

ผลของการใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพสำหรับหม้อไอน้ำความดันต่ำขนาดเล็กต่อการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง พลังงานจากไอน้ำ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

Effect of Biogas Fuel use for Small Low Pressure Boiler On Fuel Consumption, Energy From Steam, Heat Value of Fuel And Boiler Efficiency

ปกรณ์เกียรติ ภูทองพลอย^{1*}, ณัฐพล ภูมิสะอาด²
Pakonkiad Poogungploy,^{1*} Nattapol Poomsa-ad²

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาผลของการใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพสำหรับหม้อไอน้ำความดันต่ำขนาดเล็กต่อการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง พลังงานของไอน้ำ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง คือ หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ 3 กลีบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.40 เมตร มีความยาว 1.80 เมตร มีท่อไฟเล็กแอสแตนเลส 24 ท่อ เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 1.50 เมตร และท่อไฟใหญ่ 1 ท่อ เงื่อนไขในการทดลอง ใช้น้ำป้อน 15 20 และ 25 ลิตรต่อชั่วโมง และที่ความดันไอน้ำ 0.5 0.75 และ 1.0 บาร์ ผลการทดลอง พบว่า ใช้เชื้อเพลิงสูงสุด 2.80 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ส่วนพลังงานจากไอน้ำสูงสุดและค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงสูงสุด 51.03 และ 68.54 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำสูงสุด 85.7 % นอกจากนี้ ปริมาณน้ำป้อนกับความดันไอน้ำมีผลไม่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

คำสำคัญ : ความดันไอน้ำ เชื้อเพลิงชีวภาพ ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ หม้อไอน้ำ

Abstract

The objective of this research was to study the effect of biogas fuel use for small low pressure boiler on the fuel consumption, energy of steam, heat value of the fuel and boiler efficiency. Boiler tube heat three-pass, 0.40 diameter, 1.80 meter long, 24 pieces of stainless fire tube pipe, 1 inch diameter, 1.50 meter long and big tube light 1 pieces were used. The experimental conditions were

^{1*} อาจารย์ สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

² อาจารย์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

^{1*} Lecturer, Product Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology, Loei Raja Bhat University, 42000 Email:kham_smc@hotmail.com

² Lecturer, Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai, Mahasarakham, 44150

conducted at different feed water of 15, 20 and 25 liters per hour and steam pressure of 0.5, 0.75 and 1.0 bar_g. Results found that the maximum fuel consumption of 2.80 cubic meters per hour. The maximum energy of steam and the maximum heat value of the fuel was 51.03 and 68.54 kW and the maximum efficiency was 85.7%. In addition, feed water with Steam Pressure had effect not different on boiler efficiency.

Keywords: Biogas Fuel, Boiler, Boiler Efficiency, Steam Pressure

บทนำ

ระบบไอน้ำเป็นระบบของการผลิตพลังงานความร้อน ที่ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญหลายประการ อาทิ การใช้สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม กลุ่มอาคารโรงงานในการจุดกำลังเครื่องจักรให้ทำงาน หรือในการประกอบกิจการ โรงแรม โรงพยาบาล ที่ใช้พลังงานไอน้ำ เช่น การฆ่าเชื้อโรค การอบแห้ง การทำน้ำร้อน ฯลฯ¹ ซึ่งแหล่งที่มาของพลังงานไอน้ำเกิดจากหม้อไอน้ำ ซึ่งมีหลายขนาด ได้แก่ ขนาดเล็ก ขนาดกลาง ขนาดใหญ่

หม้อไอน้ำขนาดเล็ก มีความต้องการใช้งานในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม หม้อไอน้ำจึงเปรียบเสมือนหัวใจหลักในการทำงาน เนื่องจากเป็นอุปกรณ์สำคัญในการกำเนิดพลังงานความร้อน เพื่อสร้างผลผลิตในการกระบวนการผลิต ซึ่งมีข้อดี ได้แก่ มีขนาดเล็กกะทัดรัด ใช้งานง่าย สะดวกในการทำความสะอาด หรือตรวจสอบภายใน มีความดันไอน้ำต่ำ ไม่ต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการควบคุมการผลิตและการใช้งาน ไม่มีความยุ่งยากและความเสี่ยงสูงที่อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงต่อชีวิตและทรัพย์สินหากมีการผลิต^{1, 2} จากข้อดีดังกล่าวจะต้องเลือกใช้เชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับหม้อไอน้ำ ซึ่งมีหลายชนิด ได้แก่ แก๊สแอลพีจี แก๊สชีวภาพ เป็นต้น

แก๊สชีวภาพ หมายถึง แก๊สที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยเชื้อจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน แก๊สชีวภาพ

ประกอบด้วยแก๊สหลายชนิด แต่ส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สมีเทน (CH₄) ประมาณ 65% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณ 33% ส่วนที่เหลือเป็นแก๊สชนิดอื่น ๆ³ ซึ่งการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic digestion) ซึ่งแบ่งขั้นตอนได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนหนึ่ง ทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน กลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลงและสามารถทำละลายน้ำได้ โดยจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดทำการปล่อยเอนไซม์ออกมาออกเซลล์ เพื่อช่วยเร่งการแตกตัวของโมเลกุล และจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะได้รับสารอาหารบางชนิดจากสารอินทรีย์ผ่านการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรง ขั้นตอนที่สอง การย่อยสลายโมเลกุลที่แตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลงจากขั้นตอนแรกให้เป็นกรดอินทรีย์ (organic acid) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เป็นต้น โดยจุลินทรีย์ที่สามารถอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีอากาศและไม่มีอากาศ (acid forming bacteria) และขั้นตอนที่สาม จะต้องอยู่ในสภาพที่ไร้อากาศ (obligated anaerobic bacteria) มีจุลินทรีย์พวก methanogens หรือ methane forming bacteria ทำการเปลี่ยนกรดอินทรีย์และไฮโดรเจน (H₂) เป็นก๊าซมีเทน (CH₄) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณก๊าซมีเทนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ acetic acid จากปฏิกิริยาที่ก่อนหน้านี้

การใช้หม้อไอน้ำโดยทั่วไปจะมีปัญหาหลักที่เกิดขึ้น ในปัจจุบัน ได้แก่ การมีต้นทุนสูงในกระบวนการผลิต ด้านเชื้อเพลิง ดังนั้นแก๊ส

ชีวภาพจึงเป็นทางเลือกอีกทางที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากว่าแก๊สชีวภาพมีข้อดี ได้แก่ สามารถผลิตขึ้นใช้เองได้ ราคาถูก⁴ การตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กิตติ จันทรแสงศรี (2536) ได้ทำการศึกษาวิจัยหม้อไอน้ำสำเร็จรูปแบบท่อไฟสองกลับ ผนังแห้ง เพื่อทำการประเมินพฤติกรรมเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำ พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อไอน้ำขนาด 3600 kg/h และขนาด 4800 kg/h คือ 87.0% และ 87.65% ที่ภาระ 37.7%, 48.0% ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สสันดาป และน้ำภายในหม้อไอน้ำพบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนในห้องสันดาปมีค่าประมาณ 61.5% ถึง 74.8% และในท่อไฟ สรวุฑ ฤชุพันธ์ (2550) ได้ศึกษาการวิเคราะห์สมรรถนะหม้อไอน้ำขนาดเล็กความดันต่ำสำหรับอุตสาหกรรม SMEs โดยใช้แก๊สแอลพีจี เป็นเชื้อเพลิง ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่ความดัน 0.75 bar_g อัตราน้ำป้อน 15 L/hr. เท่ากับ 95.39% อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.8 L/hr. ค่าใช้จ่ายต่อปีคิดการทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน เมื่อใช้แก๊สแอลพีจี จะเสียค่าใช้จ่าย 45,154.88 บาท/ปี กรณีใช้ฮีทเตอร์ในการทำความร้อนคิดค่ากระแสไฟฟ้าที่ราคา 3 บาทต่อยูนิิตจะเสียค่าใช้จ่าย 83,168.90 จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 38,014.02 บาท (ราคาก๊าซหุงต้มถังบรรจุ 15 กก. 290 บาท) เมื่อนำค่าใช้จ่ายต่างๆ ไปวิเคราะห์หาความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยค่าสร้างหม้อไอน้ำแรงดันต่ำ ราคา 118,700 บาทจะคิดเป็นระยะเวลาคืนทุนได้ 3.44 ปี

ดังนั้น หม้อไอน้ำความดันต่ำขนาดเล็กยังไม่มีใครศึกษาการใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพ จึงทำให้ศึกษาในครั้งนี้

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. แก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพ นำมาจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพที่อำเภอท่าพระ จังหวัดขอนแก่น ที่ใช้สำหรับในการทดลองครั้งนี้

2. อุปกรณ์ในการทดลอง

หม้อไอน้ำความดันต่ำขนาดเล็กที่สร้างขึ้นมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ① หม้อไอน้ำ ② ชุดตรวจวัดระดับน้ำ ③ วาล์วนิรภัย ④ เกจวัดความดัน ⑤ หัวเผา ⑥ ปัมป์สูบน้ำและ ⑦ ถังน้ำป้อน เป็นต้น ดังแสดงใน Figure 1.

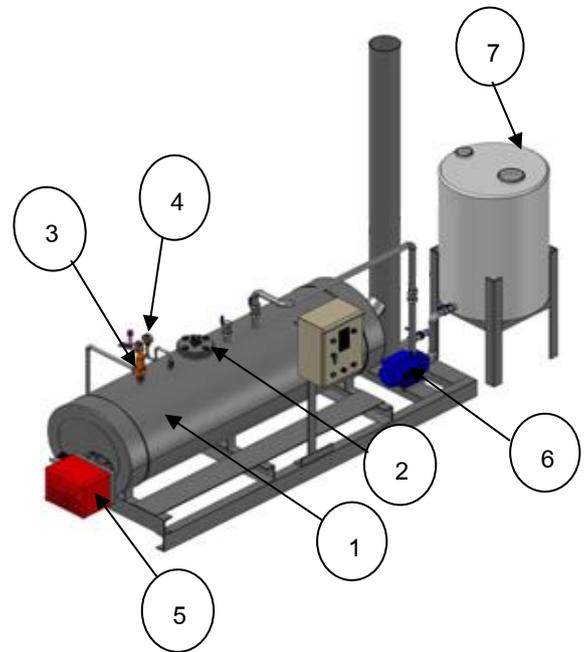


Figure 1 Small low pressure boiler

3. ขั้นตอนการทดลอง

3.1 ผู้วิจัยจะพิจารณาระบบน้ำป้อนให้กับหม้อไอน้ำแบ่งเป็นดังนี้ 15 20 และ 25 L/hr และความดันไอน้ำ 0.5 0.75 และ 1 bar_g⁵ โดยใช้การไหลเวียนของก๊าซร้อนแบบแห้ง แบบ 3 กลับ

3.2 เริ่มการทดลอง ที่ความดัน 0.5 0.75 และ 1 bar_g ใช้ปริมาณน้ำป้อน 15 20 และ 25 L/hr. ทุกๆหนึ่งชั่วโมงจะทำการบันทึกผลการทดลอง

3.3 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงทำการวัดโดยมิเตอร์วัดอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ

3.4 อุณหภูมิไอน้ำและอุณหภูมิแก๊สไอเสีย
ทำการวัดโดยใช้เทอร์โมคัพเบิล

3.5 ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ทำการวัดโดย
ให้ไอน้ำไหลผ่านโหลดแล้วเกิดการควบแน่น และ
สมการที่ใช้ในการคำนวณ (1)-(3) ^{6,7} ดังนี้

3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ค่าพลังงานจากไอน้ำ

$$Q_s = m_s(h_s - h_w) / 3600 \quad (\text{kW})$$

(1)

เมื่อ m_s = ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ [kg/hr.]

h_s = ค่าเอนทาลปีของไอน้ำ [kJ/kg]

h_w = ค่าเอนทาลปีของน้ำ [kJ/kg]

2. ค่าความร้อนได้จากเชื้อเพลิง

$$Q_f = m_f \cdot HV / 3600 \quad (\text{kW})$$

(2)

เมื่อ HV = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง [kJ/kg]

m_f = อัตราการใช้เชื้อเพลิง [kg/hr]

3. ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

$$\eta_b = m_s (h_s - h_w) \times 100$$

(%) (3)

$$m_f \cdot HV$$

เมื่อ m_s = ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ [kg/hr]

h_s = ค่าเอนทาลปีของไอน้ำ [kJ/kg]

h_w = ค่าเอนทาลปีของน้ำ [kJ/kg]

ผลการทดลอง

จากผลการทดลองของหม้อไอน้ำขนาดเล็กความ
ดันต่ำแบบ 3 กลีบ ที่มีกำลังการผลิต 35 L/hr. มี
การควบคุมปริมาณน้ำป้อนที่อัตราการไหล 15 20
และ 25 L/hr. และความดันที่ไอน้ำ 0.5 0.75 และ
1 bar_g ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

1. ผลของการใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพต่อ
การสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง ผลการศึกษาพบว่า
การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุด เท่ากับ 2.8 m³/hr ที่
ความดันไอน้ำ 1 bar_g และปริมาณน้ำป้อนที่ 25
L/hr รองลงมาการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เท่ากับ 2.7
m³/hr ที่ความดันไอน้ำ 0.5 กับ 0.75 bar_g และ
ปริมาณน้ำป้อนที่ 25 L/hr ส่วนการสิ้นเปลือง
เชื้อเพลิงต่ำสุด เท่ากับ 1.6 m³/hr ที่ความดันไอน้ำ
0.5 กับ 0.75 bar_g และปริมาณน้ำป้อนที่ 15
L/hr

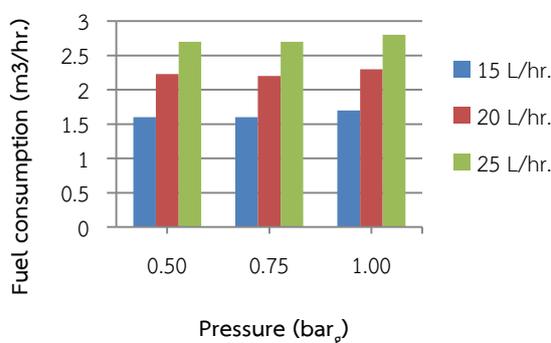


Figure 2 Relationship between fuel consumption versus pressure of small low pressure boiler

จาก Figure 2 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง
สูงสุด และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำสุด จะเห็นได้
ว่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุด ส่งผลให้ค่า
พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงและอุณหภูมิของไอน้ำ
สูงสุด เป็นผลมาจากมีการเผาไหม้อย่างมี
ประสิทธิภาพแต่เมื่อพิจารณาที่อากาศส่วนเกิน ณ
สภาวะนี้ พบว่าเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนมากที่สุดและมีการ
พลังงานสูญเสียที่ก๊าซไอเสียมากที่สุด

2. ผลของการใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพต่อ
ค่าพลังงานจากไอน้ำ พบว่าค่าพลังงานจากไอน้ำ
สูงสุด เท่ากับ 51.03 kW ที่ความดันไอน้ำ 0.75
bar_g และปริมาณน้ำป้อนที่ 25 L/hr รองลงมาค่า
พลังงานจากไอน้ำเท่ากับ 48.62 kW ที่ความดัน
ไอน้ำ 1 bar_g และปริมาณน้ำป้อนที่ 25 L/hr ส่วน
ค่าพลังงานจากไอน้ำต่ำสุด เท่ากับ 29.32 kW ที่

ความดันไอน้ำ 0.5 bar_g และปริมาณน้ำป้อนที่ 15 L/hr

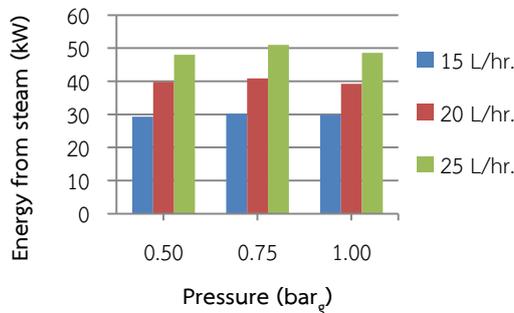


Figure 3 Relationship between energy from steam versus pressure of small low pressure boiler

จาก Figure 3 ค่าพลังงานจากไอน้ำได้สูงสุดและค่าพลังงานจากไอน้ำต่ำสุด ส่วนค่าพลังงานจากไอน้ำที่ได้สูงที่สุดนั้น เนื่องจากการต้มน้ำให้เดือดในอุณหภูมิที่ต้องการจะต้องพิจารณา น้ำป้อนที่เข้าสู่หม้อไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูง ถ้าอุณหภูมิของน้ำต่ำ จะทำให้ต้องใช้ค่าเอนทาลปีสูง เพื่อให้ให้น้ำเดือดได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ ในทางกลับกันหากน้ำป้อนมีอุณหภูมิสูง ย่อมจะทำให้ใช้ค่าพลังงานเอนทาลปีน้อย ดังสมการของพลังงานที่ได้จากไอน้ำ (Q_s) ได้จากผลคูณของปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ [kg/hr] กับผลต่างระหว่างค่าเอนทาลปีของไอน้ำ [kJ/kg] และค่าเอนทาลปีของน้ำ [kJ/kg]

3. ผลของการใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพต่อค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงพบว่าค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง สูงสุด เท่ากับ 68.54 kW ที่ความดันไอน้ำ 1 bar_g และปริมาณน้ำป้อนที่ 25 L/hr รองลงมาค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง เท่ากับ 66.10 kW ที่ความดันไอน้ำ 0.5 กับ 0.75 bar_g และปริมาณน้ำป้อนที่ 25 L/hr ส่วนค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงต่ำสุด เท่ากับ 39.17 kW ที่ความ

ดันไอน้ำ 0.5 กับ 0.75 bar_g และปริมาณน้ำป้อนที่ 15 L/hr

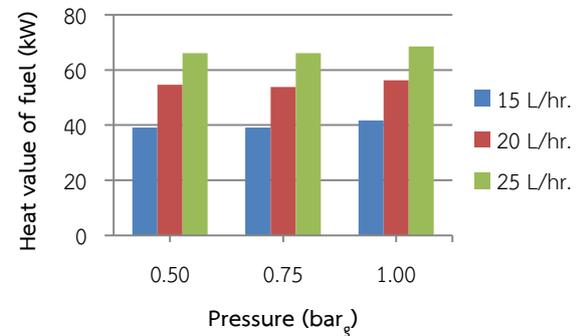


Figure 4 Relationship between heat value of fuel versus pressure of small low pressure boiler

จาก Figure 4 ค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงสูงสุด และค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงต่ำสุด ค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงสูงสุดเพราะมีอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ส่งผลให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และได้ความร้อนออกมาสูงสุด ส่วนค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงต่ำสุดเพราะว่าอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงมีส่วนผสมที่ไม่เหมาะสมหรือว่าเชื้อเพลิงมีความชื้น ส่งผลให้การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และได้พลังงานออกมาน้อย

4. ผลของการใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพต่อประสิทธิภาพหม้อไอน้ำพบว่าประสิทธิภาพหม้อไอน้ำสูงสุด เท่ากับ 85.7% ที่ความดันไอน้ำ 1 bar_g และปริมาณน้ำป้อนที่ 20 L/hr รองลงมา ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ เท่ากับ 85.6% ที่ความดันไอน้ำ 0.75 bar_g และปริมาณน้ำป้อนที่ 20 L/hr ส่วนประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ ต่ำสุด เท่ากับ 83.6% ที่ความดันไอน้ำ 0.5 bar_g และปริมาณน้ำป้อนที่ 20 L/hr จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเฉลี่ยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับ⁸

จาก Figure 5 ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำสูงสุดเนื่องจาก อุณหภูมิหน้าที่ใช้ในการต้มมีอุณหภูมิสูง และอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงเหมาะสมส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ไม่มีก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เกิดขึ้น อากาศส่วนเกินอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการเผาไหม้ ซึ่งการเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพของพลังงานสูงตามไปด้วย

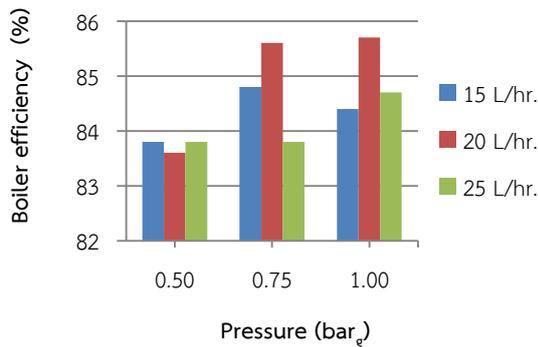


Figure 5 Relationship between boiler efficiency versus pressure of small low pressure boiler

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าหม้อไอน้ำแรงดันต่ำที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพสูง ดังที่กล่าวไว้ว่า เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งมีค่าประสิทธิภาพต่อการเผาไหม้ 75-85% เชื้อเพลิงเหลว 80-85% และเชื้อเพลิงก๊าซ 80-90% ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งจะต่ำกว่าเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงเหลวต่ำกว่าเชื้อเพลิงก๊าซ เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศน้อยกว่ากันตามลำดับ⁹ และเมื่อพิจารณาที่ Figure 5 จะเห็นว่าประสิทธิภาพมีค่าอยู่ในช่วง 83.6-85.7% ซึ่งมีความแตกต่างน้อยมาก ดังนั้น ปัจจัยของน้ำป้อน 15 20 และ 25 L/hr. และความดันไอน้ำ 0.5 0.75 และ 1 barg ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาหม้อไอน้ำความดันต่ำขนาดเล็กแบบท่อไฟ 3 กลีบ โดยใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวภาพพบว่า สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุดเท่ากับ 2.80 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ส่วนพลังงานจากไอน้ำสูงสุดและค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงสูงสุด 51.03 และ 68.54 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำสูงสุดเท่ากับ 85.7 %

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ต่างๆ ในการสร้างหม้อไอน้ำ จนสำเร็จสมบูรณ์ บอหมักแก๊สชีวภาพ อำเภอท่าพระ จังหวัดขอนแก่น และท้ายที่สุดผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเลยที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินโครงการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. กิตติ จันทรแสงศรี. การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำแบบหลอดไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2536.
2. วิชัย พุกภรณ์ธารากุล. ผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์โอเดียนสแควร์. 2537
3. สถาบันเทคโนโลยีแก๊สชีวภาพ ม. เชียงใหม่. แก๊สชีวภาพ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://teenet.cmu.ac.th>. (วันที่ค้นข้อมูล 16 ธันวาคม 2556).
4. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. การออกแบบและสร้างบ่อก๊าซชีวภาพ. บริษัท อินทีเกรเต็ด โปรโมชัน เทคโนโลยี จำกัด. 2544.
5. ศรารัฐ ฤชพันธ์. การวิเคราะห์สมรรถนะหม้อไอน้ำขนาดเล็กความดันต่ำสำหรับ

- อุตสาหกรรม SMEs. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร
อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2550.
6. สมเกียรติ บุญณะ. การคำนวณหาต้นทุน
พลังงานหม้อไอน้ำ. วารสารวิศวกรรมสาร.
ตุลาคม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ
นครเหนือ. 2546
7. ปรีชา ชูไพบูลย์. การวิเคราะห์พลังงานของ
หม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดใช้ถ่านเป็น
เชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์
อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2537.
8. ไพฑูรย์ สร้อยสน. การอนุรักษ์พลังงานหม้อไอน้ำ
แบบหลอดน้ำสำเร็จรูป. วิทยานิพนธ์
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิต
วิทยาลัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี. 2549.
9. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์
พลังงาน. การจัดการพลังงานความร้อน
แนวทางอื่นๆ ในการอนุรักษ์พลังงานสำหรับ
อาคาร/โรงงานอุตสาหกรรม. ปทุมธานี: กรม
พัฒนาพลังงานทดแทน. 2553.