems occurred in co-combustion of palm fiber and palm shell.

Keywords: Fouling/ Kaolin/ Palm Fiber/ Palm Shell

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทย ได้ส่งเสริมให้มีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มมากขึ้นเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลจำพวกถ่านหินหรือน้ำมันเตาตามนโยบายของรัฐบาล โดยเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีศักยภาพในการใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น แกลบ ชี้เลี้ยง ฟางข้าว ชังข้าวโพด ชากอ้อย และมีวัสดุที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตปาล์มน้ำมันซึ่งมีปริมาณมากในทางภาคใต้ของประเทศ (920,230 ตันต่อปี [1]) ทั้งนี้ โรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มเกือบทุกแห่งที่ใช้หม้อไอน้ำในการผลิตไอน้ำไปทำการนึ่งทะลายปาล์มสด (Fresh Fruit Bunch; FFB) จะนำไยผลปาล์มทั้งหมดและกะปาล์มบางส่วน (1-3% จากที่มีอยู่ประมาณ 6% ในทะลายปาล์มสด) ที่เหลือออกจากกระบวนการผลิตมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ ซึ่งโรงงานทุกแห่งมักพบปัญหาที่ส่งผลให้ต้องหยุดการทำงานของหม้อไอน้ำในช่วงเวลาอันสั้น คือ 1) การเกิดฟาวลิงบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และ 2) การหลอมของซี้ถ้ำบนตะแกรงและผนังห้องเผาไหม้ ปัญหาทั้งสองส่วนที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ถดถอยลง รวมไปถึงการเสียหายของอุปกรณ์ภายในห้องเผาไหม้ทั้งกลไกการขับเคลื่อนตะแกรงและวัสดุทนความร้อนที่ผนังเตาการแก้ไขทำได้โดยหยุดระบบเพื่อทำความสะอาดและซ่อมบำรุงซึ่งอาจมีความถี่ในการหยุดถึง 2 สัปดาห์ต่อครั้ง

ปัญหาดังกล่าวมีสาเหตุมาจากองค์ประกอบเก่าของเชื้อเพลิงจำพวกโพแทสเซียม (K) คลอรีน (Cl) และซัลเฟอร์ (S) ซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในรูปของสารประกอบ KCl หรือ K_2SO_4 ซึ่งมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ ($\approx 740^\circ\text{C}$) [2-5] ดังนั้นขณะเผาไหม้จึงเกิดขึ้นในสถานะแก๊สแล้วไหลไปพร้อมกับแก๊สไอเสีย โดยเมื่อไหลผ่านชุดท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งซึ่งมีอุณหภูมิผิวประมาณ $400\text{-}500^\circ\text{C}$ จึงเกิดการควบแน่นและมีลักษณะเป็นยางเหนียวซึ่งเมื่อมีซี้ถ้ำลอยไหลมาปะทะก็จะเกิดการยึดติดเป็นชั้นของแข็งหรือฟาวลิง (Fouling หรือ Deposit) เพิ่มขึ้นตามเวลา นอกจากนี้หากเถ้ามีองค์ประกอบของแคลเซียม (Ca) และซิลิกอน (Si) จะทำให้เกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบซิลิเกต (K-Ca-Si) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำเช่นกัน ($\approx 860^\circ\text{C}$) ส่งผลให้เกิดการหลอมตัวของซี้ถ้ำบนตะแกรงเตาและผนังห้องเผาไหม้ (Sintering และ Slagging) มีงานวิจัยต่างประเทศจำนวนหนึ่งได้ทำการศึกษาการเกิดฟาวลิงโดยการติดตั้ง air-cooled probe ในบริเวณท่อผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง [2-6] รวมไปถึงงานวิจัยอีกส่วนหนึ่งที่ทำการศึกษานำสารเติมแต่งลดปัญหาฟาวลิงบนท่อไอน้ำโดยใช้สารเติมแต่ง (Additive) ชนิดต่างๆ อาทิเช่น เกาลิน (Kaolin) โดโลไมท์ (Dolomite) และเบนโทไนท์ (Bentonite) [7-8] ซึ่งพบว่าสารเติมแต่งชนิดเกาลินซึ่งมีองค์ประกอบของ Aluminum (Al) และ Silicon (Si) เป็นหลักสามารถทำปฏิกิริยากับ K ในเถ้าของเชื้อเพลิงเพื่อลดปัญหาการเกาะตัวได้เป็นอย่างดี

ดังนั้น จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาการแก้ปัญหาฟาวลิงและการหลอมตัวของถ่านบดตะกั่วแบบชั้นบันไดที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ไยผลปาล์ม (FB) และกะลาปาล์ม (Shell) โดยใช้เกาลินเป็นสารเติมแต่งในสัดส่วนผสม 0, 4 และ 8% โดยน้ำหนักของไยผลปาล์ม (FB) ในลักษณะผสมล่วงหน้า (Pre-mixing) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ได้ผลเป็นอย่างดีจากการทดลองเผาไหม้ร่วมกับทะเลาะปาล์มเปล่า [9-11] ในการศึกษาจะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง และฟลักซ์ของการเกาะตัวของถ่านบนท่อ รวมไปถึงกายภาพของถ่านที่เกาะตัวบนผิวท่อ

2. วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองคือ ไยผลปาล์ม (FB) และกะลาปาล์ม (Shell) มีองค์ประกอบเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1 ส่วนผลวิเคราะห์องค์ประกอบถ่านของ FB และ Shell รวมไปถึงเกาลินที่ใช้เป็นสารเติมแต่งซึ่งมาจากแหล่งภายในประเทศแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงในการทดลอง

องค์ประกอบในเชื้อเพลิง	ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก	
	ไยผลปาล์ม	กะลาปาล์ม
Carbon	30.82	44.44
Hydrogen	3.74	5.01
Oxygen	21.61	34.70
Nitrogen	0.84	0.28
Sulphur	0.08	0.02
Moisture	38.50	12.00
Ash	4.42	3.52
Higher heating value (MJ/kg)	13.13	18.27

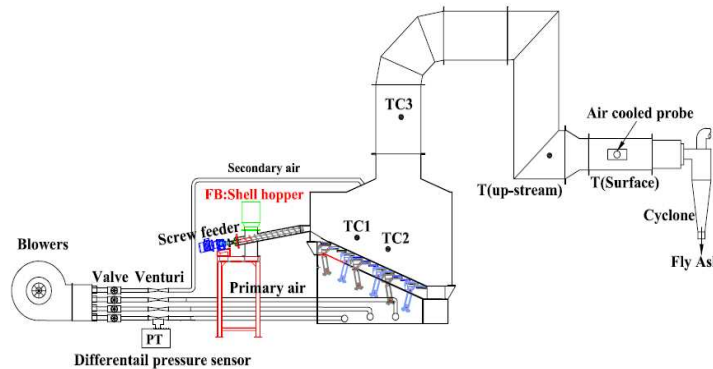
ตารางที่ 2 ร้อยละของธาตุในถ่านเชื้อเพลิงและเกาลิน

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง		
	ไยผลปาล์ม	กะลาปาล์ม	เกาลิน
Si	15.02	10.49	23.31
Al	0.41	0.69	20.85
K	16.32	4.03	1.72
Ca	12.79	26.92	0.01
Na	0.20	0.05	0.06
Cl	4.47	0.08	NA
S	2.00	0.36	NA
P	5.14	0.62	NA
Mg	3.22	0.55	0.24
Fe	1.35	0.43	0.80

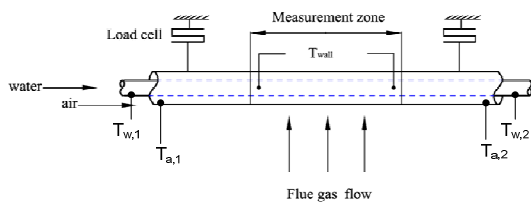
2.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมเตาเผาไหม้ตะกั่วแบบชั้นบันไดและตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์การทดลองเตาเผาไหม้มีขนาด 1.15x2.35x4.40 m โดยมีลักษณะตะกั่วเป็นแบบชั้นบันไดซึ่งมีบันไดจำนวนทั้งหมด 13 ชั้น และมีใบกวาดจำนวน 12 ชุด อยู่ระหว่างชั้นบันไดแต่ละชั้น ซึ่งใบกวาดจะทำหน้าที่กวาดเชื้อเพลิงให้เคลื่อนที่ไปยังบันไดชั้นถัดไปที่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าสำหรับการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาไหม้จะใช้สกรูลำเลียงจำนวน 2 ชุด ซึ่งควบคุมอัตราการป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ การจ่ายอากาศได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคืออากาศส่วนที่ 1 เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงบนตะกั่ว และอากาศส่วนที่ 2 เป็นอากาศที่เข้าไปช่วยเผาไหม้สารระเหยและแก๊สที่เผาไหม้เหนือเบดซึ่งถูกจ่ายเข้ามาทางหลังคาห้องเผาไหม้ สำหรับซีเถ้าจะถูกลำเลียงออกมาด้วยสกรู นอกจากนี้ถ่านที่ลอยติดมากับแก๊สเผาไหม้จะถูกดักด้วยไซโคลน ในส่วนของการวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองได้ใช้เวนจิวรีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ ของย่านการวัด ส่วนการวัดอุณหภูมิในการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลที่มีความละเอียด $\pm 1\%$ ซึ่งทำการวัด 5 ตำแหน่งคือ อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ (TC1-TC3), อุณหภูมิแก๊สร้อนเข้าปะทะท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง ($T_{up-stream}$) และ

อุณหภูมิผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง (T_{surface} หรือ T_{wall})



รูปที่ 1 ลักษณะเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นบันไดและตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัด



รูปที่ 2 ลักษณะของชุดท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง (air & water cooled probe)

ในการศึกษาถึงความสามารถในการรับความร้อนที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดฟาวลิง ได้ทำการติดตั้งท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองแบบท่อซ้อนซึ่งใช้อากาศร่วมกับน้ำเป็นตัวระบายความร้อน โดยอากาศไหลในท่อชั้นนอก (ท่อไอน้ำ Sch40 ขนาด 25 mm.) ส่วนน้ำไหลในท่อชั้นใน (ขนาด 16 mm.) ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิผิวท่อเริ่มต้น (T_{wall}) ได้ในช่วง $400-550^{\circ}\text{C}$ หลักการของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองคือเมื่อแก๊สไอเสียไหลผ่านท่อจะถ่ายเทความร้อนผ่านผนังไปยังอากาศและน้ำที่ไหลอยู่ภายใน วิธีการควบคุมอุณหภูมิผิวท่อทำโดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศและน้ำด้วยโรตาริเตอร์ ในขณะที่ความร้อนที่น้ำและอากาศได้รับจากท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองนั้นสามารถคำนวณได้จากการบันทึกอุณหภูมิขาเข้า-ออกของทั้งน้ำและอากาศ โดยใช้เซนเซอร์อุณหภูมิชนิด PT 100 ซึ่งมีความละเอียดในการอ่านค่าสูงกว่าเทอร์โมคัปเปิ้ล การคำนวณเป็นไปตามสมการสมดุลพลังงานดังสมการ (1) และ (2) อย่างไรก็ตาม การนำเสนอ

ผลกระทบของการเกิดฟาวลิงบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองต่อความสามารถในการรับร้อนในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอในรูปแบบของความสามารถในการรับความร้อนสัมพัทธ์ (Relative heat uptake) ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (3) นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งโพลดเซลล์เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของท่อที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอันเนื่องมาจากอนุภาคเกาะบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองนำมาคำนวณฟลักซ์ของการเกาะตัวดังสมการที่ (4) [9-11]

- ความสามารถในการรับความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง (W)

$$Q(t) = Q_w(t) + Q_a(t) \quad (1)$$

$$Q(t) = m_w c_{p,w} (T_{w,out}(t) - T_{w,in}(t)) + m_a c_{p,a} (T_{a,out}(t) - T_{a,in}(t)) \quad (2)$$

โดยที่

$Q(t)$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมที่เวลาใดๆ (W)

$Q_a(t)$ = อัตราความร้อนที่อากาศได้รับที่เวลาใดๆ (W)

$Q_w(t)$ = อัตราความร้อนที่น้ำได้รับที่เวลาใดๆ (W)

\dot{m}_a, \dot{m}_w = อัตราการไหลของน้ำและอากาศ (kg/s)

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

- ความสามารถในการรับความร้อนสัมพัทธ์

$$\text{Relative heat uptake (\%)} = \left[\frac{Q(t)}{Q(t_0)} \right] 100\% \quad (3)$$

โดยที่

$Q(t_0)$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมที่เวลาเริ่มต้นการทดลองซึ่งท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองสะอาด (W)

- ฟลักซ์ของการเกาะตัว (deposition flux, $\text{g/m}^2\text{-h}$)

$$\text{Deposition flux} = \frac{\text{Mass}}{\text{Area} \times \text{Time}} \quad (4)$$

โดยที่ Mass = มวลของ deposit ที่เพิ่มขึ้น (g)

Area = พื้นที่ฉายของท่อด้านปะทะแก๊สเผาไหม้

$$(\text{Projected area}) = D_o \times L \quad (\text{m}^2)$$

Time = เวลาที่ใช้ในการทดลอง (h)

ขั้นตอนการทดลองปรับปริมาณอากาศในส่วนต่างๆ ตามเงื่อนไขจากนั้นทำการจุดเตาโดยใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง เพื่ออุ่นเตาเผาไหม้ให้อุณหภูมิสูงประมาณ $860\text{-}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วจึงเปลี่ยนเชื้อเพลิงผสมระหว่างไยผลปาล์มและกะลาปาล์ม (FB:Shell) เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัวซึ่งใช้เวลาประมาณ 60-120 นาที จึงทำการติดตั้งท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง และเริ่มทำการบันทึกผลการทดลอง ในแต่ละการทดลองได้ใช้ส่วนผสมของเชื้อเพลิงไยผลปาล์ม:กะลาปาล์มที่ 80:20 และใช้เกาหลินผสมในสัดส่วน 0, 4 และ 8% โดยน้ำหนักของ FB ในลักษณะการผสมเกาหลินเข้าไปกับเชื้อเพลิงล่วงหน้าก่อนการเผาไหม้ สำหรับเงื่อนไขการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม FB:Shell = 80:20

เงื่อนไขการทดลอง	การทดลองที่		
	1	2	3
สัดส่วนการผสมเกาหลิน (%wt.FB)	-	4	8
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/h)	33	35	34
ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA%)	52	40	43
สัดส่วนอากาศส่วนที่ 1 :	75:25	75:25	75:25
อากาศส่วนที่ 2			
อุณหภูมิเหนือเบด; T1 ($^{\circ}\text{C}$)	899	900	907
อุณหภูมิแก๊สไหลผ่านท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง; T _{up-stream} ($^{\circ}\text{C}$)	852	899	900
อุณหภูมิผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง ($^{\circ}\text{C}$)	463-415	585	571
เวลาในการทดลอง (h)	20	19	19

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์การทดลอง

จากการศึกษาปัญหาการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองและการหลอมของถ้ำบนตะกรับแบบชั้นบันได ด้วยการใส่เกาหลินเป็นสารเติมแต่ง

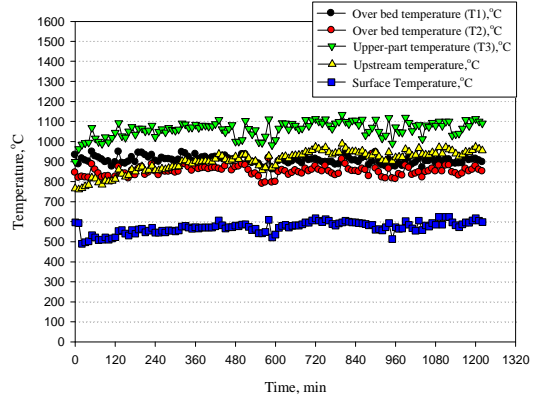
ร่วมกับการเผาไหม้ไยผลปาล์ม (FB) และกะลาปาล์ม (shell) ซึ่งได้พิจารณาถึงพฤติกรรมของการเผาไหม้ด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ สำหรับในส่วนของผลกระทบต่อท่อไอน้ำต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและลักษณะทางกายภาพของการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง แสดงผลการทดลองดังหัวข้อต่อไป

3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเผาไหม้ภายในเตาตะกรับแบบชั้นบันได

จากรูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆภายในเตาเผาไหม้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยมีสัดส่วนการผสมของเชื้อเพลิงในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 จากการสังเกตลักษณะการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้พบว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นทั้งบนเบดและเหนือเบดเชื้อเพลิง โดยในกรณีที่ไม่มีการผสมเกาหลิน เชื้อเพลิงบางส่วนเกิดการสานตัวเป็นก้อนขณะเผาไหม้ และพบการหลอมตัวของถ้ำบนตะกรับ ส่วนการทดลองที่มีการผสมเกาหลินพบว่าเชื้อเพลิงมีการกระจายตัวดีขึ้นและมีการปะทุของสะเก็ดไฟขณะเผาไหม้

เมื่อพิจารณาส่วนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเผาไหม้ที่ตำแหน่งต่างๆ และอุณหภูมิผิวท่อแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ในทุกเงื่อนไขการทดลองมีลักษณะเดียวกันคือ อุณหภูมิเหนือตะกรับที่ทางเข้า T1 ซึ่งเป็นตำแหน่งใกล้ช่องทางเข้าเชื้อเพลิง (ระยะหนึ่งในสามของความยาวห้องเผาไหม้) ที่ควบคุมไว้ใกล้เคียงกันประมาณ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยช่วงนี้เป็นบริเวณที่มีการเผาไหม้คาร์บอนเสถียรและสารระเหยบางส่วน ส่วนตำแหน่งเหนือตะกรับ T2 มีอุณหภูมิต่ำลงเล็กน้อยโดยมีค่าในช่วง $828\text{-}838\text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากการเผาไหม้คาร์บอนเสถียรและสารระเหยลดน้อยลง สำหรับอุณหภูมิเหนือเบดเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง T3 ในทุกเงื่อนไขมีค่าสูงกว่า $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิทั้ง T1 และ T2 เนื่องจากการเผาไหม้ที่รุนแรงของสารระเหยบางส่วนที่ลอยขึ้นมาจากเบดเชื้อเพลิงและแก๊สที่เผาไหม้ได้กับอากาศส่วนที่สองที่ถูกจ่ายบริเวณเหนือห้องเผาไหม้จึง

ทำให้อุณหภูมิบริเวณนี้สูงขึ้น สำหรับอุณหภูมิแก๊สร้อนที่ไหลผ่านท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง ($T_{up-stream}$) มีค่าในช่วง 850-900°C โดยที่อุณหภูมิผิวท่อ (T_{wall}) เริ่มต้นมีค่าในช่วง 450-590°C ทั้งนี้ ผลการทดลองในกรณีที่ไม่มีการผสมเกล็ดหินพบว่าอุณหภูมิผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองมีค่าลดลงจาก 463 เหลือ 415°C ภายในช่วงระยะเวลาการทดลอง 20 ชั่วโมงซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดฟาวลิงบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองปริมาณมากเป็นผลให้ความสามารถในการรับความร้อนสัมผัสของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองลดน้อยลงเหลือ 78% ของค่าเริ่มต้นภายในช่วงเวลา 20 ชั่วโมง สำหรับกรณีเงื่อนไขที่ทำการผสมเกล็ดหินที่ 4% และ 8% โดยน้ำหนักโยผลปาล์มพบว่าตลอดช่วงเวลาการทดลอง 19 ชั่วโมง อุณหภูมิผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง โดยปริมาณมวลอนุภาคที่เกาะท่อและความสามารถในการรับความร้อนสัมผัสของแต่ละเงื่อนไขสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4

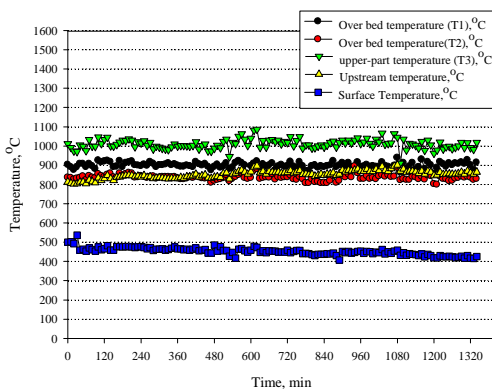


(ค) การทดลองผสมเกล็ดหิน 8%

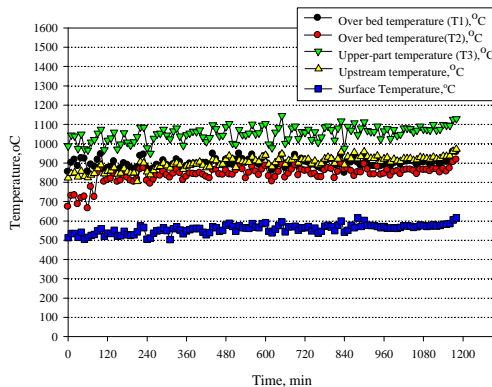
รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

ตารางที่ 4 สรุปผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

เงื่อนไขการทดลอง	การทดลองที่		
	1	2	3
สัดส่วนการผสมเกล็ดหิน (%wt.FB)	-	4	8
อุณหภูมิเหนือเบด T1 [°C]	899	900	907
อุณหภูมิเหนือเบด T2 [°C]	828	838	830
อุณหภูมิเหนือห้องเผาไหม้ T3 [°C]	1018	1035	1058
อุณหภูมิแก๊สร้อน [°C]	852	899	900
อุณหภูมิผิวท่อเฉลี่ย [°C]	463-415	585	571
ความสามารถในการรับความร้อนสัมผัส (%)	78	92	100
มวลของอนุภาคที่เกาะบนผิวท่อ (g)	23	3	2
ฟลักซ์การเกาะตัว [g/m ² .h]	149	30	15
ผลกระทบต่อถ่ายเทความร้อน	มีมาก	เล็กน้อย	ไม่ส่งผล
เวลาในการทดลอง (h)	20	19	19



(ก) การทดลองไม่ผสมเกล็ดหิน



(ข) การทดลองผสมเกล็ดหิน 4%










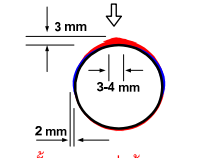
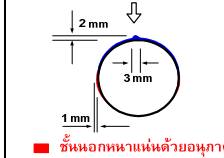
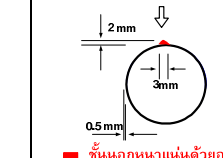
3.2 ลักษณะทางกายภาพของการเกิดฟาวลิงและภาพสเกตซ์บนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

ลักษณะทางกายภาพของการเกิดฟาวลิงบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงสามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายและภาพสเกตซ์จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงในกรณีที่ไม่มีการผสมเกล็ดหิน ฟาวลิงที่เกิดขึ้นบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองมีลักษณะแบ่งออกเป็น 2 ชั้นหลักๆ คือชั้นที่ติดกับผิวท่อซึ่งมีลักษณะเป็นสีขาวมีความหนาประมาณ 1-2 มิลลิเมตร

เกิดจากการควบแน่นของสารประกอบ KCl (อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว KCl ประมาณ 750°C) บนผิวท่อซึ่งที่ผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า [7] ซึ่งคราบที่เกิดจากการควบแน่นจะมีสมบัติที่มีความหนืดเหนียวทำให้อนุภาคของเถ้าที่ลอยมากับแก๊สร้อนมาเกาะติดบริเวณด้านที่ปะทะกับแก๊สร้อนซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นสีเทาที่มีความหนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ลักษณะของอนุภาคสีเทานี้เป็นชั้นแข็งและทำความสะอาดได้ยาก สำหรับการทดลองที่มีการผสม

เกลือโพแทสเซียมร่วมกับเชื้อเพลิงทุกสัดส่วนพบว่าการเกิดฟาวลิงบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองมีเพียงเล็กน้อยซึ่งมีปริมาณลดลงตามสัดส่วนการผสมเกลือที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมมีฐานกว้างประมาณ 3 mm และสูง 2-3 mm ทั้งนี้ อนุภาคสีขาวที่ติดบนท่อไอน้ำจำลองนั้นน่าจะเป็นอนุภาคของเกลือที่ลอยมาเกาะติดกับผิวท่อ โดยที่บริเวณด้านข้างและด้านหลังมีลักษณะการเกาะเป็นผงสีขาวและเทา โดยมีสภาพร่วนสามารถขูดออกได้ง่าย

ตารางที่ 5 ภายภาพของการเกิดฟาวลิงบนท่อและภาพสเกตช์บนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองภายใต้สัดส่วนการผสมเกลือต่าง ๆ

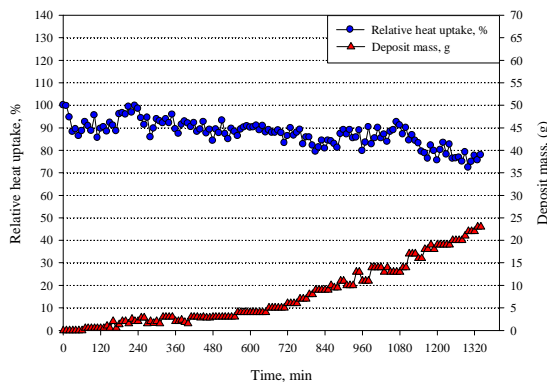
เงื่อนไขการทดลอง	การทดลองที่		
	1	2	3
สัดส่วนการผสมเกลือ (%wt.FB)	-	4	8
ลักษณะการเกาะด้านหน้าท่อ			
ลักษณะการเกาะด้านข้างท่อ			
ลักษณะการเกาะด้านหลังท่อ			
ภาพสเกตช์ของอนุภาคที่เกาะบนผิวท่อ	 <ul style="list-style-type: none"> ■ ชั้นนอกหนาแน่นด้วยอนุภาคลักษณะสีเทา ■ ชั้นในหนาแน่นด้วยอนุภาคลักษณะสีขาว ■ ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง 	 <ul style="list-style-type: none"> ■ ชั้นนอกหนาแน่นด้วยอนุภาคลักษณะสีเทา ■ ชั้นในหนาแน่นด้วยอนุภาคลักษณะสีขาว ■ ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง 	 <ul style="list-style-type: none"> ■ ชั้นนอกหนาแน่นด้วยอนุภาคลักษณะสีเทา ■ ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

3.3 พลักร์ของการเกาะตัวของเถ้าบนท่อและความสามารถในการรับความร้อนสัมพัทธ์ของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

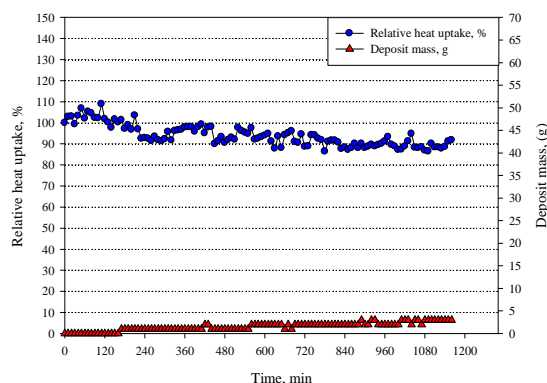
จากรูปที่ 4 แสดงถึงผลกระทบของการเกิดฟาวลิงบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อความสามารถในการรับ

ความร้อนจากปริมาณความร้อนรวมจากน้ำและอากาศดังสมการที่ (1) และ (2) ซึ่งแสดงในรูปความสามารถในการรับความร้อนสัมพัทธ์ของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (3) พบว่าในกรณีที่ไม่มีการผสมเกลือ ความสามารถในการรับความร้อน

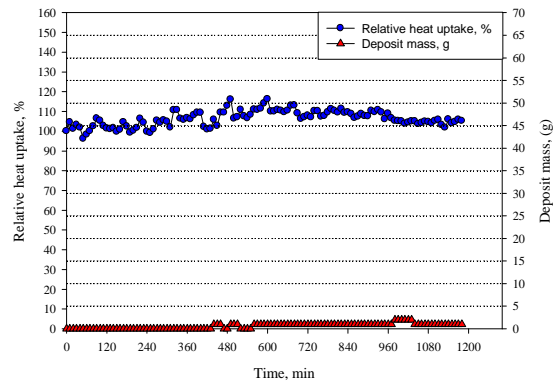
สัมพัทธ์ของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองลดลง ในขณะที่มวลของอนุภาคที่เกาะบนผิวท่อเพิ่มมากขึ้น โดยความสามารถในการรับความร้อนสัมพัทธ์ของท่อลดลงเหลือ 78% ของค่าเริ่มต้น ภายในช่วงเวลา 20 ชั่วโมง เนื่องจากอนุภาคเกาะตัวบนผิวท่อเป็นเสมือนฉนวนความร้อนในการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สมายังท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง ทั้งนี้ ปริมาณอนุภาคเกาะที่เกาะตัวนั้นคิดเป็นฟลักซ์การเกาะตัวของถ้ำบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองมีค่าเท่ากับ $149 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนการผสมเกลือเป็น 4% และ 8% ของน้ำหนัก FB พบว่ามีการเกาะตัวของถ้ำบนท่อลดลงตามการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเกลือ ซึ่งสามารถคิดเป็นฟลักซ์การเกาะตัวของถ้ำบนท่อเท่ากับ 30 และ $15 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ ตามลำดับ โดยที่ความสามารถในการรับความร้อนลดลงเหลือ 92% จากค่าเริ่มต้นในกรณีการผสมเกลือที่ 4% wt. และมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงสำหรับการผสมเกลือที่ 8% wt. ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการรับความร้อนนั้น สอดคล้องกับลักษณะการเกาะตัวของถ้ำดังแสดงในตารางที่ 5



(ก) การทดลองไม่ผสมเกลือ



(ข) การทดลองผสมเกลือ 4%



(ค) การทดลองผสมเกลือ 8%

รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับความร้อนสัมพัทธ์และมวลของอนุภาคที่เกาะบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนเกลือที่มีต่อการเกิดฟาวลิงบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองและการหลอมของถ้ำบนตะกรับแบบชั้นบันได จากการเผาไหม้ไพลาล์ม (FB) และกะลาปาล์ม (shell) ในสัดส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก ในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นบันได สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้เกิดขึ้นทั้งบนตะกรับและเหนือเบดเชื้อเพลิง โดยมีอุณหภูมิเบด (T1 และ T2) ประมาณ 900°C และมีอุณหภูมิเหนือเบดสูงกว่า $1,000^{\circ}\text{C}$ โดยในกรณีไม่ผสมเกลือสามารถสังเกตเห็นการหลอมตัวของถ้ำบนตะกรับ
2. ความสามารถในการรับความร้อนสัมพัทธ์ของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองลดลงเหลือ 78% ของค่าเริ่มต้นภายในเวลา 20 ชั่วโมงในกรณีที่ไม่ผสมเกลือ และการเพิ่มสัดส่วนเกลือเป็น 4% โดยน้ำหนักของไพลาล์มส่งผลให้ความสามารถในการรับความร้อนสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเป็น 92% และไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีผสมเกลือ 8%
3. ฟลักซ์ของการเกาะตัวอนุภาคบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองมีค่า $149 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ ในกรณีไม่ผสมเกลือ และมีค่าลดลงตามการเพิ่มสัดส่วนเกลือจาก 4 เป็น 8% โดยน้ำหนักของไพลาล์มซึ่งมีฟลักซ์ของอนุภาค 30 และ $15 \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$ ตามลำดับ

4. สัดส่วนการผสมเกาหลินที่ 4% โดยน้ำหนักของใยผลปาล์ม เพียงพอแล้วต่อการแก้ไขปัญหาฟาวลิงและการหลอมตัวของเถ้าจากการเผาไหม้ใยผลปาล์ม (FB) และกะลาปาล์ม (shell)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ที่ให้เงินสนับสนุนวิจัย และบริษัทไทยทาโลว์ แอนด์ออยล์ จำกัด 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] Zbogor, 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] Zbogor, 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] Steenari, BM., Lindqvist, O., 1998, "High-temperature reaction of straw ash and the anti-sintering additives kaolin and dolomite", Biomass and Bioenergy Vol. 14, PP. 67-76.
- [9] Madhiyanon, T., Sathitrungsak, P., Khongkla, S., Sungworagarn, 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 on mechanical engineering network of Thailand, 2009, 4-7 November 2009, Chiang Mai. (InThai)
- [10] Madhiyanon, T., Sathitrungsak, P., Sungworagarn, S. Pipatmanomai, S. and Tia, S., 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.
- [11] Madhiyanon, T., Sathitrungsak, P., Sungworagarn, S. Fukuda, S. and Tia, S., 2013, "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, Vol.115, PP. 182-191.