

## การศึกษาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบด

### Efficiency Assessment of a Circulating Fluidized Bed Boiler

ธนภฤต ชุมมณเฑียร\* และ ปุริมพัฒน์ สุจำนงค์โตกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

\*ติดต่อ: E-mail: TanakiCh@scg.co.th, โทรศัพท์: (043) 202 845, โทรสาร: (043) 202 849

#### **บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาค่าประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Circulating Fluidized Bed Boiler: CFB Boiler) การประเมินได้ใช้สองวิธีหลักกล่าวคือวิธีการคำนวณแบบ Input-Output Method และวิธีการคำนวณแบบ Heat-Balance Method โดยเลือกใช้หม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่กำลังการผลิตไอน้ำ 130 ตันต่อชั่วโมง ความดัน 66 บาร์เกจและอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ถ่านหินชนิด Sub-Bituminous เป็นเชื้อเพลิง จากการศึกษาพบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้โดยใช้วิธีการคำนวณแบบ Input-Output Method มีค่าเท่ากับร้อยละ 90.98 และเมื่อใช้วิธีการคำนวณแบบ Heat-Balance Method มีค่าเท่ากับร้อยละ 90.73 จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการสูญเสียประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบ CFB เกิดจากสาเหตุหลักสี่ประการ ได้แก่ การสูญเสียความร้อนของ Flue gas จากความชื้นที่เกิดจากการเผาไหม้ไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง จากความชื้นของเชื้อเพลิงและจากปฏิกิริยาในการเติมปูนขาว (Calcination) จากการศึกษาเชิงลึกพบว่าสามารถนำความร้อนของ Flue gas กลับมาใช้ได้ 882 kW และสามารถสร้างความสัมพันธ์ของการเติมปูนขาวต่อสัดส่วนของกำมะถันในเชื้อเพลิงซึ่งช่วยลดการสูญเสียพลังงานและใช้ปริมาณการใช้น้ำปูนขาวเท่าที่จำเป็นได้

**คำหลัก:** ประสิทธิภาพ หม้อไอน้ำ ฟลูอิดไดซ์เบด CFB

#### **Abstract**

This paper reveals a thermal efficiency assessment of a Circulating Fluidized Bed Boiler (CFB Boiler). According to such assessment of CFB Boiler, there are two reliable methods to be used namely, the Input-Output Method and the Heat-Balance Method. The assessments performed on a CFB boiler at the capacity of 130 ton/hr, pressure of 66 bar gage and superheated steam temperature of 480 °C using Sub-Bituminous coal as fuel. When the Input-Output method was employed, the efficiency was found to be 90.98 %. Meanwhile, the Heat-Balance method gave the efficiency of 90.73 %. There were four major factors for thermal losses: 1) Loss due to flue gas 2) Loss due to moisture from Hydrogen during combustion 3) loss due to moisture of the fuel itself and 4) Loss due to Calcination. The present study

performs simulation of heat recovery for the flue gas loss using Number of Transfer Units method and 882 kW could be recovered. Also, the relationship between Limestones feeding versus the sulfur content of the fuel was utilized to determine the optimum limestone feeding to mitigate the energy loss due to Calcination.

**Keywords:** Efficiency, Assessment, CFB Boiler.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันกระบวนการผลิตไฟฟ้าจำเป็นต้องคำนึงถึงการใช้เครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้หม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Circulating Fluidized Bed Boiler; CFB Boiler) เป็นเทคโนโลยีในการผลิตไอน้ำที่มีกระบวนการควบคุมมลภาวะ (SO<sub>x</sub> และ NO<sub>x</sub>) ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ [1-4]

ตลอดเวลา 60 ปีที่ผ่านมาได้มีการสร้างหม้อไอน้ำฟลูอิดไดซ์เบดกว่า 500 เครื่อง ทั่วโลก [5] และมีการผลิตไฟฟ้ากว่า 23,422 MWe สำหรับในประเทศไทยเองนับเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่น่าสนใจ เนื่องจากในจำนวนทั้งหมดของหม้อไอน้ำที่ใช้กันในปัจจุบันถึงเดือนตุลาคม 2551 จำนวนทั้งสิ้น 9,221 เครื่อง [6] ได้เริ่มมีการใช้หม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดในอุตสาหกรรมแล้วกว่า 11 เครื่อง บทความนี้จะได้ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมทั้งปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในการผลิตไอน้ำเพื่อการผลิตไฟฟ้าซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมเครื่องจักรและการวางแผนการผลิตเองอันจะนำไปสู่การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่า

## 2. ส่วนประกอบของ CFB Boiler

หม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดมีส่วนประกอบหลักได้แก่ ห้องเผาไหม้ (Furnace) ระบบป้อนเชื้อเพลิงและวัสดุเบด (Feeding System) ไซโคลน (Cyclones) ระบบการป้อนอากาศ เช่น Primary air, Secondary air และ Fresh air ระบบแลกเปลี่ยนความ

ร้อนที่ Back pass เช่น Super Heater, Economizer และ Air Pre-Heater ระบบการป้อนน้ำเข้า (Feed Water system) ระบบดักจับฝุ่น (Electrostatic Precipitator: EP) และมีระบบการเติมปูนขาว (Limestone feeding system) เข้าไปในห้องเผาไหม้เพื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์เพื่อช่วยควบคุมค่า SO<sub>x</sub> ก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ดังแสดงในรูปที่ 1

## 3. การคำนวณประสิทธิภาพของ CFB Boiler

การคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบด ทำได้ด้วยกัน 2 วิธี [7-10] ดังต่อไปนี้

### 3.1 Input-Output Method

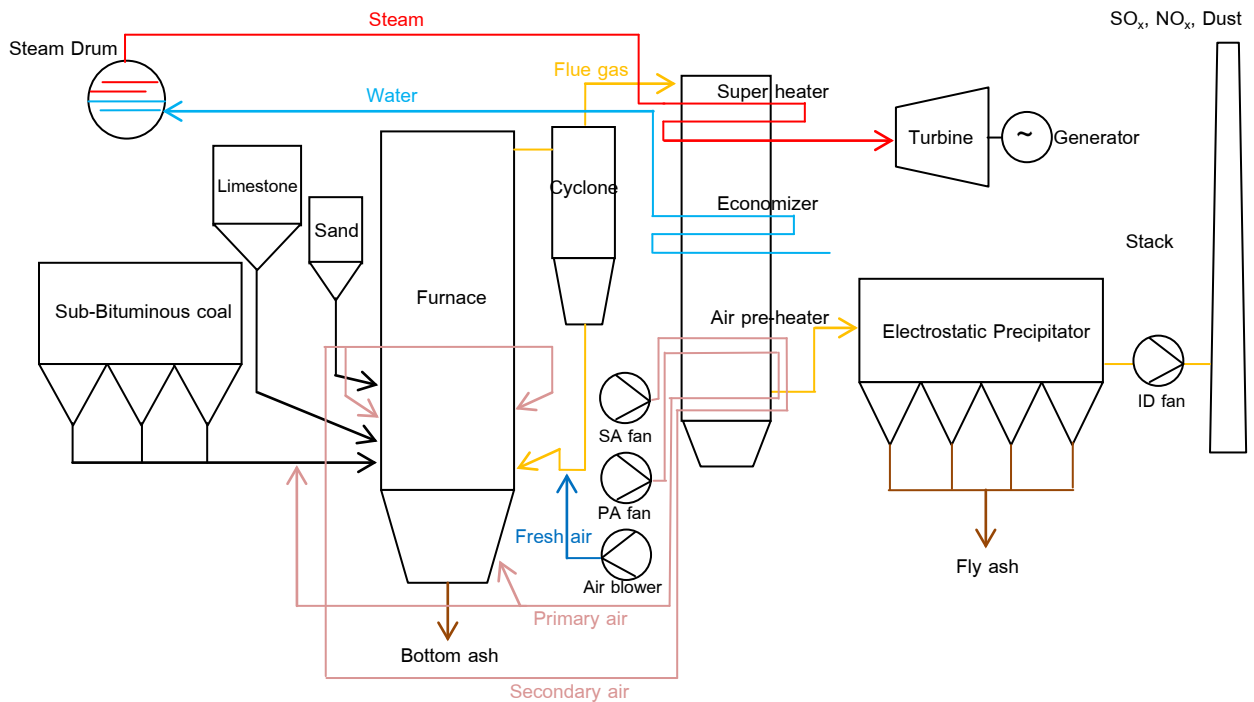
การคำนวณประสิทธิภาพด้วยวิธีนี้มีไว้ใช้เมื่อต้องการตรวจสอบค่าประสิทธิภาพโดยรวมแต่ไม่สามารถทราบรายละเอียดของการสูญเสียซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$\eta_b = 100 \times \frac{Q_o}{Q_i} \quad (1)$$

โดยที่:  $\eta_b$  คือ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ, %  
 $Q_o$  คือ พลังงานขาออก, kJ/s  
 $Q_i$  คือ พลังงานขาเข้า, kJ/s

$$Q_i = \dot{m}_f \times HV \quad (2)$$

โดยที่:  $\dot{m}_f$  คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง, kg/s  
 $HV$  คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง, kJ/kg



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของหม้อไอน้ำแบบ Circulating Fluidized Bed Boiler

$$Q_o = \dot{m}_w \times (H_s - H_w) \quad (3)$$

โดยที่:  $\dot{m}_w$  คือ อัตราการไหลของไอน้ำ, kg/s

$H_s$  คือ ค่าเอนทาลปีของไอน้ำขาออก, kJ/kg

$H_w$  คือ ค่าเอนทาลปีของน้ำป้อน, kJ/kg

$Q_b$  คือ พลังงานที่ได้รับเพิ่มจากเครดิตทั้งหมด, kJ/s

$Q_{il}$  คือ พลังงานสูญเสียทั้งหมด, kJ/s

#### 4. ผลการคำนวณประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 ถึง 5 แสดงถึงข้อมูลการทำงาน of หม้อไอน้ำและข้อมูลของเชื้อเพลิงตลอดจนข้อมูลของปูนขาวและไอเสียหลังจากการเผาไหม้

ตารางที่ 1 ค่าการควบคุมหม้อไอน้ำ

ส่วนประกอบ	หน่วย	ปริมาณ
กำลังผลิตไอน้ำ	Ton/hr	129
ความดันไอน้ำ	Barg	66
อุณหภูมิไอน้ำ	°C	480
ความดันน้ำป้อน	Barg	72
อุณหภูมิน้ำป้อน	°C	129
อุณหภูมิไอเสีย	°C	144
อากาศเกิน (Excess air)	%	3
Unburned คาร์บอน	%	1.7

### 3.2 Heat-Balance Method

การคำนวณประสิทธิภาพด้วยวิธีนี้นิยมใช้เพื่อตรวจสอบหม้อไอน้ำประจำปีและบ่งชี้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพเพื่อทำการแก้ไขและปรับปรุงการควบคุมเครื่องจักรให้ดีขึ้น โดยรายละเอียดวิธีการคำนวณจะมีทั้งการสูญเสีย (Losses) และการได้รับพลังงานเพิ่มหรือเครดิต (Credits) ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta_b = 100 \times \frac{(Q_{ii} + Q_{ib} - Q_{il})}{Q_{ii}} \quad (4)$$

โดยที่:  $Q_{ii}$  คือ พลังงานขาเข้าทั้งหมด, kJ/s

ตารางที่ 1 ค่าการควบคุมหม้อไอน้ำ (ต่อ)

ส่วนประกอบ	หน่วย	ปริมาณ
อัตราการป้อนปูนขาว	kg/s	0.347
อัตราการป้อนถ่านหิน	kg/s	5.45

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์ถ่านหิน

ส่วนประกอบ	หน่วย	ปริมาณ
Proximate analysis		
Moisture	% wt	5.56
Volatiles matter	% wt	40.42
Fixed carbon	% wt	37.09
Ash	% wt	16.93
Ultimate analysis		
Carbon	% wt	50.49
Hydrogen	% wt	4.55
Oxygen	% wt	20.39
Sulfur	% wt	0.96
Nitrogen	% wt	1.12
Total Moisture	%	20.23
Gross calorific value	kcal/kg	5,764

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ปูนขาว (Limestone)

ส่วนประกอบ	หน่วย	ปริมาณ
CaCO <sub>3</sub>	% wt	94.00
MgCO <sub>3</sub>	% wt	0.72
Inert	% wt	5.21
Total Moisture	% wt	0.07

ตารางที่ 4 ผลการตรวจวัดอากาศภายนอก

ส่วนประกอบ	หน่วย	ปริมาณ
อุณหภูมิอากาศภายนอก	°C	34
ความชื้นสัมพัทธ์	%	60

ตารางที่ 5 ผลการตรวจวัดไอเสียที่ปล่อง\*

ส่วนประกอบ	หน่วย	ปริมาณ	มาตรฐาน
SO <sub>x</sub>	ppm	74	< 700
NO <sub>x</sub>	ppm	53	< 400
Dust	mg/m <sup>3</sup>	66	< 320

\*ค่าตรวจวัดที่ออกซิเจนร้อยละ 7

ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้วิธีการคำนวณแบบ Input-Output Method มีค่าเท่ากับร้อยละ 90.98 และเมื่อใช้วิธีการคำนวณแบบ Heat-Balance Method มีค่าเท่ากับร้อยละ 90.73 โดยการคำนวณแบบที่สองนี้ยังสามารถทราบในรายละเอียดของการสูญเสียต่างๆดังแสดงในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 โดยรายละเอียดของการคำนวณถูกแสดงไว้โดย Sujumnongtokul, P. and Chummontean, T. [11]

ตารางที่ 6 การสูญเสียของการผลิตไอน้ำ

ส่วนประกอบ	หน่วย	ปริมาณ
สูญเสียจาก Flue Gas	%	3.455
สูญเสียจากความชื้นที่เกิดจากการเผาไหม้ไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง	%	4.354
สูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิง	%	2.166
สูญเสียจากคาร์บอนมอนนอกไซด์ใน Flue Gas	%	1.000
สูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนที่บริเวณผิวของหม้อไอน้ำ	%	0.160
สูญเสียจากปฏิกิริยาจากการเติมปูนขาว (Calcination)	%	0.456
สูญเสียจาก Unburned Carbon	%	0.007
สูญเสียจากความชื้นในอากาศ	%	0.005

ตารางที่ 7 เกรดดีของการผลิตไอน้ำ

ส่วนประกอบ	หน่วย	ปริมาณ
เกรดดีจากปฏิกิริยา Sulfation	%	0.561
เกรดดีจากอากาศแห้งขาเข้า	%	0.257
เกรดดีจากกำลังไฟฟ้าที่ให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า	%	1.502
เกรดดีจากความชื้นในอากาศขาเข้า	%	0.009
เกรดดีจากความร้อนของ Sorbent	%	0.003

## 5. แนวทางการลดการสูญเสีย

การศึกษาพบว่าปัจจัยการสูญเสีย

ประสิทธิภาพหลักของหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบด คือ 1) การสูญเสียความร้อนไปกับ Flue Gas 2) สูญเสียจากความชื้นที่เกิดจากเผาไหม้ไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง 3) สูญเสียจากปฏิกิริยาจากการเติมปูนขาว และ 4) สูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิงซึ่งรวมทั้งสิ้นประมาณร้อยละ 9 ของพลังงานทั้งหมด หากคิดเป็นพลังงานที่ต้องสูญเสียไปทั้งสิ้นกว่า 183,000 GJ ต่อปี ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียพลังงานจึงได้ทำการวิเคราะห์เชิงลึกและหาแนวทางปฏิบัติดังนี้

### 5.1 การลดการสูญเสียจาก Flue Gas

โดยปกติแล้ว Flue Gas ที่ออกจากหม้อไอน้ำมีอุณหภูมิ 144 °C หากนำความร้อนกลับมาใช้บางส่วนจะทำให้เกิดประโยชน์ทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพและการลดภาวะโลกร้อนด้วย และในส่วนนี้ได้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [12] ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

$$C_c = c_{pc} \dot{m}_c \quad (5)$$

$$C_h = c_{ph} \dot{m}_h \quad (6)$$

โดยที่:  $C_c$  คือ ความจุความร้อนของของไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่า, W/°C

$C_h$  คือ ความจุความร้อนของของไหลที่อุณหภูมิสูงกว่า, W/°C

$c_{pc}$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของ  $C_c$ , J/(kg·°C)

$c_{ph}$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของ  $C_h$ , J/(kg·°C)

$\dot{m}_c$  คือ อัตราการไหลของของไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่า, kg/s

$\dot{m}_h$  คือ อัตราการไหลของของไหลที่อุณหภูมิสูงกว่า, kg/s

$$NTU = \frac{AU}{C_{\min}} \quad (7)$$

$$A = \pi DL \quad (8)$$

โดยที่:  $NTU$  คือ Number of heat transfer unit

$A$  คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, m<sup>2</sup>

$D$  คือ ความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน, m

$L$  คือ ความยาวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน, m

$U$  คือ Overall heat transfer coefficient, W/(m<sup>2</sup>·°C)

$C_{\min}$ ,  $C_{\max}$  คือ ค่าที่น้อยกว่าและมากกว่าระหว่าง

$C_h$  และ  $C_c$  ตามลำดับ

$$\varepsilon = \frac{T_{h,in} - T_{h,out}}{T_{h,in} - T_{c,in}} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{C_c (T_{c,out} - T_{c,in})}{C_h (T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (10)$$

โดยที่:  $\varepsilon$  คือ Effectiveness, %

$T_{h,in}$  คือ อุณหภูมิขาเข้าของของไหลที่อุณหภูมิสูงกว่า, °C

$T_{c,in}$  คือ อุณหภูมิขาเข้าของของไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่า, °C

$T_{h,out}$  คือ อุณหภูมิขาออกของของไหลที่อุณหภูมิสูงกว่า, °C

$T_{c,out}$  คือ อุณหภูมิขาออกของของไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่า, °C

$$Q = mc_p \Delta T \quad (11)$$

โดยที่:  $Q$  คือ พลังงานการถ่ายเทความร้อน, kJ/s  
 $\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิขาเข้า-ขาออก  
 ของของไหล, °C

เมื่อคิดการสูญเสียพลังงานในกรณีของไอเสีย  
 กว่า 60,664 GJ ต่อปี ดังนั้นถ้านำไอเสียอุณหภูมิ  
 144 °C จากระบบการเผาไหม้มาอุ่นน้ำก่อนนำไปเข้า  
 ระบบของหม้อไอน้ำ โดยที่น้ำที่นำเข้ามาอุณหภูมิ  
 60 °C เมื่อนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Indirect  
 heated ด้วยอัตราการไหลของไอเสีย 29.75 kg/s และ  
 อัตราการไหลของน้ำป้อน (ร้อยละ 10 ของน้ำป้อน  
 ทั้งหมด) 3.38 kg/s โดยที่กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆมี  
 รายละเอียดดังนี้

$U$  เท่ากับ 250 W/(m<sup>2</sup>·°C)

$c_{pc}$  (น้ำ) เท่ากับ 4,184 J/(kg·°C)

$c_{ph}$  (ไอเสีย) เท่ากับ 1,009 J/(kg·°C)

$A$  เท่ากับ 25.12 m<sup>2</sup>

จากสมการที่ (5) และ (6) จะได้ว่า

$$C_c = 4,184 \times 3.38 = 14,141.92 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$C_h = 1,009 \times 29.75 = 30,017.75 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{14,141.92}{30,017.75} = 0.47$$

และจากสมการที่ (7) จะได้ว่า

$$NTU = \frac{25.12 \times 250}{14,141.92} = 0.44$$

จากวิธี Effectiveness for a cross-flow heat  
 exchange [12] จะได้อ่า  $\varepsilon$  เท่ากับร้อยละ 35 หรือ  
 0.35 และจากสมการ (9) จะได้ว่า

$$\varepsilon = \frac{144 - T_{h,out}}{144 - 60}, T_{h,out} = 144 - 0.35(144 - 60)$$

$$T_{h,out} = 114.60 \text{ }^\circ\text{C}$$

จากสมการ (10) จะได้ว่า

$$\varepsilon = \frac{14,141.92(T_{c,out} - 60)}{30,017.75(144 - 60)}$$

$$T_{c,out} = \frac{0.35[30,017.75(144 - 60)]}{14,141.92} + 60$$

$$T_{c,out} = 122.40 \text{ }^\circ\text{C}$$

เมื่อคำนวณพลังงานการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำ  
 และไอเสีย จากสมการ (11) จะได้ว่า

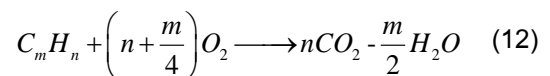
$$Q = 29.75 \times 1,009 \times (144 - 114.6) = 882,521.85 \text{ J/s}$$

$$Q = 882.52 \text{ kW}$$

ซึ่งสามารถนำความร้อนทั้งหมดกลับมาใช้ประโยชน์ได้  
 882.52 kW หรือประมาณ 27,000 GJ ต่อปี

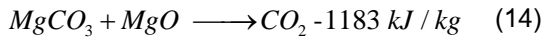
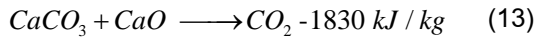
## 5.2 การลดการสูญเสียจากความชื้นที่เกิดจากเผา ไหม้ไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

จากการสูญเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีในการ  
 เผาไหม้ดังแสดงในสมการ (12)



จากการสันดาปดังในสมการที่ (12) มีการเกิดน้ำขึ้นซึ่ง  
 จะมีปริมาณเท่าใดขึ้นอยู่กับร้อยละของไฮโดรเจนใน  
 เชื้อเพลิงแต่ปกติแล้วร้อยละของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง  
 จะมีอยู่ประมาณร้อยละ 4-6 ซึ่งเชื้อเพลิงที่หม้อไอน้ำนี้  
 ใช้มีไฮโดรเจนร้อยละ 4.55 ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่ง  
 วิธีหนึ่งที่จะสามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นได้คือการ  
 ปรับค่าอากาศส่วนเกินในห้องเผาไหม้ซึ่งค่าที่  
 เหมาะสมจากการเดินเครื่องที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินชนิด  
 นี้ควรให้การเผาไหม้มีค่าอากาศเกินประมาณร้อยละ 3

### 5.3 การลดการสูญเสียจากปฏิกิริยาจากการเติมปูนขาว



จากสมการที่ (13) และ (14) จะเห็นได้ว่าเมื่อปูนขาวถูกเติมเข้าไปในห้องเผาไหม้แล้วจะแตกตัวได้เป็น CaO และ MgO นั้นจำเป็นต้องใช้พลังงานเพื่อช่วยในการแตกตัว ดังนั้นจึงควรพิจารณาการเติมปูนขาวตามสัดส่วนที่เหมาะสมตามร้อยละของกำมะถันในเชื้อเพลิง [9] ดังนี้

$$L_q = \frac{100S}{32X_{CaCO_3}} \times \left( R - \frac{32X_{CaO}}{56S} \right) \quad (15)$$

โดยที่:  $L_q$  คือ ปริมาณปูนขาวที่ต้องการ, kg/kg fuel  
 $S$  คือ ร้อยละของซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิง, % wt  
 $R$  คือ อัตราส่วนของแคลเซียมและซัลเฟอร์  
 $X_{CaCO_3}$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ  $CaCO_3$  ในปูนขาว, % wt  
 $X_{CaO}$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ CaO ในเชื้อเพลิง, % wt

จากสมการที่ (15) เมื่อประยุกต์ใช้พารามิเตอร์จากในตารางที่ 2 และ 3

จะได้ว่า

$S$  เท่ากับ 0.0096

$R$  เท่ากับ 2.50 (ตาม Guarantee เครื่องจักร)

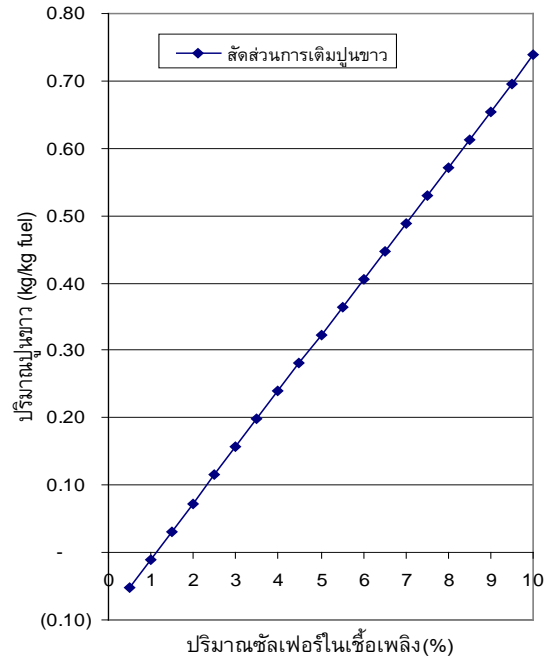
$X_{CaCO_3}$  เท่ากับ 0.94

$X_{CaO}$  เท่ากับ 0.049

จะได้ว่า

$$L_q = \frac{100 \times 0.0096}{32 \times 0.94} \times \left( 2.5 - \frac{32 \times 0.049}{56 \times 0.0096} \right)$$

$$L_q = -0.013 \text{ kg/kg fuel}$$



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ปูนขาวต่อกำมะถันในเชื้อเพลิง

แสดงว่าที่ใช้เชื้อเพลิงที่มีค่ากำมะถันร้อยละ 0.96 นั้นไม่จำเป็นต้องเติมปูนขาวเพื่อกักจับก๊าซซัลเฟอร์ก็สามารถปล่อยสู่บรรยากาศได้ ทั้งยังช่วยลดการสูญเสียพลังงานจากปฏิกิริยาจากการเติมปูนขาว จากการคำนวณเชื้อเพลิงที่สามารถใช้โดยไม่ต้องเติมปูนขาวในการเผาไหม้นั้นสามารถมีส่วนประกอบของกำมะถันได้มากถึงร้อยละ 1 ซึ่งถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2 ทั้งนี้ควรพิจารณาสัดส่วนโดยน้ำหนักของ  $CaCO_3$  ในปูนขาวตามการคำนวณข้างต้น ขณะเดียวกันในการทำงานสามารถใช้เครื่องวัดคุณภาพอากาศ (Continuous Emissions Monitoring System: CEMS) เป็นตัวช่วยในการปรับตั้งค่าและควบคุมการเติมปูนขาวที่จะเข้าไปในระบบได้เช่นเดียวกัน

### 5.4 การลดการสูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง

จากการวิเคราะห์พบว่าความชื้นของเชื้อเพลิงมาจากขั้นตอนการลำเลียงจากแหล่งมาถึงโรงงานดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนั้นหากต้องการลดการสูญเสียในส่วนนี้ต้องจัดหามาตรการป้องกันการเพิ่มความชื้นจากการขนส่งโดยการคลุมผ้าใบให้กับรถขนส่งทุกคัน

และตรวจสอบความเรียบร้อยของผ้าใบเสมอซึ่ง  
 เบื้องต้นหากลดความชื้นได้จากร้อยละ 20.23 เหลือ  
 ร้อยละ 15.23 จะสามารถลดการสูญเสียพลังงานไปได้  
 ประมาณ 9,400 GJ ต่อปี



รูปที่ 3 การขนส่งเชื้อเพลิงจากแหล่งสูโรงงาน

### 6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ  
 แบบฟลูอิดไดซ์เบดพบว่ามีการสูญเสียส่วนใหญ่อัน  
 ได้แก่ 1) สูญเสียจาก Flue Gas 2) สูญเสียจาก  
 ความชื้นที่เกิดจากเผาไหม้ไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง 3)  
 สูญเสียจากปฏิกิริยาจากการเติมปูนขาวและ 4)  
 สูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิงเองซึ่งหากต้องการ  
 เพิ่มประสิทธิภาพควรมีการควบคุมดังนี้ 1) ควบคุม  
 ระบบลมที่ใช้ในการเผาไหม้ไม่ให้มากเกินไปอันจะ  
 ทำให้ช่วยลดการสูญเสียความร้อนไปกับ Flue Gas  
 ได้ 2) ควบคุมการเติมปูนขาวให้มีความเหมาะสมกับ  
 เชื้อเพลิงที่ใช้ 3) วางแผนการจัดซื้อถ่านหินที่มีร้อยละ  
 ของไฮโดรเจนที่ต่ำและ 4) ควบคุมความชื้นของ  
 เชื้อเพลิงให้ต่ำลง

### 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ  
 วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เป็นแหล่ง  
 ให้การสนับสนุนแนวทางการทำวิจัยและขอขอบคุณ  
 คุณนิพนธ์ ยิ้มวัน ผู้จัดการส่วนพลังงาน บริษัทฟิสิกซ์  
 พัลพ แอนด์ เพเพอร์ จำกัด (มหาชน) ที่ได้ช่วยเหลือ

และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ตลอด  
 การศึกษาครั้งนี้

### 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kavidass, S., Anderson, G.L. and Norton, G.S. Jr. (2000). Why Build a Circulating Fluidized Bed Boiler to Generate Steam and Electric Power, *POWER-GEN Asia*, September 20-22.
- [2] Simon N. Oka. (2002). *Development of fluidized bed combustion boiler: Fluidized Bed Combustion*, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [3] Kavidass, S., Walker, D.J. and Norton, G.S. Jr. (1999). IR-CFB Repowering: A Cost-Effective Option for Older PC-Fired Boilers, *POWER-GEN International*, November 30 - December 2.
- [4] Meng-Yuan Tsai, Keng-Tung Wu, Chin-Cheng Huang and Hom-Ti Lee. (2002). Co-firing of paper mill sludge and coal in an industrial circulating fluidized bed boiler, *Waste Management*, 22, pp. 439-442.
- [5] Joris Koornneef, Martin Junginger and Andre Faaji. (2007). Development of fluidized bed combustion - An overview of trends, performance and cost, *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, pp. 19-55.
- [6] ดร.วิจารย์ สิมาฉายา (255 2). การส่งเสริมหม้อไอน้ำให้ปลอดภัย ประหยัดและไร้มลภาวะจากภาครัฐ , *Boiler & Pressure Vessel*, อิมแพคอารีน่า เมืองทองธานี กรุงเทพมหานคร
- [7] Basu, P. (1999). Combustion of coal in circulating Fluidized-bed boilers, *Chemical Engineering Science*, 54, pp. 5547-5557.
- [8] American Society of Mechanical Engineers, ASME PTC 4-1998. (2000). *Fired steam generators: performance test codes*. American Society of Mechanical Engineers. New York.



- [9] Basu, P. (1946). *Bubbling Fluidized Bed Boiler: Combustion and gasification in fluidized beds*, Taylor & Francis Group, New York
- [10] Tyler G. Hicks. (1987). *Combustion: Power generation calculations reference guide*. McGraw-Hill, USA.
- [11] Sujumnongtokul, P. and Chummontean, T. (2009). Efficiency Investigation for a Coal-Fired Circulating Fluidized Bed Boiler of Power Generation Plant, paper presented in *ITC-CSCC2009, Special session, Energy System and Technology*, Korea.
- [12] Necati Ozisik, M. (1985). *Heat Exchangers: Heat transfer*. McGraw-Hill, USA.