

การวิเคราะห์พลังงานของหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดใช้ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง

ENERGY ANALYSES OF LIGNITE-FIRED FLUIDIZED-BED BOILER

มานะ อมรภิขันธ์ และ ปรีชา ชูไพบูลย์
 Mana Amornkitbamrung and Preecha Choopaiboon

คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 แขวงบางมด เขตราชบุรีรณะ กรุงเทพฯ 10140

School of Energy and Materials
King Mongkut's Institute of Technology Thonburi
Bangmod, Ratburana, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

งานนี้เป็นการประเมินสมรรถนะระบบหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงและมีอัตราการผลิตไอน้ำ 3 ตันต่อชั่วโมง หม้อไอน้ำนี้ได้รับการออกแบบที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และผลิตในประเทศ ผลการตรวจสอบการใช้พลังงาน และวิเคราะห์ตามกฎข้อที่ 1 และ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1 และ 2 มีค่าระหว่าง 73.5-75.4% และ 23.2-23.8% ตามลำดับ แล้วนำผลการวิเคราะห์ไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายประสิทธิภาพที่ภาระงานต่างๆ เมื่อนำหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ออกแบบมาเปรียบเทียบกับหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่นำเข้ามาจากประเทศจีน พบว่าหม้อไอน้ำที่ออกแบบโดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1 สูงกว่าหม้อไอน้ำที่ผลิตโดยประเทศจีนประมาณ 3% ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่ออกแบบโดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีอยู่ในเกณฑ์ดีพอสมควรและมีสมรรถนะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดทั่วไป

คำสำคัญ : การเผาไหม้ / ลิกไนต์ / หม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบด / การวิเคราะห์พลังงาน / การสร้างแบบจำลอง / การเปรียบเทียบหม้อไอน้ำ

ABSTRACT

The objective of this study was to conduct the energy analysis of a lignite-fired fluidized-bed boiler with the capacity of 3 ton/hr of steam production. The boiler was designed at KMITT and fabricated in Thailand. Energy analyses based on the first and second laws of thermodynamics show that the boiler efficiencies based on the first law and second law were 73.5-75.4% and 23.2-23.8%, respectively. Mathematical modeling was also carried out to predict the boiler's performance under various loads. The first law efficiency of the prototype fluidized-bed boiler was about 3% higher than that of a commercial boiler imported from China. It may be concluded that the Thai designed boiler had a good efficiency and an acceptable performance standard typical of the conventional fluidized-bed boilers.

Keywords: combustion / lignite / fluidized-bed boiler / energy analysis / simulation / boiler comparison

1. บทนำ

เนื่องจากถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญมาก โดยหลายประเทศได้ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมัน และแก๊สด้วยเหตุผลที่ว่า ถ่านหินมีปริมาณสำรองมากที่สุดซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างน้อยอีก 250 ปี และเพื่อให้การใช้ถ่านหินมีสถานภาพที่เป็นคู่แข่งของน้ำมันมากขึ้นทั้งในด้านราคา ประสิทธิภาพและปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการพัฒนาระบบหรือเทคนิคใหม่ในการเผาไหม้ถ่านหินอยู่เรื่อยๆ ระบบใหม่อันหนึ่งที่ได้รับความสนใจมากก็คือ ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด เนื่องจากระบบการเผาไหม้แบบนี้ให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงและสามารถควบคุมมลพิษที่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ง่าย จึงมีการวิจัย พัฒนา และสาธิตการใช้ระบบดังกล่าวกับงานในลักษณะต่างๆ กันอย่างมากมาย จนกระทั่งปัจจุบันหม้อไอน้ำที่ใช้ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดได้รับการออกแบบและติดตั้งใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย ในประเทศไทยได้มีการใช้เตาเผาแบบนี้บ้างแล้วในโรงงานอุตสาหกรรมโดยนำเข้าจากต่างประเทศ ส่วนในงานวิจัยของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (สจ.ธ.) ได้ออกแบบเตาเผาแบบ

ฟลูอิดไดซ์เบดขนาดเล็กที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 3 ตันต่อชั่วโมง โดยใช้ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง แต่เนื่องจากถ่านหินลิกไนต์ของประเทศไทยมีกำมะถันค่อนข้างสูง (ประมาณ 2%) จึงควรมีการพัฒนาเทคโนโลยีการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากเตาเผาแบบนี้ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เทียบ เอื้อกิจ [1] ได้ศึกษาและวิเคราะห์พลังงานและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของระบบผลิตร่วมในโรงงานย้อมผ้าแห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรสาคร โรงงานแห่งนี้ใช้หม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดซึ่งผลิตโดยประเทศจีนขนาด 10 ตันต่อชั่วโมงที่ 25 bar, 300 °C ใช้ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์ปรากฏว่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1 และ 2 โดยเฉลี่ยเท่ากับ 71.5% และ 21.2% ตามลำดับ ซึ่งนับว่ายังอยู่ในเกณฑ์พอสมควร นอกจากนี้ยังพบว่าในการควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำได้มีการป้อนเข้าเกินกว่าพิสัยการออกแบบโดยเฉลี่ย 11.5% ทำให้ประสิทธิภาพลดลงเมื่อมีการป้อนเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์แบบจำลองของหม้อไอน้ำสำหรับทำนายประสิทธิภาพที่ภาระทำงานต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพ

ของหม้อไอน้ำจะสูงขึ้นถ้าหากลดปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้หรืออัตราส่วน A/F ให้อยู่ในช่วง 4-6 เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับทฤษฎี แต่ก็ยังมีขีดจำกัดด้วยเหตุผลทางด้านเทคนิค การเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดซึ่งต้องการอากาศประมาณ 2 เท่าของอากาศทางทฤษฎี

อาษา ประทีปเสน [2] ได้ศึกษาและวิเคราะห์ระบบการผลิตร่วมในโรงงานกระดาษ ซึ่งโรงงานแห่งนี้ใช้หม้อไอน้ำแบบ stoker ขนาด 34.5 ตันต่อชั่วโมง ที่ 63 bar, 474 °C ใช้ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์ปรากฏว่า ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1 มีค่าอยู่ระหว่าง 74.2-75.9% และ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 2 มีค่าอยู่ระหว่าง 28.7-30.0% จากการทดลองอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์คือที่อัตรา 5-6 เท่า จากการสร้างแบบจำลองของหม้อไอน้ำอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 10.0-11.5 เท่า และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ลิกไนต์แทบจะไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

งานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์พลังงานของหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงและหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำสูงสุด ระบบหม้อไอน้ำที่ใช้ดำเนินการทดสอบเป็นหม้อไอน้ำดันแบบ ซึ่งออกแบบโดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีร่วมกับประเทศออสเตรเลีย ติดตั้งอยู่ที่โรงงานหลวงอาหารสำเร็จรูป อ.แม่จัน จ.เชียงราย เป็นหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดขนาดเล็กกำลังผลิตไอน้ำ 3 ตันต่อชั่วโมง ความดัน 10 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 การทดสอบนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนลิกไนต์ 4 ค่าคือ 366, 438, 486 และ 534 kg/hr ตามลำดับ

2. การวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์ยีของระบบหม้อไอน้ำ

การวิเคราะห์พลังงานของเอกเซอร์ยีของระบบหม้อไอน้ำนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสภาพการทำงานของระบบ โดยวิเคราะห์การใช้พลังงานและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ และการวิเคราะห์เอกเซอร์ยีและประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อแสดงคุณภาพของพลังงานที่นำมาใช้ประโยชน์ในรูปเทียบเท่ากับงานและค่าการย้อนกลับไม่ได้ของกระบวนการ

2.1 การวิเคราะห์พลังงานของหม้อไอน้ำ

การวิเคราะห์พลังงานของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นระบบปริมาตรควบคุม สมการดุลพลังงานอยู่ในรูป

$$m_L \cdot HHV + W_c - Q_s = m_s(h_s - h_w) + \text{energy losses} \quad (1)$$

โดยที่

m_L = อัตราการป้อนลิกไนต์, kg/min

HHV = ค่าความร้อนสูงของลิกไนต์, kJ/kg

W_c = งานไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ, kJ/min

Q_s = อัตราการสูญเสียความร้อนจากผิวหม้อไอน้ำ, kJ/min

m_s = อัตราการไหลของไอน้ำอิ่มตัว, kg/min

h_s = เอนทัลปีของไอน้ำอิ่มตัว, kJ/kg

h_w = เอนทัลปีของน้ำป้อน, kJ/kg

energy losses = ผลรวมของพลังงานสูญเสียอื่น ๆ นอกเหนือจาก Q_s , kJ/min

สำหรับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ คำนวณจาก ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์}}{\text{พลังงานที่ใส่ให้ระบบ}} \\ &= \frac{m_s(h_s - h_w) \times 100}{m_L \cdot HHV + W_c} \quad (2) \end{aligned}$$

2.2 การวิเคราะห์เอนทัลปีของหม้อไอน้ำ

การวิเคราะห์เอนทัลปี เป็นการนำกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์มาประยุกต์กับระบบพลังงานการวิเคราะห์ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์นั้น พิจารณาแต่ปริมาณของพลังงานเท่านั้น แต่ไม่ได้พิจารณาถึงคุณภาพที่อาจจะแตกต่างกัน เช่น ความร้อนและงาน เป็นต้น การวิเคราะห์เอนทัลปีเป็นการวิเคราะห์ที่ให้ความสำคัญกับคุณภาพของพลังงานที่ใช้ประโยชน์และที่ถูกทำลายเนื่องจากการย้อนกลับไม่ได้ ดังนั้นจึงเป็นแนวทางสำคัญในการศึกษาการประหยัดพลังงานให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการวิเคราะห์เอนทัลปีของหม้อไอน้ำ สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์พลังงานคือ

1. ความร้อนจำเพาะของน้ำไอน้ำมีค่าเท่ากับ $0.87 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

2. เงื่อนไขของสิ่งแวดล้อมคงที่ทุกครั้งของการทดสอบและถูกกำหนดไว้ดังนี้

- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

$$T_0 = 30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$$

- ความดันบรรยากาศ $P_0 = 100 \text{ kPa}$

- ความดันไออิ่มตัวของน้ำ $P_g(T_0) = 4.3 \text{ kPa}$

ค่าเศษส่วนโมลของแก๊สต่างๆ ในสภาพแวดล้อมคือ

- เศษส่วนโมลของ $\text{N}_2 = 0.756$

- เศษส่วนโมลของ $\text{O}_2 = 0.203$

- เศษส่วนโมลของ $\text{H}_2\text{O} = 0.031$

- เศษส่วนโมลของ $\text{CO}_2 = 0.0003$

- เศษส่วนโมลของแก๊สอื่นๆ $= 0.0097$

การวิเคราะห์เอนทัลปีของหม้อไอน้ำจะใช้รายละเอียดดังนี้คือ

1. ดุลเอนทัลปีของหม้อไอน้ำ

1.1 เอนทัลปีของแก๊สไอเสีย

$$A_f = m_L \times m_f \times a_f \quad (3)$$

โดยที่

A_f = เอนทัลปีของแก๊สไอเสีย, kJ/min

m_L = อัตราการป้อนลิเกไนต์, kg/min

m_f = กิโลกรัมโมลของแก๊สไอเสียต่อเชื้อเพลิง
100 กิโลกรัม, $\text{kgmole}/100 \text{ kg fuel}$

a_f = เอนทัลปีจำเพาะของแก๊สไอเสีย,
 kJ/kgmole

หาค่า $a_{f, \text{flue gas}}$ ได้จาก

$$\begin{aligned} a_f = & x_{\text{N}_2} [(h-h_0) - T_0(s-s_0) + RT_0 \ln(x_{\text{N}_2}/\dot{x}_{\text{N}_2})] \\ & + x_{\text{O}_2} [(h-h_0) - T_0(s-s_0) + RT_0 \ln(x_{\text{O}_2}/\dot{x}_{\text{O}_2})] \\ & + x_{\text{CO}_2} [(h-h_0) - T_0(s-s_0) + RT_0 \ln(x_{\text{CO}_2}/\dot{x}_{\text{CO}_2})] \\ & + x_{\text{H}_2\text{O}} [(h-h_0) - T_0(s-s_0) + RT_0 \ln \\ & (x_{\text{H}_2\text{O}}/\dot{x}_{\text{H}_2\text{O}})] \\ & + x_{\text{SO}_2} [C_{p, \text{SO}_2} (T_f - T_0) - T_0 C_{p, \text{SO}_2} \ln \\ & (T_f/T_0) + RT_0 \ln(x_{\text{SO}_2}) + a_{\text{ch, SO}_2}] \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่

x_i = เศษส่วนโมลของแก๊ส i ในแก๊สไอเสีย

$\dot{x}_i$ = เศษส่วนโมลของแก๊ส i ในสภาวะแวดล้อม

h_i = เอนทัลปีของแก๊ส i ในแก๊สไอเสีย,
 kJ/kgmole

s_i = เอนโทรปีของแก๊ส i ในแก๊สไอเสีย,
 kJ/kgmole-K

R = ค่าคงที่ของแก๊ส, kJ/kgmole-K

T_f = อุณหภูมิของแก๊สไอเสีย, K

T_0 = อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม, K

C_{p, SO_2} = ค่าความร้อนจำเพาะของ SO_2
ซึ่งมีค่าเท่ากับ 43 kJ/kgmole-K

$a_{\text{ch, SO}_2}$ = เอนทัลปีเคมีของ SO_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ
 $295,736 \text{ kJ/kgmole}$

1.2 เอนทัลปีของขี้เถ้า

$$\begin{aligned} A_{\text{ash}} = & m_L \times m_a \times C_{p, \text{ash}} [(T_{\text{ash}} - T_0)] \\ & - T_0 \ln(T_{\text{ash}}/T_0) \end{aligned} \quad (5)$$

โดยที่

- A_{ash} = เอกเซอร์ยีของขี้เถ้า, kJ/min
 m_L = อัตราการป้อนลิแกนด์, kg/min
 m_a = อัตราส่วนน้ำหนักของขี้เถ้าต่อน้ำหนักเชื้อเพลิง, kg/kg fuel
 $C_{p,ash}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของขี้เถ้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.87 kJ/kg-K
 T_{ash} = อุณหภูมิของขี้เถ้า, K
 T_o = อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม, K

1.3 เอกเซอร์ยีของคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด

$$A_{ub} = m_L \times m_C \times 32,750 \quad (6)$$

โดยที่

- A_{ub} = เอกเซอร์ยีของคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด, kJ/min
 m_L = อัตราการป้อนลิแกนด์, kg/min
 m_C = อัตราส่วนน้ำหนักของคาร์บอนในขี้เถ้าต่อน้ำหนักเชื้อเพลิง, kg/kg fuel
 32,750 = ค่าความร้อนของคาร์บอน, kJ/kg

1.4 เอกเซอร์ยีของเชื้อเพลิง

$$A_L = m_L \times A_{ch,fuel} \quad (7)$$

โดยที่

- A_L = เอกเซอร์ยีของเชื้อเพลิง, kJ/min
 m_L = อัตราการป้อนลิแกนด์, km/min
 $A_{ch,fuel}$ = เอกเซอร์ยีเคมีของเชื้อเพลิง, kJ/kg fuel

1.5 เอกเซอร์ยีของน้ำป้อน

$$A_w = m_w [(h_w - h_o) - T_o (s_w - s_o) + A_{ch,H_2O}] \quad (8)$$

โดยที่

- A_w = เอกเซอร์ยีของน้ำป้อน, kJ/min
 m_w = อัตราการไหลของน้ำป้อน, kg/min
 h_w = เอนทัลปีของน้ำป้อน, kJ/kg
 h_o = เอนทัลปีของน้ำที่อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, kJ/kg

s_w = เอนโทรปีของน้ำป้อน, kJ/kg-K

s_o = เอนโทรปีของน้ำที่อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, kJ/kg-K
 A_{ch,H_2O} = เอกเซอร์ยีเคมีของน้ำ, kJ/kg

1.6 เอกเซอร์ยีของไอน้ำอัดตัว

$$A_s = m_s [(h_s - h_o) - T_o (s_s - s_o) + A_{ch,H_2O}] \quad (9)$$

โดยที่

- A_s = เอกเซอร์ยีของไอน้ำอัดตัว, kJ/min
 m_s = อัตราการไหลของไอน้ำอัดตัว, kg/min
 h_s = เอนทัลปีของไอน้ำอัดตัว, kJ/kg
 h_o = เอนทัลปีของน้ำที่อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, kJ/kg
 T_o = อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม, K
 s_s = เอนโทรปีของไอน้ำอัดตัว, kJ/kg-K
 s_o = เอนโทรปีของน้ำที่อุณหภูมิสถานะแวดล้อม, kJ/kg-K

A_{ch,H_2O} = เอกเซอร์ยีเคมีของน้ำ, kJ/kg

1.7 เอกเซอร์ยีของงานเพลลา (A_{wc}) มีค่าเท่ากับงานไฟฟ้าที่ให้กับระบบในการวิเคราะห์พลังงานตามกฎข้อที่ 1

1.8 เอกเซอร์ยีของความร้อนที่สูญเสียจากผิวหม้อไอน้ำ

$$A_{sl} = (1 - T_o/T_s) Q_s \quad (10)$$

โดยที่

- A_{sl} = เอกเซอร์ยีของความร้อนที่สูญเสียจากผิวหม้อไอน้ำ, kJ/min
 T_o = อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม, K
 T_s = อุณหภูมิของผิวหม้อไอน้ำ, K
 Q_s = อัตราการสูญเสียความร้อนบริเวณผิวหม้อไอน้ำ, kJ/min

1.9 การย้อนกลับไม่ได้ของระบบปริมาตรควบคุมหม้อไอน้ำ

$$I = (A_L + A_w + A_{wc}) - (A_s + A_f + A_{ash} + A_{ub} + A_{sl}) \quad (11)$$

2. ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 2
ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 2

$$= \frac{\text{เอกเซอร์ยีที่นำไปใช้ประโยชน์}}{\text{เอกเซอร์ยีที่ใส่ให้ระบบ}}$$

$$= \frac{A_s \times 100}{A_L + A_w + A_{wc}} \quad (12)$$

โดยที่

A_s = เอกเซอร์ยีของไอน้ำอัดตัว, kJ/min

A_L = เอกเซอร์ยีของเชื้อเพลิง, kJ/min

A_w = เอกเซอร์ยีของน้ำป้อน, kJ/min

A_{wc} = เอกเซอร์ยีของงานไฟฟ้า, kJ/min

3. ผลการวิเคราะห์หม้อไอน้ำ

3.1 ผลการวิเคราะห์พลังงานของหม้อไอน้ำ

รูปที่ 2 และ 3 แสดงการไหลของพลังงาน จากผลการวิเคราะห์ พบว่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์อยู่ในช่วง 73.5-75.4% พลังงานที่สูญเสียหลักซึ่งมีค่าประมาณ 19% เกิดจากแก๊สไอเสียที่ปล่อยทิ้งอันเนื่องมาจากอุณหภูมิของแก๊สไอเสียที่มีค่าสูง และปริมาณอากาศส่วนเกินที่มีปริมาณมาก กล่าวคือเมื่ออากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำลดลง แต่ถ้าใช้อากาศส่วนเกินน้อยเกินไป จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง ปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดจะเพิ่มสูงขึ้น การควบคุมอากาศส่วนเกินให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าในห้องเผาไหม้ให้ได้ประมาณ 1.8 เท่าของอากาศทางทฤษฎี ด้วยเหตุผลทางด้านเทคนิคการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดที่จะต้องใช้อากาศช่วยในการยกเบดและเชื้อเพลิง

3.2 ผลการวิเคราะห์เอกเซอร์ยีของหม้อไอน้ำ

รูปที่ 4 และ 5 แสดงการไหลของเอกเซอร์ยีของหม้อไอน้ำ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์อยู่ในช่วง 23.2-23.8% และค่าการย้อนกลับไม่ได้มีค่าประมาณ 69.4% ของค่าเอกเซอร์ยีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ สาเหตุหลักของการย้อนกลับไม่ได้คือ กระบวนการเผาไหม้และความแตกต่างของอุณหภูมิที่จำกัดการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สไอเสียไปสู่ น้ำ เอกเซอร์ยีสูญเสียจากแก๊สไอเสียมีค่าประมาณ 5.6% นอกจากนี้เอกเซอร์ยีสูญเสียจากซีเถ้า คาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด และจากผิวหม้อไอน้ำมีค่าน้อยมากคือ มีค่าประมาณ 0.2% , 1% และ 0.2% ตามลำดับ

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อไอน้ำ

การสร้างแบบจำลองนี้ ก็เพื่อทำนายสมรรถนะของระบบหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อทำนายประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1 ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

2. เพื่อทำนายอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

สมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้คือ

1. สภาวะต่างๆ คงที่

2. ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 และอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำ ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่านั้น

3. ความดันของหม้อไอน้ำอยู่ระหว่าง 8.5-8.8 bar (abs) และอุณหภูมิไอน้ำอัดตัวอยู่ระหว่าง 172-174 °C

4.1 แบบจำลองของหม้อไอน้ำซึ่งทำนายประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

สัมพันธ์กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งได้จากการหาสมการการถดถอยเชิงเส้นของข้อมูลการวิเคราะห์พลังงานของหม้อไอน้ำ จากการวิเคราะห์จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$EFF = 87.9 + 0.652 m_L - 1.92 A/F \quad (13)$$

โดยที่

EFF = ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1

m_L = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง, kg/min

A/F = อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง, kg dry air/kg fuel

แบบจำลองนี้จะใช้ได้ในช่วง $6.1 \text{ kg/min} < m_L < 8.9 \text{ kg/min}$ และ A/F มีค่า 9.6, 9.9, 9.8 และ 9.5 เมื่อนำไปสร้างกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงต่างๆ จะได้ดังรูปที่ 6 และในแบบจำลองได้ทำนายอัตราส่วน A/F เอาไว้ 4 ค่า โดยเริ่มจาก $A/F = 6, 8, 10$ และ 12 ซึ่งอัตราส่วนทางทฤษฎีเป็นอัตราส่วนที่ทำนายว่าจะได้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ $A/F = 6$ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; R^2) ของแบบจำลองนี้เท่ากับ 0.97 ซึ่งจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นเป็นอย่างดี

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำน้อยกว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง กล่าวคือ ถ้าเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงขึ้น 1 เท่า จะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นแค่ 0.6% แต่ในทางกลับกัน ถ้าลดอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงลง 1 เท่า จะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 1.9% ดังนั้นสรุปได้ว่า ในการเดินเครื่องครั้งนี้จะต้องลดอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงลงอีกเท่าที่จะกระทำได้

แต่ต้องคำนึงอยู่เสมอว่าระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิด-ไดซ์เบดนี้จะใช้อากาศมากกว่าระบบอื่น เพราะต้องใช้อากาศช่วยในการยกเบดและเชื้อเพลิง

4.2 แบบจำลองของหม้อไอน้ำซึ่งทำนายอัตราการผลิตไอน้ำ

สัมพันธ์กับพลังงานของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งได้จากการหาสมการการถดถอยของข้อมูลการวิเคราะห์พลังงานของหม้อไอน้ำ จากการวิเคราะห์จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$M_s = 0.237 + 0.000298 E_{in} - 0.0272 A/F \quad (14)$$

โดยที่

M_s = อัตราการผลิตไอน้ำ, kg/sec

E_{in} = พลังงานของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้า, kJ/sec

แบบจำลองนี้จะใช้ได้ในช่วง $1,755 \text{ kJ/sec} < E_{in} < 2,560 \text{ kJ/sec}$ และ A/F มีค่า 9.6, 9.9, 9.8 และ 9.5 เมื่อนำไปสร้างกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตไอน้ำกับพลังงานของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงต่างๆ จะได้ดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อป้อนเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และได้ทำนายอัตราการผลิตไอน้ำซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานที่ได้รับจากเชื้อเพลิงและอัตราส่วน A/F เอาไว้ 4 ค่าคือ $A/F = 6, 8, 10$ และ 12 ซึ่งอัตราส่วน $A/F = 6$ เป็นอัตราส่วนที่ทำนายว่าเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากเข้าใกล้อัตราส่วนทางทฤษฎีมากที่สุด จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองเท่ากับ 0.99 แสดงว่าตัวแปรที่นำมาสร้างแบบจำลองมีความสัมพันธ์กันดีเช่นเดียวกับแบบแรก

ข้อดีแบบจำลองทั้งสองก็คือ สามารถทำนายประสิทธิภาพและอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำได้

อย่างคร่าวๆ สะดวกและรวดเร็ว ส่วนข้อเสียของแบบจำลองก็คือ จะใช้ได้กับหม้อไอน้ำที่ได้ทำการวิเคราะห์เท่านั้น เพราะข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลองหม้อไอน้ำได้จากการเดินเครื่องจริงเพียงช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น

5. สรุปผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

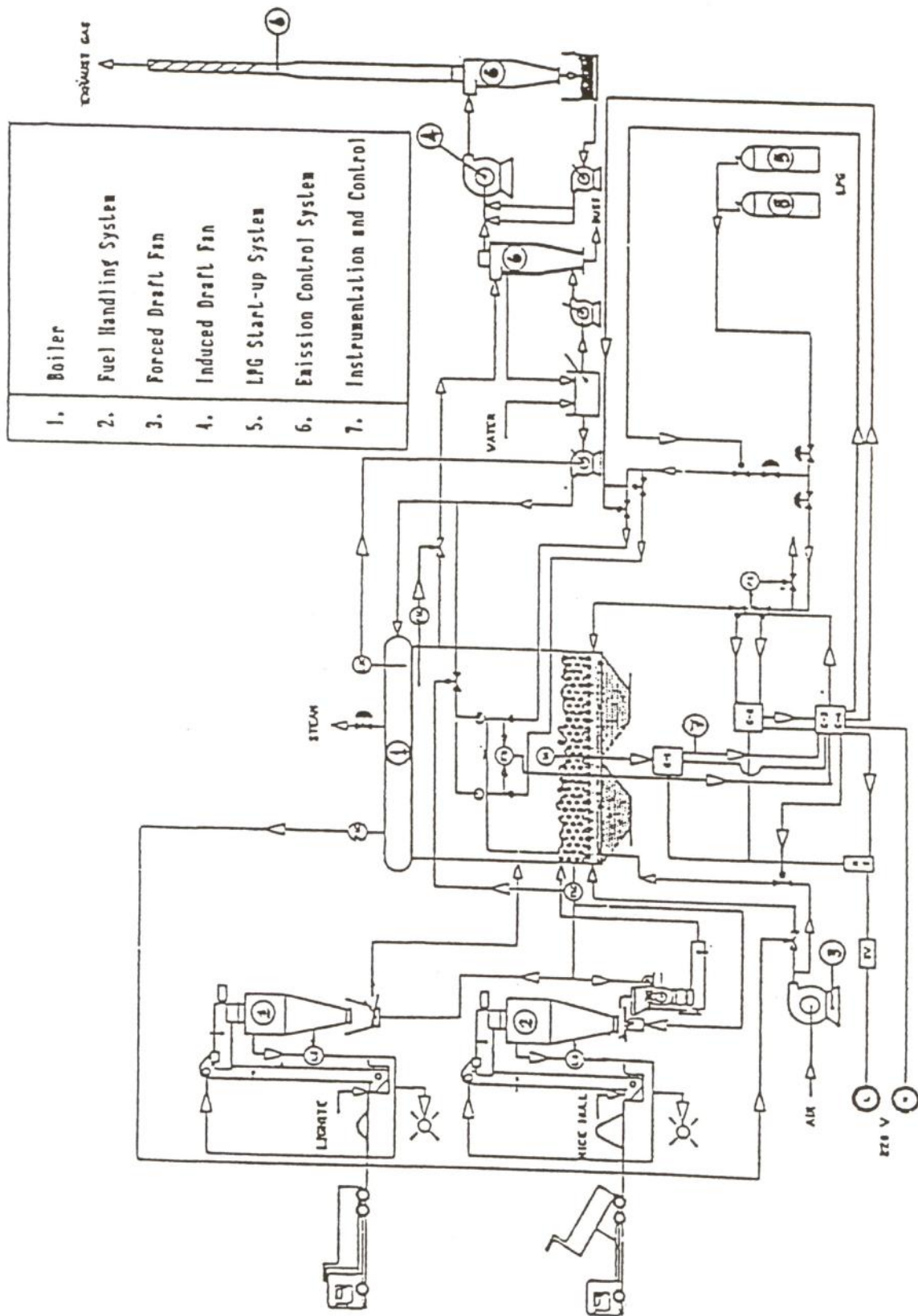
ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1 และ 2 อยู่ในช่วง 73.5-75.4% และอยู่ในช่วง 23.2-23.8% ตามลำดับ ซึ่งนับว่ายังอยู่ในเกณฑ์ดีพอสมควร การเปรียบเทียบหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ลิกันต์เป็นเชื้อเพลิง พบว่าหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ออกแบบโดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งเป็นหม้อไอน้ำต้นแบบ มีประสิทธิภาพหม้อไอน้ำตามกฎข้อที่ 1 สูงกว่าหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่นำเข้าจากประเทศจีนประมาณ 3% ทั้งนี้ เนื่องมาจากหม้อไอน้ำที่นำเข้าจากประเทศจีนถูกออกแบบไว้สำหรับใช้กับเชื้อเพลิง (ถ่านหิน) ของประเทศจีนเท่านั้น ดังนั้น เมื่อนำหม้อไอน้ำนี้มาใช้กับเชื้อเพลิง (ถ่านหิน) ของประเทศไทยซึ่งมีสมบัติต่างกัน จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำลดต่ำลง

กิตติกรรมประกาศ

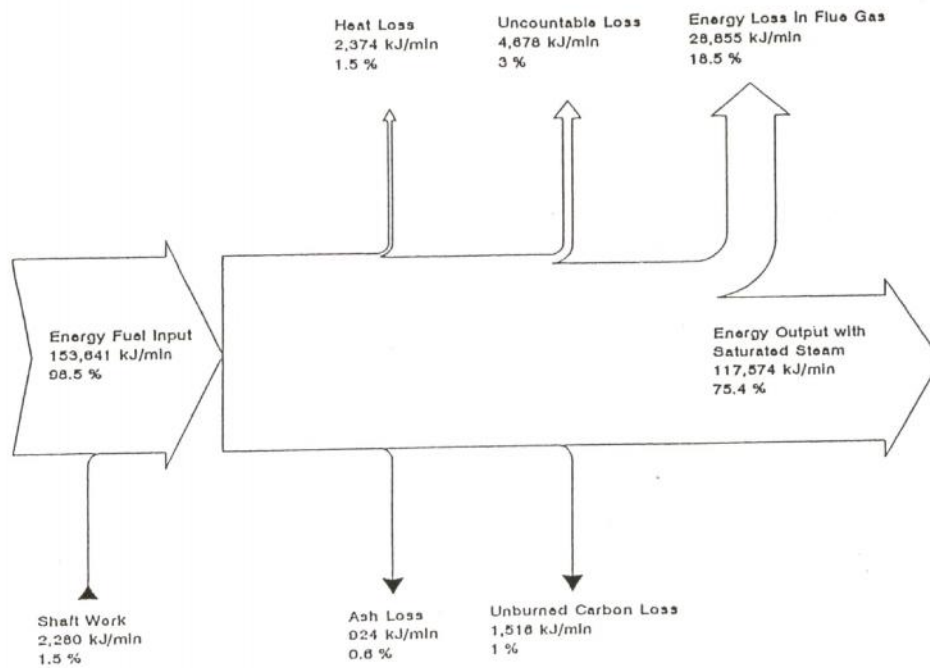
คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณศ.ดร.ปรีดาวิบูลย์สวัสดิ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

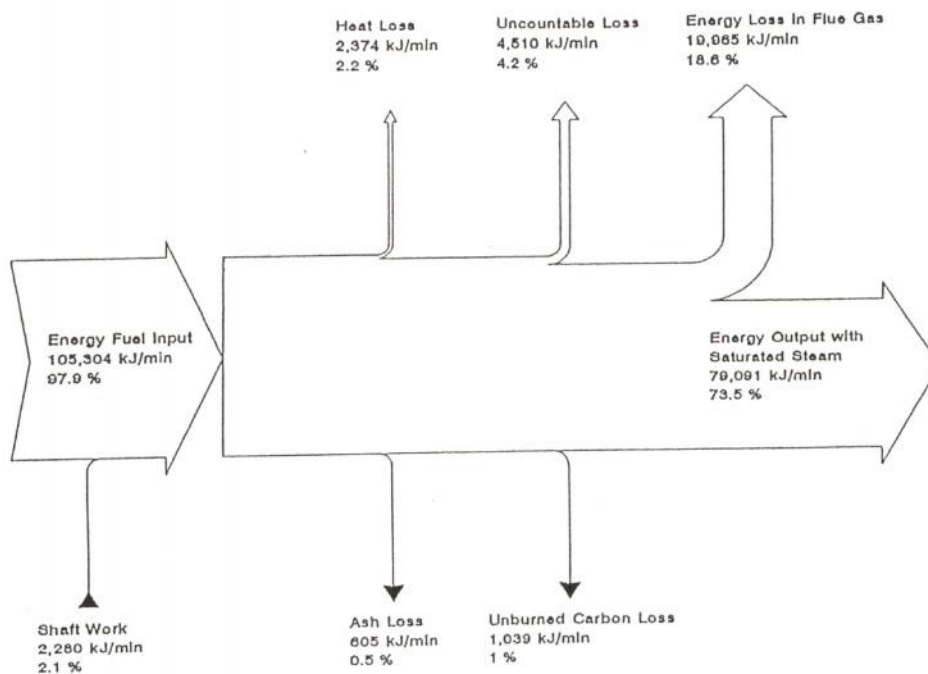
1. เทียบ เอื้อกิจ, 2532, การวิเคราะห์พลังงานของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของระบบการผลิตร่วมในโรงงานย้อมผ้า, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. อาษา ประทีปเสน, 2534, การวิเคราะห์ระบบการผลิตร่วมในโรงงานกระดาษ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3. ปรีชา ชูไพบุลย์, 2537, การวิเคราะห์พลังงานของหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดใช้ลิกันต์เป็นเชื้อเพลิง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



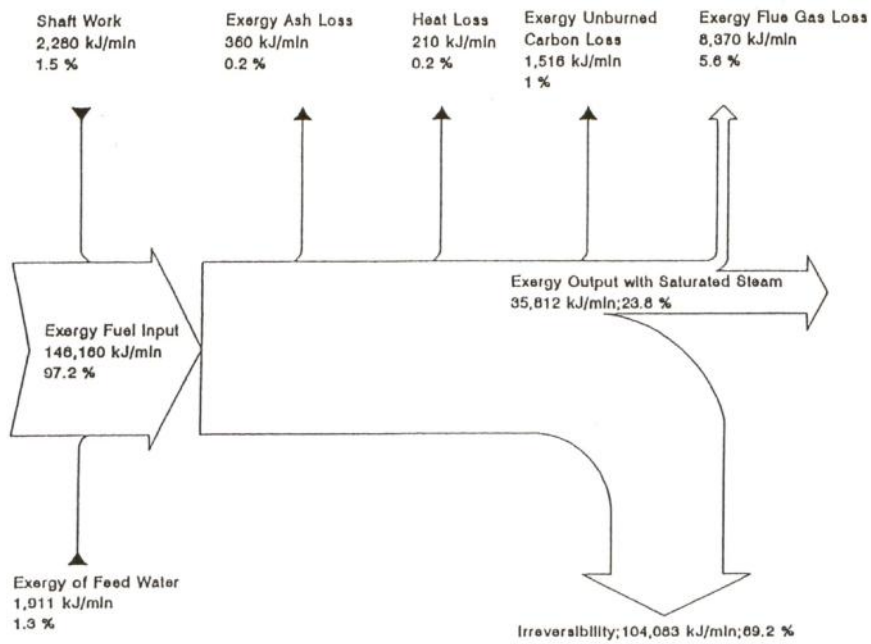
รูปที่ 1 Flow Diagram of Fluidized-Bed Boiler



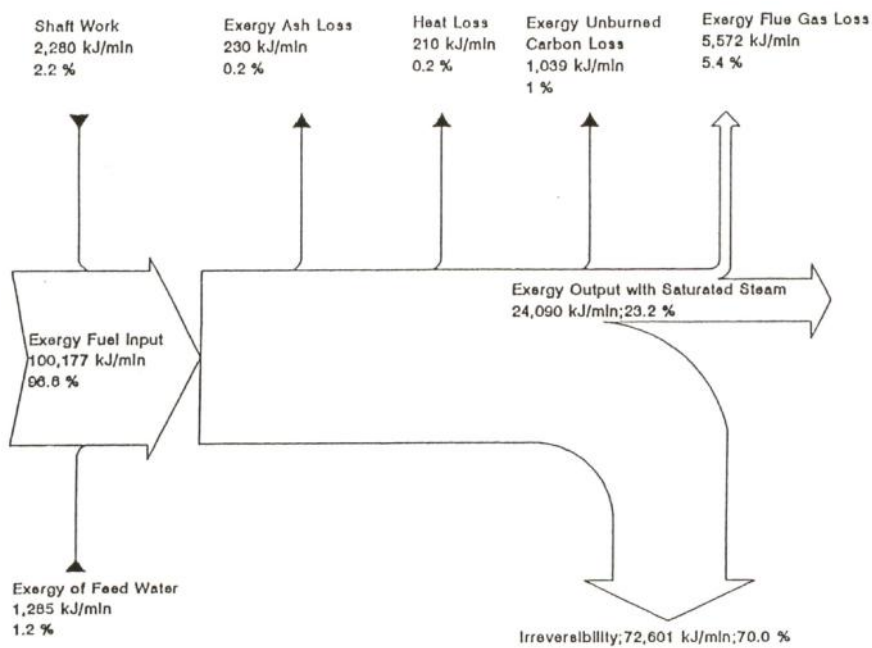
รูปที่ 2 Energy Flow Diagram of Boiler ($m_1 = 534$ kg/hr)



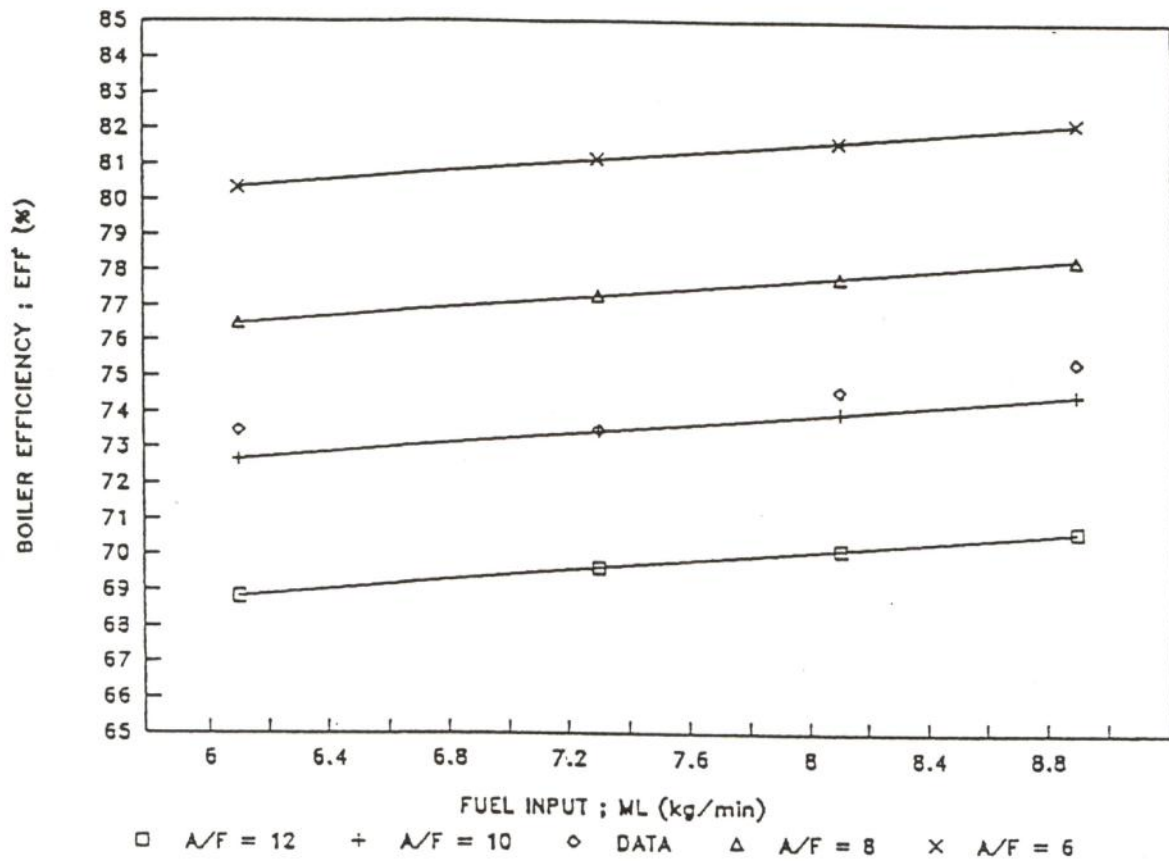
รูปที่ 3 Energy Flow Diagram of Boiler ($m_1 = 366$ kg/hr)



រូបភាព ៤ Exergy Flow Diagram of Boiler ($m_1 = 534$ kg/hr)



រូបភាព ៥ Exergy Flow Diagram of Boiler ($m_1 = 366$ kg/hr)



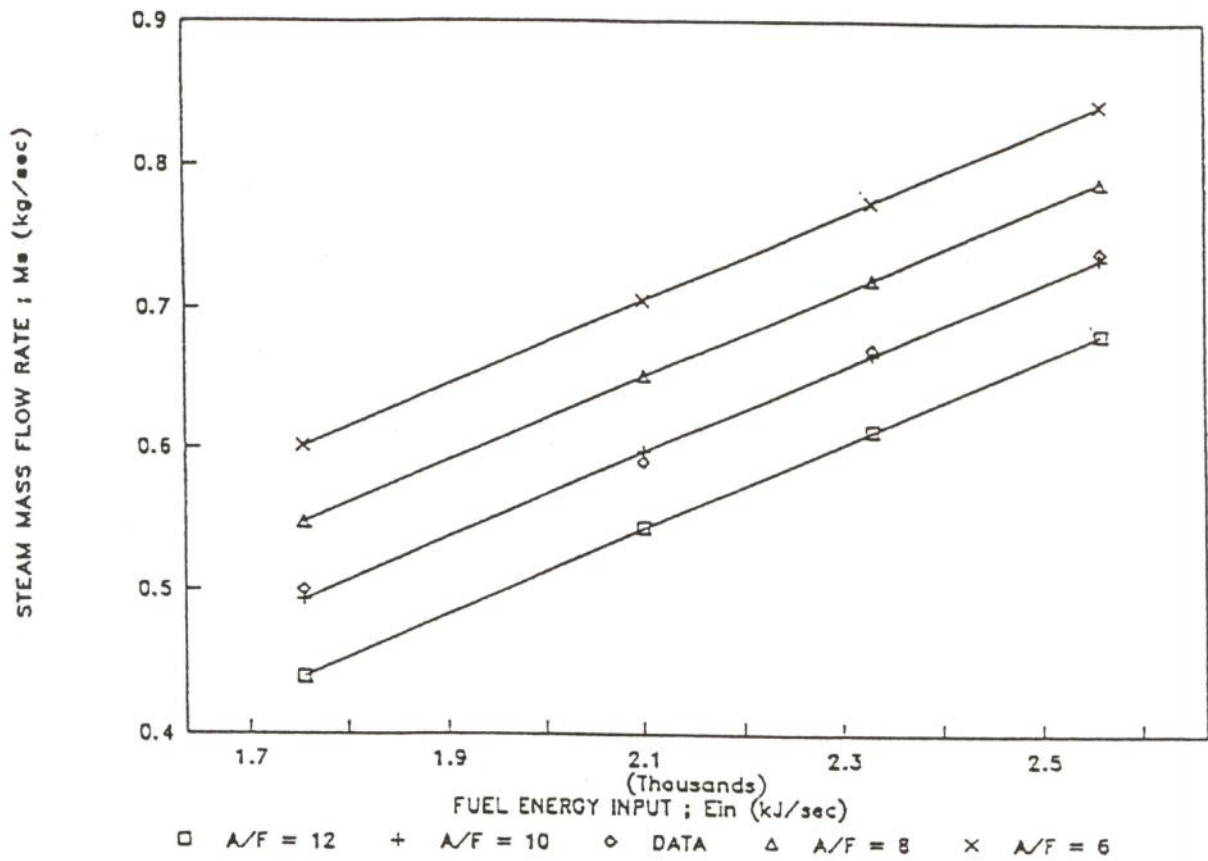
รูปที่ 6 Predicted Efficiencies at Various Fuel Inputs

MODELING EQUATION (SIMULATION)

$$EFF = 87.9 + 0.652 \text{ ML} - 1.92 \text{ A/F} ; (R^2 = 0.97)$$

DATA:

AT	ML = 6.1 ; A/F = 9.6 ; EFF = 73.5
	ML = 7.3 ; A/F = 9.9 ; EFF = 73.5
	ML = 8.1 ; A/F = 9.8 ; EFF = 74.6
	ML = 8.9 ; A/F = 9.5 ; EFF = 75.4



รูปที่ 7 Predicted Steam Mass Flow Rates at Various Energy Inputs

MODELING EQUATION (SIMULATION)

$$M_s = 0.237 + 0.000298 E_{in} - 0.0272 A/F ; (R^2 = 0.99)$$

DATA: AT $E_{in} = 1,755$; $A/F = 9.6$; $M_s = 0.50$
 $E_{in} = 2,100$; $A/F = 9.9$; $M_s = 0.59$
 $E_{in} = 2,330$; $A/F = 9.8$; $M_s = 0.67$
 $E_{in} = 2,560$; $A/F = 9.5$; $M_s = 0.74$

ตารางที่ 1 The Characteristic of Lignite*

องค์ประกอบ	ปริมาณ (kg/100 kg fuel)
C	41.50
H	3.97
O	12.54
N	0.69
S	1.20
Moisture	12.90
Ash	27.20

* การทดลองนี้ใช้ถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะ จ.ลำปาง