

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24  
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

**ผลกระทบของวิธีการจ่ายสารเติมแต่งในการเผาไหม้ทะลายปาล์มเปล่าในเตาเผาไหม้  
ตะกรับแบบขั้น ต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง**  
**Effect of Additive Injection Method in Palm Oil Empty Fruit Bunch (EFB) Burning in  
a Step Grate-fired Combustor on Heat Exchange Ability of Superheated Steam Tube**

ฐานิตย์ เมธิยานนท์<sup>1\*</sup> สรวุฒิ สังวรกาญจน์<sup>2</sup> ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์ และสุวิทย์ เตีย<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

<sup>4</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400

\*ติดต่อ : โทร (662) 9883655 ต่อ 3106, 3107

E-mail: thanid\_m@yahoo.com<sup>1\*</sup>

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการใช้สารเติมแต่งเผาไหม้ร่วมกับทะลายปาล์มเปล่าในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้น สำหรับการแก้ปัญหาการเกิด deposit หรือ fouling และ sintering ที่ส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งจะใช้กาอลิน (kaolin) เป็นสารเติมแต่ง (additive) โดยมีวิธีการใช้สารเติมแต่งดังนี้คือ การผสมกาอลินร่วมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ และการฉีดพ่นเหนือเบดร่วมกับอากาศส่วนที่สอง ทั้งนี้จะแบ่งเป็นสัดส่วนเงื่อนไขการผสมกาอลินร่วมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ต่อการฉีดพ่นกาอลินร่วมกับอากาศส่วนที่สอง ที่สัดส่วน 100:0, 50:50, 0:100 ในทุกเงื่อนไขการทดลอง อุณหภูมิเหนือเบดถูกควบคุมอยู่ในช่วง 850-900°C ในการศึกษาผลกระทบของการเกิด การเกาะตัว (deposit) ต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้น จะจำลองท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองเป็นลักษณะท่อซ้อนสองชั้นโดยมีน้ำและอากาศเป็นตัวกลางรับความร้อนติดตั้งไว้ที่ปล่องแก๊สเผาไหม้ อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ไหลผ่านท่อและอุณหภูมิผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าในช่วง 770-840°C และ 500-550°C ตามลำดับ ผลการทดลองในทุกเงื่อนไขของการใช้กาอลิน พบว่ามีอนุภาคเกาะตัวบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองแต่มีจำนวนน้อยมากส่วนใหญ่เกิดบริเวณด้านที่ปะทะกับแก๊สเผาไหม้ ซึ่งคิดเป็นอัตราการเกาะตัว (deposition flux) มีค่าเพียง 10, 32 และ 54 g/m<sup>2</sup>-h สำหรับการผสมกาอลินทั้งหมดกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ (100:0) แบ่งผสมก่อนการเผาไหม้ 50% ฉีดพ่นร่วมกับอากาศส่วนที่สอง 50% (50:50) และฉีดพ่นกาอลินทั้งหมดพร้อมอากาศส่วนที่สอง (0:100) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เกาะบนท่อไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง ส่วนการเกิดถ้ำหลอม (sintering) ในเบดพบว่ายังเกิดขึ้นในเงื่อนไขการทดลองจ่ายกาอลินทั้งหมดเหนือเบด (0:100)

**คำสำคัญ:** การเกาะตัว/ กาอลิน/ เตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้น/ ทะลายปาล์มเปล่า/ สารเติมแต่ง

**Abstract**

This research aims to study the injection means of the additive employed to solve the fouling and sintering problems from burning palm oil empty fruit bunch (EFB) in the step grate-fired combustor. Kaolin used as the additive was conveyed into the combustor by pre-mixing with EFB and simultaneously

introducing with the secondary air, at three different ratios of pre-mixing to injecting with the secondary air (by weight) i.e., 100:0, 50:50 and 0:100. In the experiments, the over bed temperature was controlled in a range of 850-900°C. To study the influence of the deposit formation on the heat uptake ability of the superheater steam tube, a double-pipe (probe), through which air and water flow, was used to simulate the superheated steam condition. The upstream flue gas (at probe) and probe surface temperatures were regulated in the range 770-840°C, and 500-550°C, respectively. The results show that for all conditions of kaolin use, the deposit was found forming on the probe, but to a less extent, and this formation principally took place at the upstream side of the probe. The measured deposition flux was 4, 32 and 54 g/m<sup>2</sup>-h for 100% kaolin pre-mixing, 50% pre-mixing-50% injection with the secondary air, and 100% injection with the secondary air, respectively. However, the deposit formation had no effect on heat exchange ability of probe and outside overall heat transfer coefficient. The sintering of bottom ash was observed by a mean of 100% kaolin injection with the secondary air.

**Keyword:** additive/ deposition/ empty fruit bunch/ grate-fired combustor/ kaolin

## 1. บทนำ

ปัจจุบันรัฐบาลได้ส่งเสริมให้มีการใช้ชีวมวลเพิ่มมากขึ้นเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล จำพวก น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา หรือถ่านหินที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีแนวโน้มของราคาที่จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปใช้นั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบเช่น การเผาไหม้โดยตรง หรือ การผลิตเป็นไบโอแก๊ส และไบโอดีเซล แต่ส่วนใหญ่มักนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้โดยตรงเพราะสะดวกและมีประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรในประเทศไทยนั้นมีหลากหลายชนิด ได้แก่ แกลบ ชี้เลื้อย ฟางข้าว ทะลายปาล์ม ชังข้าวโพด ฯลฯ อย่างไรก็ตามชีวมวลที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ไม่ได้มีศักยภาพในการใช้งานเท่าเทียมกันทุกชนิด เพราะอาจมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณที่เหลือในแต่ละฤดูกาล ในขณะที่ ทะลายปาล์มเปล่า (Empty Fruit Bunch; EFB) เป็นวัสดุที่เหลือจากการกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มซึ่งมีปริมาณมากในภาคใต้ของประเทศ (920,230 ตันต่อปี [1]) ซึ่งมีการนำไปใช้น้อยมากดังนั้นจึงเป็นโอกาสดีหากจะนำ ทะลายปาล์มเปล่าเหล่านี้มาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้าขนาดเล็กทางภาคใต้ แต่ก็ยังมีบริษัทเอกชนหลายรายพยายามนำ ทะลายปาล์มเปล่ามาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ใน

เตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้น ซึ่งจะประสบปัญหาทางด้านเทคนิคที่ตามมาจากการใช้ทะลายปาล์มอาจทำให้โรงงานต้องหยุด shut-down ในส่วนของเตาเผาไหม้บ่อยครั้งนั้นเกิดจากสิ่งสกปรกเกาะบนชุดท่อทำไอน้ำร้อนยวดยิ่งซึ่งปัญหาเหล่านี้เกิดจากสารประกอบบางส่วนเป็น Potassium (K) Chlorine (Cl) และ Sulfur (S) [2] ที่อยู่ในเถ้าของเชื้อเพลิง เมื่อมีการเผาไหม้สารประกอบเหล่านี้จะอยู่ในรูปของสารระเหยจะก่อให้เกิดปัญหาการเกาะตัวที่ชุดอุปกรณ์ผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่งและสารประกอบของ K บางส่วนในเบตจะหลอมส่งผลให้เกิดเถ้าจับตัวกันเป็นก้อน ซึ่งทำให้เกิดปัญหากับชุดขับเคลื่อนเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ จากปัญหาเหล่านี้ มีงานวิจัยต่างประเทศทำการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นโดยการติดตั้ง air-cooled probe จำลองสภาวะของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งในหม้อไอน้ำเพื่อศึกษาการเกาะตัวที่เกิดขึ้น [2-6] และยังมีงานวิจัยที่ทำการศึกษานวทางการแก้ปัญหาการเกาะตัวที่เกิดขึ้นบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) ที่มีสารประกอบจำพวก Aluminum (Al) และ Silicon(Si) เป็นหลักผสมกับเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อให้ Al และ Si ทำปฏิกิริยากับ K ในเถ้าของเชื้อเพลิงเพื่อลดปัญหาการเกาะตัวดังกล่าว [7-9] ซึ่งเกาลิน(Kaolin) หรือแร่ดินขาว มีสารประกอบหลักเป็น Al และ Si มากกว่า 80% และสามารถหาได้

จากแหล่งภายในประเทศ โดยถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสุกซ์ภัณฑ์และเซรามิค แหล่งดินขาวในประเทศ ได้แก่ ระนอง ลำปาง นราธิวาส และปราจีนบุรี เป็นต้น

ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้นจึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ศึกษาถึงแนวทางการนำเกาลินมาใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับการเผาไหม้ทะเลาปาล์มเปล่าในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นในการแก้ปัญหา fouling และ sintering โดยศึกษาวิธีการใช้เกาลิน 3 แบบหลักๆ คือการผสมล่วงหน้าทั้งหมดกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ การพ่นเข้าไปที่ตำแหน่งเหนือเบดร่วมกับอากาศส่วนที่สอง และแบ่งจ่ายทั้งสองส่วนอย่างละครึ่ง โดยจะศึกษาผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อผลิตไอน้ำร้อนนวดยิ่งจำลองเนื่องการเกิด fouling และผลของการเกิด sintering ของเตาในห้องเผาไหม้

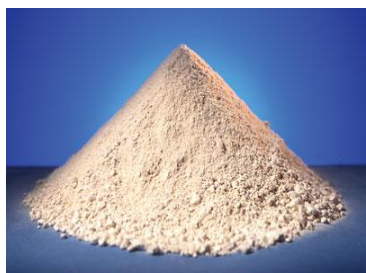
## 2. วัตถุดิบในการทดลองและการทดลอง

### 2.1 วัตถุดิบในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองคือทะเลาปาล์มเปล่า ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบริษัทอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม และนำมาผ่านกระบวนการสับมีความยาวประมาณ 3-5 cm ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีองค์ประกอบธาตุของเชื้อเพลิงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2 ลักษณะของเกาลิน

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของทะเลาปาล์มเปล่า

สมบัติโดยประมาณ (% น้ำหนักแห้ง)	
Volatile matter	65
Fixed carbon	27.9
Ash	7.1
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (% น้ำหนักแห้ง)	
Carbon	40.74
Hydrogen	5.39
Nitrogen	0.32
Sulphur	1.16
Higher heating value (MJ/Kg)	14

ส่วนปริมาณองค์ประกอบแร่ธาตุหลักของทะเลาปาล์มเปล่าดังแสดงตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณองค์ประกอบแร่ธาตุหลักในเถ้าทะเลาปาล์มเปล่า (EFB)

องค์ประกอบในทะเลาปาล์ม	(% น้ำหนักแห้ง)
Potassium (K)	2.52
Calcium (Ca)	0.38
Sodium (Na)	0.004
Sulfur (S)	0.036
Silicon (Si)	0.31
Chlorine (Cl)	0.37

ทั้งนี้ในการทดลองการเผาไหม้ทะเลาปาล์มเปล่าร่วมกับสารเติมแต่งซึ่งจะใช้เกาลินเป็นสารเติมแต่งซึ่งเป็นเกาลินที่หาได้ภายในประเทศดังรูปที่ 2 องค์ประกอบของเกาลินดังแสดงในตารางที่ 3

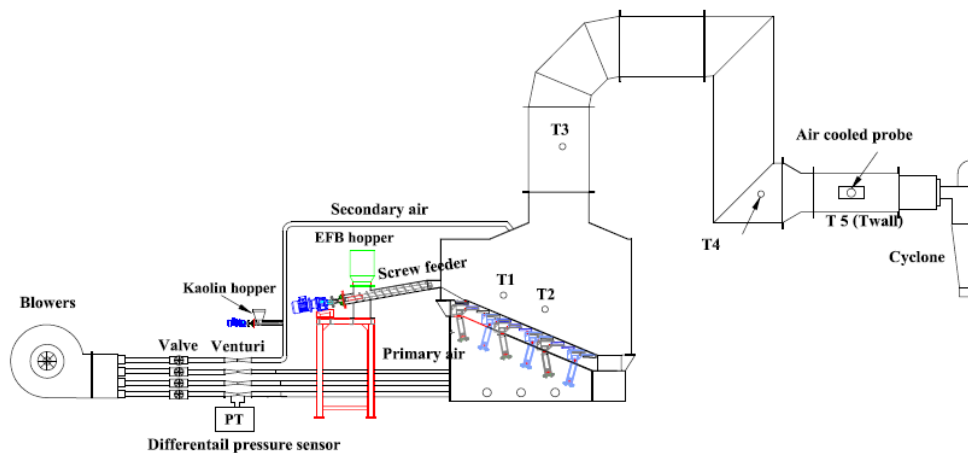
ตารางที่ 3 ปริมาณองค์ประกอบของเกาลิน

องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)
SiO <sub>2</sub>	49.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.30
K <sub>2</sub> O	1.80
TiO <sub>2</sub>	0.52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00
CaO	0.01
MgO	0.35
Na <sub>2</sub> O	0.07

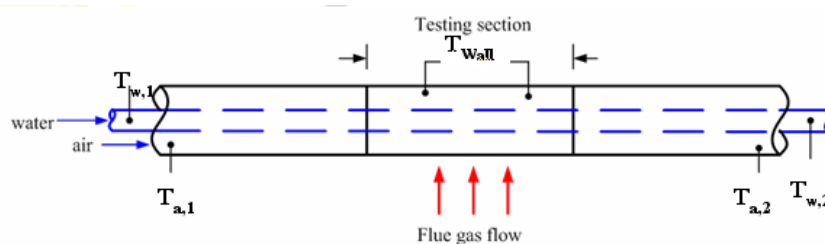
## 2.2 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้น เตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นมีขนาด กว้าง×ยาว×สูง ประมาณ 1.15×2.35×4.40 เมตร โดยมีลักษณะเป็นแบบชั้นบันได ซึ่งมีบันไดจำนวนทั้งหมด 13 ชั้นและมีใบกวาดจำนวน 12 ชุด อยู่ระหว่างชั้นบันไดแต่ละชั้น ซึ่งใบกวาดจะทำหน้าที่กวาดเชื้อเพลิงทะเลาะปาล์มให้ตกไปยังบันไดขั้นถัดไปซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า สำหรับการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาไหม้จะใช้สกรูลำเลียงจำนวน 2 ชุด ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงโดยใช้อินเวอร์เตอร์ การจ่ายอากาศแบ่งอากาศเป็น 2 ส่วน อากาศส่วนที่ 1 (Primary air) เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงบนบันได ซึ่งจะทำการแบ่งเป็น 3 ท่อ เพื่อที่จะให้ลักษณะการกระจายอากาศ เต็มพื้นที่หน้าตัดของบันไดและใบกวาด โดยอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางช่องระหว่างบันไดและใบ

กวาด และอากาศส่วนที่ 2 (Secondary air) เป็นอากาศที่เข้าไปช่วยเผาไหม้สารระเหยที่ออกจากเชื้อเพลิง และเป็นอากาศส่วนที่จ่ายร่วมกับจ่ายเกาลินในส่วนของการทดลองเงื่อนไขการฉีดพ่นเกาลินเหนือเบด ซึ่งจะทำการจ่ายอากาศส่วนที่ 2 เข้าทางหลังคาห้องเผาไหม้ ส่วนซีเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกลำเลียงออกโดยใช้สกรูลำเลียง นอกจากนี้ถ้าลอยที่ติดมากับแก๊สเผาไหม้นั้นจะถูกดักโดยใช้ไซโคลน ในการวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้เวเนจิวรี่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่าง (differential pressure transmitter) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน  $\pm 3\%$  ของย่านการวัด เป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ ส่วนการวัดอุณหภูมิในการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลซึ่งมีความละเอียด  $\pm 1\%$  ซึ่งทำการวัด 5 ตำแหน่ง



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้น



รูปที่ 4 ลักษณะของชุดท่อไอ้มน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง (air & water cooled probe)

ในการศึกษาถึงความสามารถในการรับความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดการเกาะตัวบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheater) ในหม้อไอน้ำเมื่อใช้ทะเลยาปาล์มสดเป็นเชื้อเพลิง โดยการจำลองชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (air & water Cooled probe) ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า probe ซึ่งเป็นลักษณะท่อชั้น 2 ชั้น (dabble pipe) ใช้น้ำและอากาศเป็นตัวกลางในการรับความร้อนดังรูปที่ 4 โดยอากาศจะไหลในท่อชั้นนอก (ขนาด 1 นิ้ว) ส่วนน้ำจะไหลในท่อชั้นในขนาด (16 มิลลิเมตร) ทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิผิวท่อ ( $T_{wall}$ ) ตามต้องการ ( $400-550^{\circ}\text{C}$ ) สำหรับท่อที่ใช้เป็นท่อไอน้ำ Sch40 ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกับท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งในหม้อไอน้ำทั่วไป การทำงานของ probe ที่สร้างขึ้น คือ เมื่อแก๊สไอเสียไหลผ่าน probe ก็จะทำถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศและน้ำที่ไหลอยู่ภายในสำหรับการควบคุมอุณหภูมิผิวท่อ probe จะทำโดยการควบคุมอัตราการไหลของอากาศและน้ำโดยใช้วาล์วและวัดอัตราการไหลด้วยโรตاميเตอร์ (Rotameter) อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถบันทึกการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะทำการวัดอุณหภูมิทางเข้า-ออก ของอากาศและน้ำด้วย PT100 ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการสมดุลพลังงานดังสมการ (1) และ (2) และทำการติดตั้ง โหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ probe อันเนื่องมาจากการเกาะตัวบน probe นำไปคำนวณอัตราการเกาะตัวจากสมการที่ (5)

ขั้นตอนการทดลองปรับปริมาณอากาศส่วนต่างๆ ดังตาราง จากนั้นทำการจุดเตาเผาไหม้ โดยจะเริ่มใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่ออุ่นเตาให้อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ  $800-900^{\circ}\text{C}$  แล้วเริ่มป้อนเชื้อเพลิงทะเลยาปาล์มเปล่าสู่ห้องเผาไหม้ซึ่งทำการปรับอัตราการป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ เมื่อสภาวะการทำงานของเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60 นาที จากนั้นทำการติดตั้ง probe การควบคุมอัตราการไหลอากาศและน้ำโดยใช้วาล์วและวัดอัตราการไหลด้วยโรตاميเตอร์ (Rotameter) แล้วเริ่มวัดค่าต่างๆ

ดังนี้คือ อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆของเตาเผาไหม้และอุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำและอากาศพร้อมทั้งน้ำหนัก probe เพื่อนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการรับความร้อนดังสมการที่ 1

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

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

ความสามารถการรับความร้อนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ %

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

$Q_{th}$  = อัตราการรับความร้อนรวม

$Q_a$  = อัตราการรับความร้อนของอากาศ

$Q_w$  = อัตราการรับความร้อนของน้ำ

$Q_t$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมที่เวลาใดๆ

$Q_{Max}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมสูงสุด

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

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

สมการที่ใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมด้านนอก

$$h_{o,overall} = \frac{Q_{th}}{A_o (T_g - T_{wall})} \quad (\text{W/m}^2\text{-K}) \quad (4)$$

$h_{o,overall}$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมด้านนอก

$A_o$  = พื้นที่การรับความร้อนด้านนอก =  $\pi D_o L$

$T_g$  = อุณหภูมิแก๊สเสียด้านหน้า Probe

$T_{wall}$  = อุณหภูมิเฉลี่ยผิว Probe

$D_o$  = เส้นผ่าศูนย์กลางนอกท่อ

$L$  = ความยาวท่อส่วนปะทะแก๊สเสีย

สมการที่ใช้คำนวณหาอัตราการเกาะของอนุภาค

$$\text{Deposition flux} = \frac{\text{Mass}}{\text{Area} \times \text{Time}} \quad (\text{g/m}^2\text{-h}) \quad (5)$$

$\text{Mass}$  = น้ำหนักของ deposit ที่เพิ่มขึ้น

$\text{Area}$  = พื้นที่ฉายด้านปะทะแก๊สเผาไหม้ (projected area) =  $D_o \times L$

$\text{Time}$  = เวลาที่ใช้ในการทดลอง



ส่วนเงื่อนไขการทดลองจะใช้กาลินเป็นสารเติมแต่งที่ ปริมาณ 7.8 wt% ของมวลแห้ง EFB (EFB<sub>Dry</sub>: kaolin=100 : 7.8) หรือ 5.6 wt.% ของมวลเปียก EFB (ที่ความชื้น 40% มาตรฐานเปียก) ซึ่งเท่ากับปริมาณ กาลินที่เข้าทำปฏิกิริยากับ K ในเตาละลายปาล์ม เปลาในทางทฤษฎี ซึ่งวิธีการจ่ายกาลินมีด้วยกันสอง วิธีคือการผสมล่วงหน้ากับเชื้อเพลิงล่วงหน้าก่อนการ เผาไหม้และการฉีดพ่นเข้าห้องเผาไหม้ที่ตำแหน่ง เหนือเบดร่วมกับอากาศส่วนที่สองโดยจะแบ่งสัดส่วน การจ่ายดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลอง	สัดส่วนการผสมกาลิน ผสมล่วงหน้า : จ่ายเหนือเบด		
	100:0	50:50	0:100
อุณหภูมิเหนือเบด °C	858	850	900
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/h)	26	38.5	33.19
สัดส่วนอากาศส่วนที่ 1 (Primary air) (m <sup>3</sup> /s)	1.23	1.23	1.23
สัดส่วนอากาศส่วนที่ 2 (Secondary air) (m <sup>3</sup> /s)	0.6	0.73	0.73
ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA%)	97.5	40	68

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง

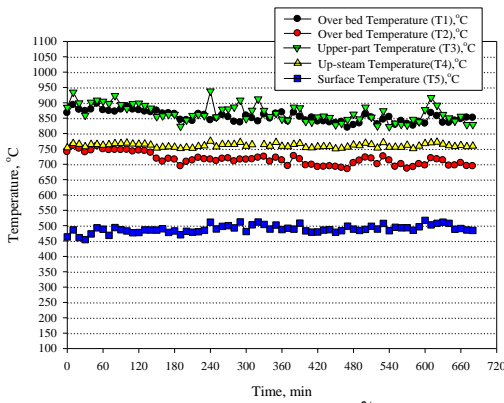
จากการศึกษาผลของวิธีการเติมกาลินในการ เผาไหม้ละลายปาล์มเปลาในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบ ชั้น ซึ่งได้พิจารณาพฤติกรรมของการเผาไหม้ด้วยการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ส่วนผลกระทบ ต่อ ท่อผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พิจารณาจาก ความสามารถในการรับความร้อนและน้ำหนักลักษณะ ทางกายภาพของอนุภาคที่เกาะ air & water Cooled probe ภายใต้เงื่อนไขต่างๆเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ได้ แสดงผลการทดลองดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเตาเผาไหม้

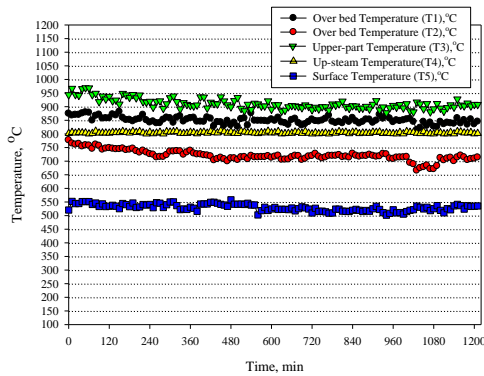
ในการเผาไหม้ละลายปาล์มเปลาพร้อมกับ กาลินในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นนั้น สังเกตได้ว่า ในการเผาไหม้ที่มีการผสมกาลินล่วงหน้าก่อนการเผา ไหม้ ไม่ว่าจะเป็นการผสมล่วงหน้าทั้งหมดหรือผสม

ล่วงหน้าครึ่งเดียว (100:0, 50:50) พบว่าลักษณะการ เผาไหม้ภายในเตาเกิดการปะทุของสะเก็ดไฟส่งผลให้ การกระจายตัวของเชื้อเพลิงดีและอากาศสามารถเข้า ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ทั่วถึง ซึ่งแตกต่างจากการ เผาไหม้ที่มีการจ่ายกาลินทั้งหมดร่วมกับอากาศส่วน ที่สองทั้งหมดลักษณะของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้มี การสานกันเป็นก้อนของเชื้อเพลิงลักษณะคล้ายกับ การเผาไหม้ละลายปาล์มล้วนที่ไม่มีการผสมกาลิน [6] และในเงื่อนไขนี้มีการหลอมของถ้ำบน grate ดังรูปที่ 5(ง) นั้นเกิดจากการจ่ายกาลินทั้งหมดเหนือห้องเผา ไหม้และหลุดลอยไปกับแก๊สเผาไหม้ไม่มีกาลินที่เข้า ทำปฏิกิริยา K ขณะมีการเผาไหม้ในเบด ส่วนการ กระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆภายในห้องเผาไหม้ แสดงในรูปที่ 5 (ก-ค) (ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิแสดง ในรูปที่ 3) สังเกตได้ว่าการเผาไหม้ที่เงื่อนไขผสม กาลินทั้งหมดกับเชื้อเพลิงล่วงหน้าก่อนการเผาไหม้ (100:0) ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้มีค่าปานกลางคือ ประมาณ 100% พบว่าอุณหภูมิที่บริเวณด้านบนห้อง เผาไหม้ (T<sub>3</sub>) ในบางช่วงเวลาก็สูงกว่าอุณหภูมิที่ บริเวณด้านล่างเหนือตะกรับ (T<sub>1</sub>) เล็กน้อยและในบาง ช่วงเวลาก็มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ T<sub>1</sub> เล็กน้อย เช่นกัน ดังรูปที่ 5(ก) กล่าวโดยเฉลี่ยแล้วทั้ง 2 บริเวณ มีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แสดงว่าอาจมีสารระเหย บางส่วนแต่คงไม่มากนักเผาไหม้ต่อที่ด้านบนด้วย อากาศส่วนแต่อุณหภูมิโดยเฉลี่ยแล้วไม่สูงขึ้น เนื่องจาก cooling effect ของอากาศส่วนที่สองที่จ่าย บริเวณด้านบนห้องเผาไหม้ ส่วนการเผาไหม้ที่เงื่อนไข ผสมกาลินพร้อมอากาศส่วนที่สองทั้งสองเงื่อนไข (50:50, 0:100) พบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T3 อุณหภูมิ สูงกว่าอุณหภูมิ T1 เนื่องจากอุณหภูมิในโซนเผาไหม้ มีอุณหภูมิสูง (850-900°C) ประกอบกับใช้ปริมาณ อากาศส่วนเกินไม่มาก (40-68%) ดังนั้น สารระเหยที่ ออกจาก EFB ส่วนหนึ่งขึ้นไปเผาไหม้ที่ด้านบนทำให้ อุณหภูมิ T3 สูงขึ้น และอุณหภูมิเมื่อพิจารณาถึงการ ลดลงของอุณหภูมิแก๊สไอเสียที่ตำแหน่ง T3 ถึง T4 นั้นเกิดจากการสูญเสียความร้อนผ่านผนังปล่องไอเสีย อุณหภูมิ T4 มีค่าอยู่ในช่วง 770-840°C ซึ่งเป็น

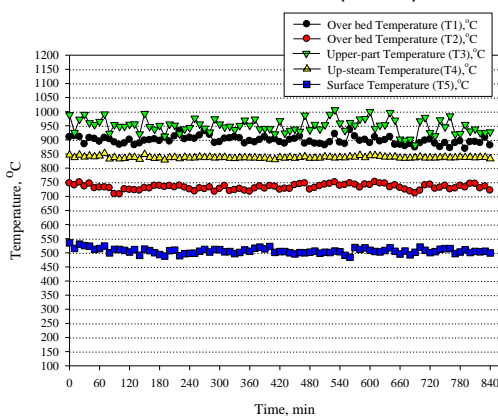
อุณหภูมิแก๊สไอเสียด้านหน้ากับ air & water cooled probe (มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิแก๊สไอเสียด้านหน้า อุปกรณ์ผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรม [2,3] )



(ก) ผสมเกล็ดหินล่องหน้าทั้งหมด (100:0)



(ข) แบ่งผสมเกล็ดหินล่องหน้าและจ่ายเหนือบดอย่างละครึ่ง (50:50)



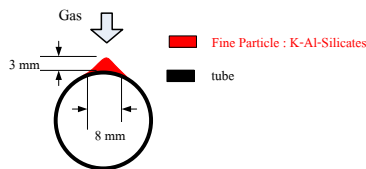
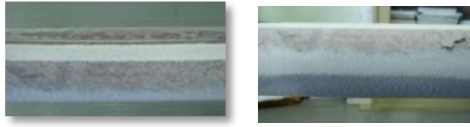
(ค) จ่ายเกล็ดหินทั้งหมดเหนือบด 0:100

(ง) เถ้าที่เกิดการหลอมที่เงื่อนไขจ่ายเกล็ดหินทั้งหมดเหนือบด 0:100 รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิเผาไหม้

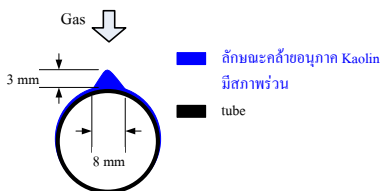
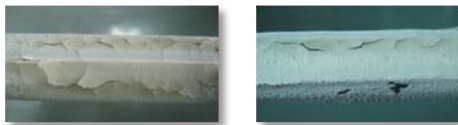
### 3.2 ลักษณะทางกายภาพของ Probe

จากรูปที่ 6(ก-ค) แสดงภาพถ่ายและภาพสเก็ทซ์ของอนุภาคที่เกาะตัวบนผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง (probe) ที่ติดตั้งในห้องเผาไหม้ สังเกตได้ว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นในกรณีผสมเกล็ดหินกับเชื้อเพลิงล่องหน้าทั้งหมด (100:0) จากภาพถ่ายสังเกตเห็นได้ว่าอนุภาคบนผิว probe เกือบทั้งหมดเกิดขึ้นที่บริเวณด้านหน้าส่วนที่ปะทะกับแก๊สเผาไหม้โดยมีลักษณะการเกาะตัวอย่างหลวม ๆ ของอนุภาคซึ่งหลุดร่วงได้ง่ายและมีรูปร่างพื้นฐานเป็นสามเหลี่ยมมีฐานกว้างประมาณ 8 mm สูง 3 mm ดังภาพสเก็ทซ์ในรูปที่ 6(ก) นอกเหนือจากอนุภาคที่เกาะกันที่บริเวณด้านหน้าแล้วในบริเวณอื่นปรากฏเป็นชั้นบางมาก ๆ สีขาว สำหรับ deposit คาดว่าเป็นสารประกอบที่เกิดจาก kaolin สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊ส KCl ที่ถูกปล่อยออกมาจาก EFB ขณะการเผาไหม้และกลายเป็นสารประกอบ K-Al-Silicates ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 1,200°C [8,9] โดยอนุภาค K-Al-Silicates นี้ถูกพามาโดยกระแสของแก๊สเผาไหม้ ส่วนการทดลองที่มีการพ่นเกล็ดหินที่ตำแหน่งเหนือห้องเผาไหม้พร้อมกับอากาศส่วนที่สองพบว่าลักษณะของอนุภาคที่เกาะตัวมีลักษณะคล้ายอนุภาคของ kaolin และมีความร่วนค่อนข้างมาก หลุดร่วงได้ง่ายสังเกตได้จากรูปที่ 6(ค) เป็นภาพถ่ายที่เงื่อนไขการจ่ายเกล็ดหินเหนือห้องเผาไหม้ทั้งหมด (0:100) มีอนุภาคส่วนหนึ่งร่วงหล่น ส่วนภาพสเก็ทซ์ได้จากการสังเกตลักษณะของอนุภาคก่อนที่จะมีการร่วงหล่นความสูงของยอดสามเหลี่ยมประมาณ 10 mm ฐานกว้างประมาณ 10 mm ถ้าคิดเป็นพื้นที่ปกคลุมผิว probe แคประมาณ

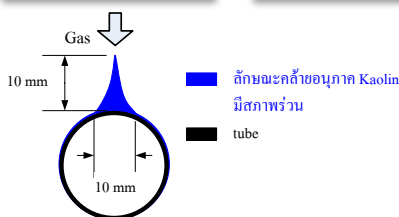
10% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด สำหรับกรณีจ่าย 50% kaolin พร้อมอากาศส่วนที่สอง (50:50) จะมีความแน่นกว่า แต่ก็ยังสามารถขูดออกได้โดยง่าย



(ก) ผสมเกล็ดดินล่องหน้าทั้งหมด (100:0)



(ข) แบ่งผสมเกล็ดดินล่องหน้า 50% และจ่ายเนื้อเบต 50% (50:50)



(ค) ถ้าที่เกิดการหลอมที่เงื่อนไขจ่ายเกล็ดดินทั้งหมดเนื้อเบต 0:100

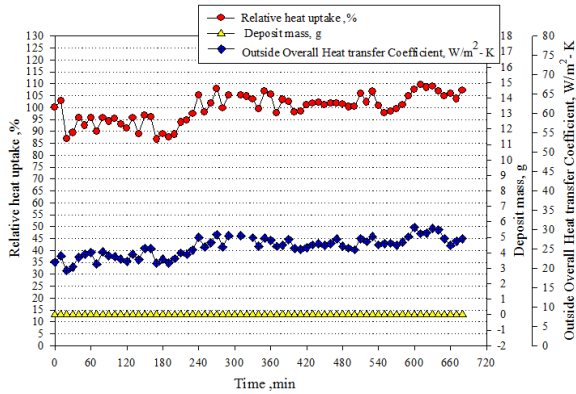
รูปที่ 6 แสดงภาพถ่ายและภาพสะเก็ดของ probe

### 3.3 ความสามารถการรับความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อไอความร้อนยวดยิ่งจำลอง

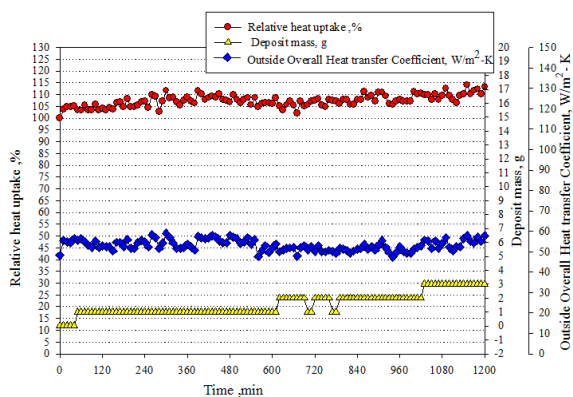
ในการติดตั้งชุดอุปกรณ์ท่อไอความร้อนยวดยิ่งจำลอง เพื่อศึกษาผลกระทบของการเกาะตัวของอนุภาคจากการศึกษาความสามารถในการ

รับความร้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และมวลของอนุภาคที่เกาะแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งคำนวณหาความสามารถในการรับความร้อนจากปริมาณความร้อนรวมจากน้ำและอากาศตั้งสมการที่ 1 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับความสามารถการรับความร้อนสูงสุดตั้งสมการที่ 2 ส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมด้านนอกท่อ (Outside Overall Heat transfer coefficient,  $W/m^2-K$ ) คำนวณจากสมการที่ 4 จากผลการทดลองพบว่าการเผาไหม้ทะเลาะปาล์มโดยมีการผสมเกล็ดดินโดยวิธีการผสมล่องหน้าหรือผสมร่วมกับอากาศส่วนที่สองสังเกตได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมด้านนอกมีค่าคงค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง เมื่อพิจารณาถึงน้ำหนักของอนุภาคบน probe ในเงื่อนไขผสมเกล็ดดินล่องหน้ากับเชื้อเพลิงทั้งหมด (100:0) อนุภาคที่เกาะบนผิว probe มีค่าน้อยกว่า 1 g จึงทำให้สามารถบันทึกน้ำหนักได้ แต่ที่เงื่อนไขที่มีการพ่นเกล็ดดินเหนือห้องเผาไหม้ร่วมกับอากาศส่วนที่สองทั้งสองเงื่อนไข (50:50, 0:100) ดังรูปที่ 7(ข-ค) โดยรวมแล้วมวลของอนุภาคเพิ่มขึ้นตามเวลาและมีบางช่วงเกิดการหล่นของอนุภาคเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของอนุภาคที่เกาะร่วนมากดังแสดงในรูปที่ 6 อย่างไรก็ตามไม่ส่งผลกระทบต่อถ่ายเทความร้อนของ probe เนื่องจากคิดพื้นที่ปกคลุมของอนุภาคบนผิว probe แต่ประมาณ 10% ของพื้นที่ทั้งหมด เมื่อคิดการเพิ่มน้ำหนักของอนุภาค (deposition flux) มีค่าเท่ากับ 4, 32, 54  $g/m^2-h$  ตามลำดับ

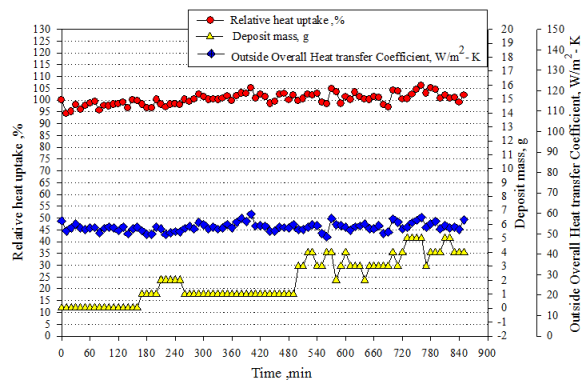




(ก) ผสมเกล็ดลว่งหน้าทั้งหมด (100:0)



(ข) แบ่งผสมเกล็ดลว่งหน้า 50%และจ่าย  
เหนือบด 50% (50:50)



(ค) เถ้าที่เกิดการหลอมที่เงื่อนไขจ่ายเกล็ด  
ทั้งหมดเหนือบด 0:100

รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงความสามารถการถ่ายเท  
ความร้อนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและ  
การเพิ่มขึ้นของอนุภาค

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากผลของวิธีการใช้สารเติมแต่งในการเผาไหม้  
ละลายปาล์มเปลาในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นที่  
ส่งผลกระทบต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อไอน้ำ  
ร้อนยวดยิ่งจำลอง

1. การเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้พบว่าลักษณะการ  
เผาไหม้ภายในเตาเกิดการปะทุของสะเก็ดไฟ นั้น  
ส่งผลให้การกระจายตัวของเชื้อเพลิงดีและอากาศ  
สามารถเข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ทั่วถึงใน  
เงื่อนไขมีการผสมเกล็ดร่วมกับเชื้อเพลิงไปเผาไหม้  
ในเบตควบคุมอุณหภูมิเหนือเบตอยู่ในช่วง  
850-900°C แต่ยังไม่พบการหลอมของเถ้าในเบตในการ  
ทดลองฉีดพ่นเกล็ดทั้งหมดพร้อมอากาศส่วนที่สอง

2. การเกิด fouling บนผิว probe แต่มีจำนวนน้อย  
มากส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านหน้าส่วนที่ปะทะกับ  
แก๊สเผาไหม้โดยมีลักษณะการเกาะตัวอย่างหลวม ๆ  
ของอนุภาคซึ่งหลุดร่วงได้ คาดว่าเป็นอนุภาคของ  
เกล็ด และ อนุภาคที่เป็นสารประกอบ  
K-Al-Silicates ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเกล็ด  
กับโพแทสเซียมขณะเผาไหม้หลุดลอยมากับแก๊สร้อน  
แต่เมื่อคิดพื้นที่ปกคลุมผิวแค่ประมาณ 10% ของพื้นที่  
การรับความร้อนทั้งหมด

3. คัดอัตราการเกาะตัวของอนุภาค(deposition flux)มี  
ค่าเพียง 4, 32, 54 g/m<sup>2</sup>-h ในเงื่อนไข (100:0, 50:50,  
0:100) ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามไม่ส่งผลกระทบต่อ  
การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน  
ของท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย  
(กฟผ.)ที่ให้เงินทุนสนับสนุนวิจัย และบริษัทซุมพร  
อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน)ที่ให้การ  
สนับสนุนละลายปาล์มเปลาที่ใช้เป็นวัสดุในงานวิจัย

**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] 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, Chiang Mai. (In Thai), paper no. AEC015
- [7] Sungworagarn, S., Madhiyanon, T., and Charoensuk, J Impact of Empty Fruit Bunch (EFB) and Empty Fruit Bunch with Kaolin Using as Fuel in a Grate Fired Combustor on Heat Exchange of a Superheater Steam Tube, Proc. of 6 Conference of energy network of Thailand, 2006, 5- July 2010, Phetburi, Thailand, paper no. ENETT6-1218
- [8] 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
- [9] Tran, K-Q., lisa, 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.