การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก
The Waste Heat Recovery System for Small Boilers

อุทัย ผ่องรัศมี[1] เสนีย์ ศิริไชย[2] และ สำรวจ อินแบน[3]
[1,2]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
[3]สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ วิทยาลัยเทคนิคนครพนม มหาวิทยาลัยนครพนม
Uthai Phongrasmee[1], Seney Sirichai[2] and Samruad Inban[3]
[1,2]Phetchaburi Rajabhat University
[3]Nakhon Phanom University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อเพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วดูดความร้อนทิ้งต่อเงื่อนไขที่เหมาะสม สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ซึ่งมีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h จากการวัดอุณหภูมิความร้อนทิ้งมีอุณหภูมิสูงถึง 453 K จึงได้ติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ โดยนำความร้อนทิ้งมาอุ่นน้ำป้อน ให้แก่หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อมีพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน 3.55 m^2 ท่อมีความยาว 34 m ความร้อนทิ้งไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ได้ติดตั้งพัดลมดูดความร้อนทิ้งหลังจากการถ่ายโอนความร้อนให้แก่เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ผลการวิจัยพบว่าที่อัตราการผลิตไอน้ำ 200 kg/h ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 7.65 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่พื้นผิวภายนอก และพื้นที่ผิวภายในท่อเฉลี่ย 33.42 และ 5.71 W/m^2K ความดันลดเฉลี่ย 25.69 และ 2.27 Pa และมีประสิทธิผลเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ 0.40 ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ 34,409 บาทต่อปี และระยะเวลาคืนทุน 86 เดือน ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับหม้อน้ำแบบให้ความร้อนไหลผ่านทางเดียว

คำสำคัญ : หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ความเร็วความร้อนทิ้ง

Abstract

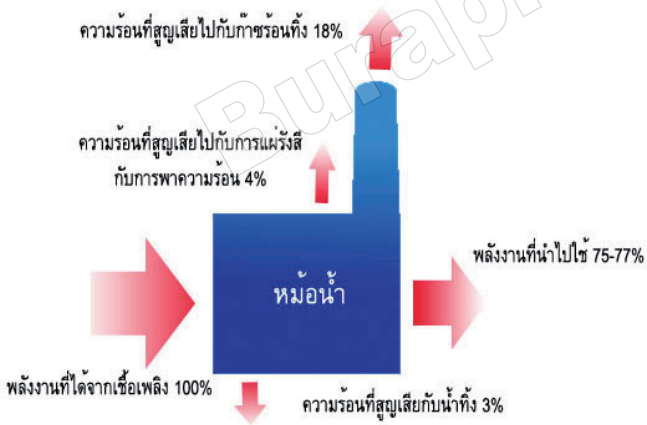
The research was to design and develop a shell and tube economizer to investigate the effect of the exhaust gas velocity on the performance of the economizer used in a once through boiler generating steam rate 500 kg/h. The measured temperature of exhaust gas was 453 K and the shell and tube economizer was mounted on the exhaust stack to recover the waste heat of the boiler. The heating surface area and the tube length of the economizer were about 3.55 m^2 and 34 m. The hot or exhaust gas at 7.65 m/s entered the cross – flow economizer used to preheat the feeding water of the boiler at steam rate 200 kg/h the heat transfer coefficients of the tube outer and inner areas are 33.42 and 5.71 W/m^2K, respectively while the pressure drops for the shell and the tube were 25.69 and 2.27 Pa. The effectiveness of the economizer was 0.40 and the energy saving cost 34,409 Baht/year. The payback period is around 86 months.

Keywords : once – through boiler, economizer shell and tube, velocity hot air.

***Corresponding author.** E-mail: Uthai_MT@hotmail.com

บทนำ

ปัจจุบันหม้อน้ำแบบหลอดน้ำหรือหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 200-2000 kg/h มีใช้ในภาคอุตสาหกรรมประมาณ 300 เครื่อง (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2551) การถ่ายโอนความร้อนจะเป็นแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (Once–Through Boiler) ซึ่งในบทความนี้จะกล่าวเฉพาะหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ซึ่งเป็นหม้อน้ำชนิดเปลือกตั้งภายในติดตั้งหลอดน้ำเป็นรูปกงกระรอก ส่วนบนท่อจะมีพื้นที่เก็บไอน้ำ ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ใช้หัวฉีด 2 หัวที่ความดันการฉีด 2 bar และตั้งความดันการใช้ไอน้ำที่ 5 kg/cm^2 จากการใช้เครื่องมือตรวจวัดสมรรถนะหม้อน้ำ (การทำงานปกติ) พบว่าที่ความเร็วความร้อนทิ้งที่ปล่องไอเสีย 6.5-7.5 m/s อุณหภูมิความร้อนทิ้งอยู่ระหว่าง 180-310°C และปริมาณความร้อนที่สูญเสียที่ปล่องไอเสียหม้อน้ำอยู่ระหว่าง 15-20% (Massimo Gobbi, 2011) และสอดคล้องกับงานวิจัยประยุกต์ (ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2547) ได้นำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำแบบหลอดไฟขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 1, 2 และ 3 t/h มาอุ่นน้ำป้อน โดยใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยให้ความร้อนทิ้งไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับหม้อน้ำรถยนต์ ผลการวิจัย พบว่าสมรรถนะหม้อน้ำโดยรวมเพิ่มขึ้น และสามารถประหยัดพลังงานได้ 18,500, 23,000 และ 100,000 บาทต่อปี มีระยะเวลาคืนทุน 2.5, 2.23 และ 0.9 ปี



ภาพที่ 1 ระบบการสูญเสียความร้อนทิ้งของหม้อน้ำ
ที่มา : Massimo Gobbi. (2011).

ผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญกับพลังงานความร้อนทิ้งที่ปล่องไอเสียหม้อน้ำ ซึ่งจะนำความร้อนทิ้งกลับมาอุ่นน้ำป้อนให้แก่หม้อน้ำโดยผ่านเครื่องอุ่นน้ำป้อน (Economizer) จากประโยชน์ดังกล่าวเป็นการจัดการระบบการนำความร้อนส่วนนี้กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งนับว่ามีความสำคัญยิ่งสำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็กชนิดความร้อนไหลผ่านทางเดียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและเพื่อลดพลังงานความร้อนที่สูญเสียในระบบหม้อน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (ธนิต ดวงมุสิกร์, 2547) ที่ได้ติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อร่วมกับหม้อน้ำแบบหลอดไฟมีอัตราการผลิตไอน้ำ 12 และ 14 t/h ภายหลังการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนร่วมกับหม้อน้ำ พบว่า เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ สามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าสู่หม้อน้ำได้ 42°C เป็นผลให้เกิดการประหยัดพลังงานได้ 12,207.18 Btu/y และประหยัดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง 2,213,283 บาทต่อปี มีระยะเวลาคืนทุน 8 เดือน ดังนั้น การวิจัยนี้จึงได้ออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube) เพื่อเพิ่มพื้นผิวการถ่ายโอนความร้อน เนื่องจากมีความเหมาะสมกับชนิดของของไหลที่มีความดันคงที่ การออกแบบสามารถทำได้ง่าย ต้นทุนไม่สูงมาก และสามารถนำพลังงานกลับมาใช้อย่างคุ้มค่า เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อที่ออกแบบใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ที่ความดันการใช้งานไอน้ำไม่เกิน 5 kg/cm2 เหตุผลที่เลือกใช้วิธีนี้ เพราะว่ามีน้ำหนักเบาและเหมาะสมกับของไหลในท่อมีความดันสูง และเป็นของเหลว ส่วนความร้อนทิ้งที่จะถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำที่อยู่ภายในท่อ จะไหลอยู่ในส่วนเปลือก ในการออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อจะต้องคำนึงถึงการเลือกเส้นทางการไหล ซึ่งจะเลือกให้ความร้อนทิ้งไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับท่อ ส่วนเงื่อนไขการออกแบบ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเปลือกและส่วนท่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ : เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการดูดความร้อนทิ้งออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อที่ความเร็วต่างๆ, V ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกและท่อ, Q_s ,Q_t ต่อความดันลดภายในเปลือกและท่อ, ΔP_s , ΔP_t ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกและท่อ, $h_{s,i}$, $h_{t,o}$ และต่อประสิทธิผลเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ, ε เพื่อการวิเคราะห์ความเหมาะสมการลงทุนและการประหยัดพลังงาน

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ใช้คุณสมบัติของความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำและคุณสมบัติของน้ำป้อนของระบบหม้อน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิที่ได้จากการวัดขณะที่หม้อน้ำทำงานปกติดังนี้ $T_{s,i}$, $T_{s,o}$, $T_{t,i}$, Tt,o สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของน้ำ, Cw และอัตราการไหลของน้ำ, $\dot{m}$ ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการออกแบบเรียงตามลำดับสมการ (1) – (4)

$$A_t = \frac{Qc}{U\Delta T_{lm}} \quad (1)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{s,i}-T_{t,o})-(T_{s,o}-T_{t,i})}{ln(T_{s,i}-T_{t,o})/(T_{s,o}-T_{t,i})} \quad (2)$$

$$L = \dot{m}Cw(T_{t,o}-T_{t,i}) \quad (3)$$

$$L = \frac{A_t}{\pi D_i} \quad (4)$$

ผลที่ได้จากการออกแบบ ได้พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน, A_t ของส่วนเปลือกได้แก่พื้นผิวท่อภายนอกและความยาวท่อสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด ซึ่งสมการที่ใช้ในการทดสอบและคุณสมบัติของความร้อนที่อยู่ภายในเปลือกนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำ ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการทดสอบเรียงตามลำดับสมการ (5) - (10) ดังนี้

$$V_{s,max} = \frac{S_T}{S_T-D_o} V_s \quad (5)$$

$$Re_{s,max} = \frac{V_{s,max}D_o\rho_s}{\mu_s} \quad (6)$$

$$Nu_s = C_2(Re_{s,max})^m p_r^{0.36}\left(\frac{Pr_s}{Pr_w}\right)^{0.25} \quad (7)$$

$$h_{s,o} = \frac{Nu_s k_s}{D_o} \quad (8)$$

$$f_s = \left[0.044 + \frac{0.8S_L/D_o}{[(S_T-D_o)/D_o]^{0.43+1.13D_o/S_L}}\right] Re_{s,max}^{-0.15} \quad (9)$$

$$Re_{s,max} = \frac{2f_s N_L(\rho_s V_{s,max})^2}{\rho_s}\left(\frac{\mu_w}{\mu_s}\right)^{0.14} \quad (10)$$

สมการที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของน้ำที่อยู่ภายในท่อเมื่อน้ำได้รับการถ่ายโอนความร้อนจากความร้อนทิ้งของส่วนเปลือก ซึ่งจะมีสมการที่ใช้ในการทดสอบเรียงตามลำดับสมการ (11) - (17) ซึ่งเป็นสมการของ Sieder and Tate ที่ได้ค้นพบจากการทดลอง (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2536)

$$G_t = \frac{\dot{m}_t}{A_t} \quad (11)$$

$$Re_t = \frac{G_t D_i}{\mu_t} \quad (12)$$

$$Pr_t = \frac{Cp_t\mu_t}{k_t} \quad (13)$$

$$Nu_t = 1.86(Re_t Pr_t)^{0.33}\left(\frac{D_i}{L}\right)^{0.33}\left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (14)$$

$$h_{t,i} = \frac{Nu_t}{D_i} k_t \quad (15)$$

$$f_t = \frac{64}{Re_t} \quad (16)$$

$$\Delta P_t = \frac{f_t N_L L G_t^2}{2000 D_i S_t \phi} \quad (17)$$

ผลที่ได้จาการทดสอบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อตามสมการ (5) - (10) และ (11) - (17) จะได้สมรรถนะเครื่องอุ่นน้ำป้อนหรือประสิทธิผล เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ, ε ตามสมการ (18) ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_s Cp_s(T_{s,i}-T_{s,o})+m_t Cp_t(T_{t,i}-T_{t,o})}{\dot{m}_t Cp_t(T_{s,i}-T_{t,i})} \quad (18)$$

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

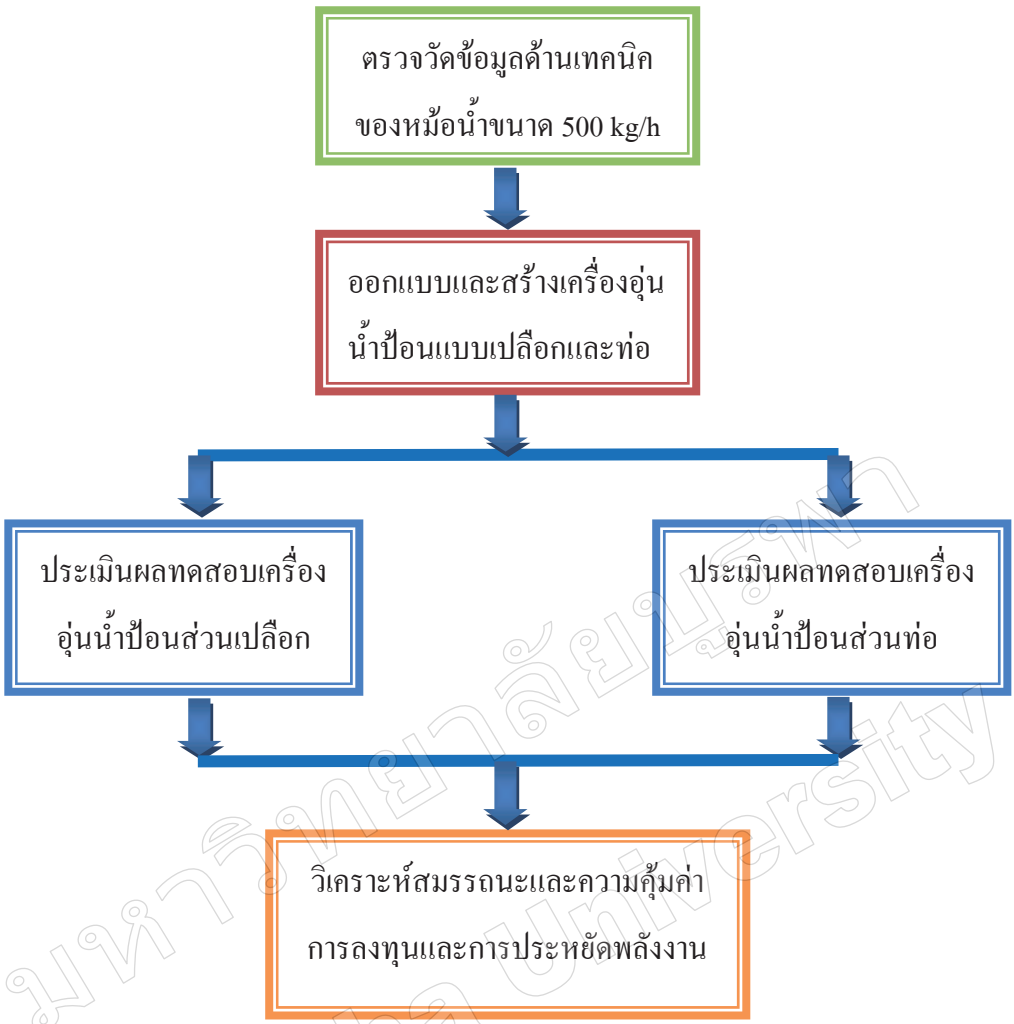
การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการตรวจสอบข้อมูลด้านเทคนิคหม้อน้ำแบบหลอดน้ำที่มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h เพื่อการออกแบบ สร้าง ติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ส่วนที่สอง เป็นการวิเคราะห์ส่วนเปลือก ส่วนท่อ ประสิทธิผลและส่วนที่สาม ความเหมาะสมการลงทุนการประหยัดพลังงานของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

การประเมินสมรรถนะหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h

การประเมินสมรรถนะหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีขนาดกำลังการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ที่ความดัน (เกจ) การใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง และใช้เครื่องมือวิเคราะห์สมรรถนะ Visitor – 01 ℓ ซึ่งใช้ข้อมูลด้านเทคนิคและ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ข้อมูลที่ได้จากการทำงานจริง (ตารางที่ 1 - 2) มาใช้ในการออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ดังนี้

จากข้อมูลด้านเทคนิคนำมาออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ สำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก

การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (Type A)

การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อโดยให้ความร้อนทิ้งไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับท่อ (5 แถว) เมื่อความร้อนทิ้งถ่ายโอนความร้อนให้แก่พื้นผิวท่อ (น้ำ) ซึ่งติดตั้งพัดลมดูด (Blower) ช่วยดูดความร้อนทิ้งออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ พัดลมดูดใช้มอเตอร์เป็นเครื่องต้นกำลัง ซึ่งมีการควบคุมความถี่ (f) ในส่วนอุปกรณ์ของระบบได้ติดตั้งเกจวัดอุณหภูมิแบบกระเปาะทางเข้า-ออก และเกจวัดความดันเข้า-ออก (น้ำและความร้อนทิ้ง) และเจาะรูทางเข้า-ออกเพื่อใส่เครื่องมือวัดสมรรถนะของความร้อนทิ้งทั้งสองด้าน

ผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

1. การวิเคราะห์ส่วนความร้อนภายในเปลือก

การวิเคราะห์ผลส่วนเปลือกที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน, ความดันลดภายในเปลือกและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ความดันการใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 ดังภาพที่ 5-7

ตารางที่ 1 ข้อมูลด้านเทคนิคของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

หม้อน้ำแบบให้ความร้อนไหลผ่านทางเดียว	ปริมาณ
1. น้ำป้อนและไอน้ำ	
1.1 ปริมาณน้ำเข้าสู่หม้อน้ำ	112 liters
1.2 อุณหภูมิน้ำป้อน	30°C
1.3 อัตราการผลิตไอน้ำ	500 kg/h
1.4 ความดันการใช้ไอน้ำ	5 kg/cm^2
2. เชื้อเพลิง	
2.1 ประเภทเชื้อเพลิง	Diesel
2.2 อัตราการใช้เชื้อเพลิง	11 liters/h
2.3 ค่าความดันน้ำมันเชื้อเพลิงของหัวฉีด (2 หัว)	2 bar
3. อากาศ	
3.1 อัตราการไหลของอากาศ	0.056 m^3/s
3.2 อุณหภูมิอากาศ	32°C
4. ความร้อนทิ้ง (ปล่องไอเสียหม้อน้ำ)	
4.1 อุณหภูมิความร้อนทิ้ง	180 - 310°C
4.2 อัตราการความร้อนทิ้ง	0.064 m^3/s

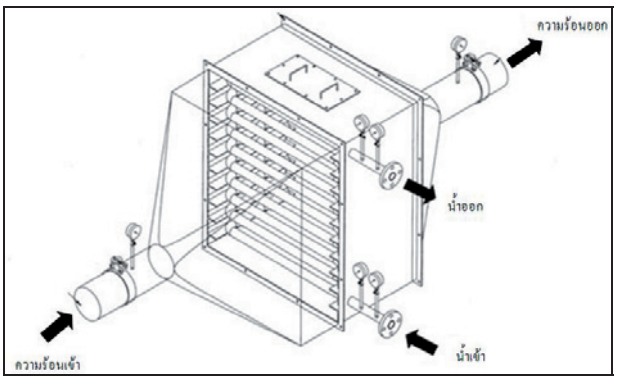
ตารางที่ 2 ข้อมูลได้จากการวัดด้านเทคนิคหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวนำมาออกแบบ

ข้อมูล	ปริมาณ
1. อุณหภูมิความร้อนทิ้งของหม้อน้ำ, $T_{s,i}$	180°C
2. อุณหภูมิน้ำป้อนเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อน, $T_{t,i}$	30°C
3. อุณหภูมิความร้อนทิ้งปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม, $T_{s,o}$	120°C
4. อุณหภูมิน้ำป้อนที่เข้าสู่หม้อน้ำ, $T_{t,o}$	60°C
5. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของน้ำ, *Cw*	50 W/m^2 K
6. ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ, *Cp*	4.186 kJ/kgK
7. อัตราการผลิตไอน้ำ, $\dot{m}$	0.138 kg/s

ตารางที่ 3 ผลที่ได้จากการออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสำหรับหม้อน้ำแบบให้ความร้อนไหลผ่านทางเดียว

ข้อมูล	ปริมาณ
1. ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอกาลิทึม, ΔT_{lm}	98.22°C
2. ปริมาณความร้อนของน้ำ, *Qc*	17.44 kW
3. พื้นที่ผิวส่วนท่อสำหรับการถ่ายโอนความร้อน, A_t	3.55 m^2
4. ความยาวท่อ, *L*	34 m
5. พื้นที่ผิวส่วนเปลือก, A_s	5.60 m^2
6. ความยาวเปลือก, L_s	1.8 m

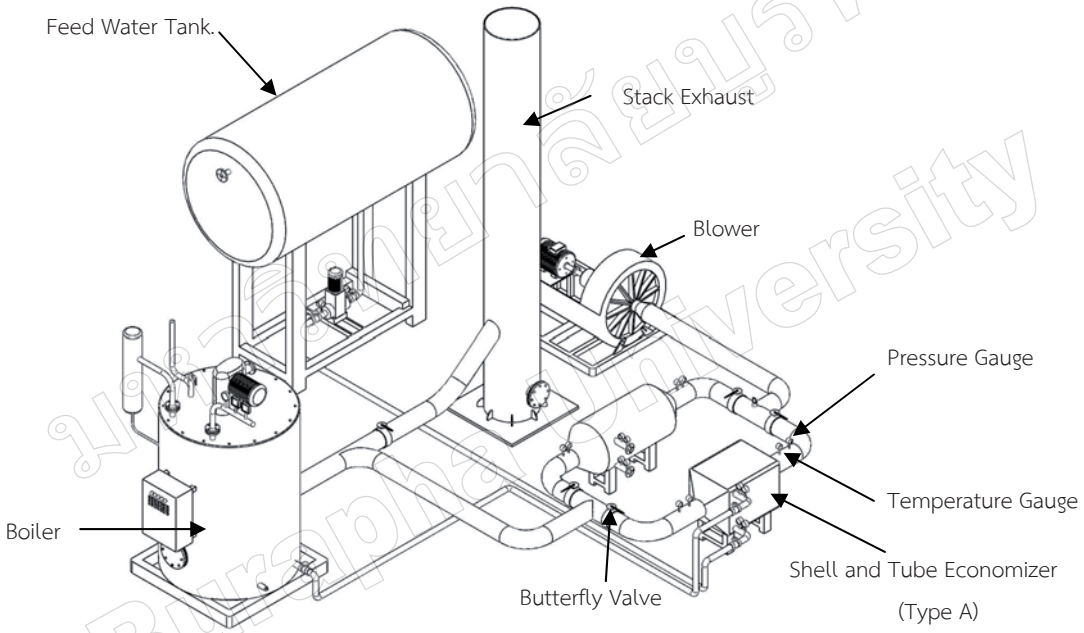
มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



(ภาพออกแบบ)

(ภาพของจริง)

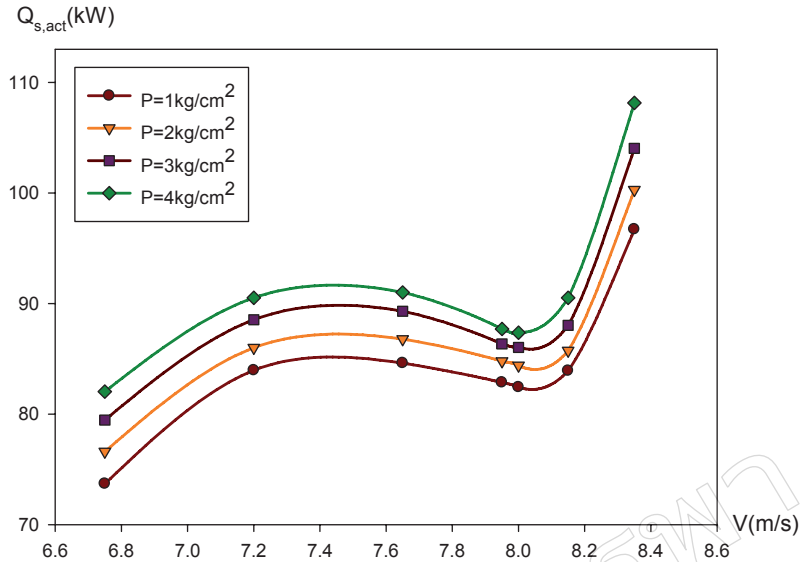
ภาพที่ 3 เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อที่ออกแบบและสร้างขึ้น



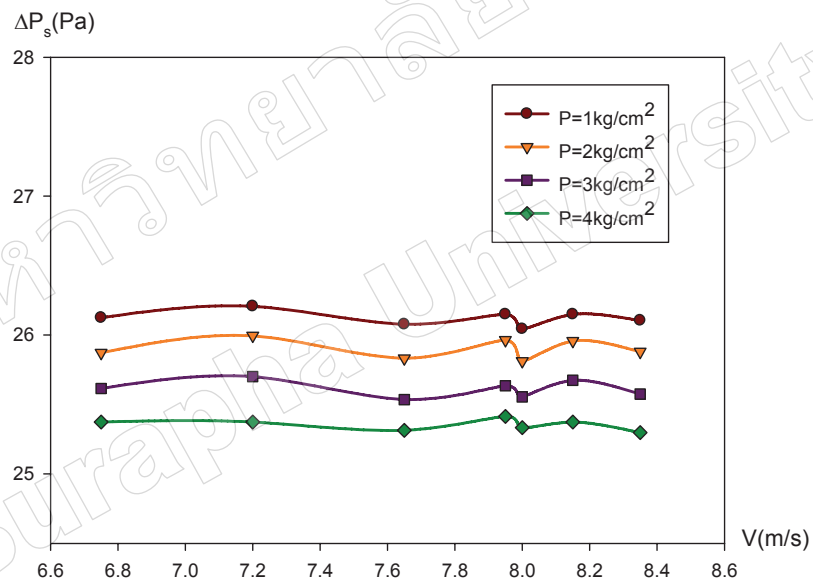
ภาพที่ 4 การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ(Type A) ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (Once -Through Boiler)

ภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์ส่วนเปลือกที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.75-8.35 m/s ที่อุณหภูมิเฉลี่ยความร้อนทิ้งสูงสุดอยู่ระหว่าง 259-275°C และอัตราการไหลความร้อนทิ้งเฉลี่ย 0.734 kg/s ที่ความดันใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 น้ำป้อนมีอุณหภูมิ 30-40°C พบว่าได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยสูงสุด 77.94 -102.26 kW เมื่อพิจารณาถึงความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 7.20-7.65 m/s อุณหภูมิน้ำป้อนอยู่ระหว่าง 32-34°C อัตราการไหลของน้ำคงที่จะได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เหมาะสมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวขนาดอัตราผลิตไอน้ำ 500 kg/h อยู่ระหว่าง 87.26-87.92 kW และที่ความเร็ว 7.95 -8.15 m/s อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง เพราะว่าในขณะนี้ปริมาณน้ำป้อนถูกส่งเข้ามาในท่อ ซึ่งน้ำมีอุณหภูมิต่ำและเมื่ออัตราการไหลของน้ำคงที่อัตราการถ่ายโอนความร้อนก็จะสูงเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ภาพที่ 6 ผลการวิเคราะห์ส่วนเปลือกที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.75-8.35 m/s ที่ความดันใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 เมื่ออุณหภูมิน้ำป้อน 30-40°C พบว่าความดันลดมีค่าใกล้เคียงกันมากระหว่าง 25.75-25.79 Pa เพราะว่าอัตราการไหลของน้ำป้อน



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทิ้งกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือก



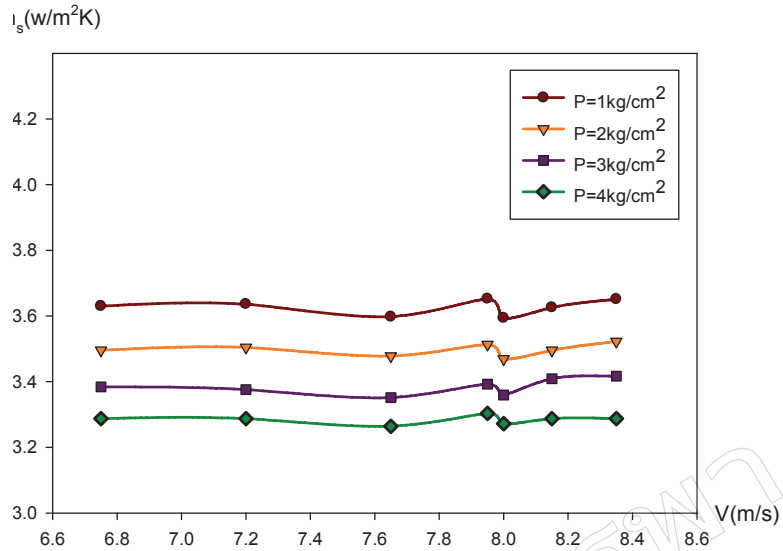
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทิ้งกับความดันลดภายในเปลือก

คงที่ และการเลือกคุณสมบัติวัสดุ ที่นำมาใช้ในการสร้างส่วนท่อไม่เหมาะสม (STB 35.8) กับขนาดของหม้อน้ำ และเมื่อมีน้ำป้อนถูกปั๊มเข้ามาใหม่จะทำให้ค่าความดันลดต่ำลงไปทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิน้ำป้อนต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อที่เข้าสู่หม้อน้ำ

ภาพที่ 7 ผลการวิเคราะห์ส่วนเปลือกที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.75-8.35 m/s ที่ความดันใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 อุณหภูมิของความร้อนทิ้งเฉลี่ยระหว่าง 259-275°C พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 33.44-33.46 W/m^{2}K ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการถ่ายโอนความร้อน เพราะว่าการเลือกใช้วัสดุการออกแบบไม่เหมาะสมกับอัตราการไหลของความร้อนทิ้งและอัตราการไหลของน้ำป้อนแบบคงที่

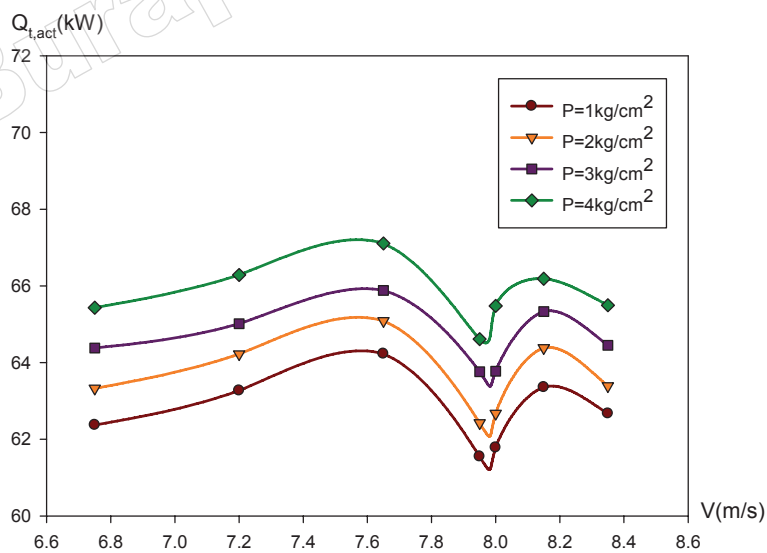
ภาพที่ 5-7 สรุปผลการวิเคราะห์เครื่องอุ่นน้ำป้อนส่วนเปลือก ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.75-8.35 m/s ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกให้แก่พื้นผิวท่อภายนอก, ความดันลดภายในเปลือก และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือก พบว่าที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 7.20-7.65 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 87.26 kW มีความดัน

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

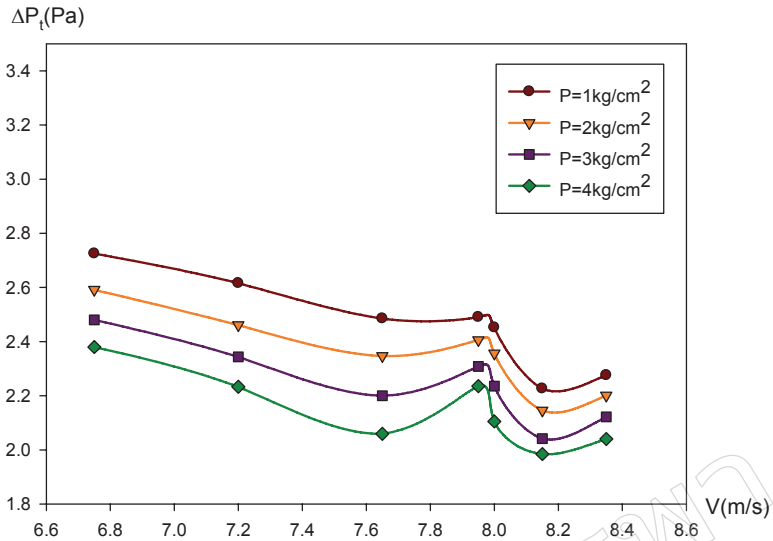


ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทิ้งกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือก

ลดต่ำสุดเฉลี่ย 25.82 Pa และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 33.45 W/m^{2}K ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อน ส่วนเปลือก มีพื้นที่ผิว 5.60 m^2 สำหรับให้ความร้อนเกิดการหมุนวนเพื่อการถ่ายโอนความร้อนให้แก่ท่อน้ำ ซึ่งค่าดังกล่าวมีความสอดคล้องกับความเร็วดูดความร้อนทิ้งก่อนติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ 6.0-7.8 m/s ที่ความดันการใช้ไอน้ำไม่เกิน 5 kg/cm^2 สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีอัตราการผลิตไอน้ำไม่เกิน 500 kg/h ในขณะเดียวกันเมื่อความเร็วดูดความร้อนทิ้งเพิ่มขึ้นที่ 8.00-8.35 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงระหว่าง 87.35-108.14 kW ตรงกันข้ามค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน มีค่าอยู่ระหว่าง 33.27-33.38 W/m^{2}K และค่าความดันลดอยู่ระหว่าง 25.33 -25.29 Pa ซึ่งค่า สัมประสิทธิ์และความดันลด มิได้สูงตามค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนด้วย เพราะว่าการออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ เลือกใช้ขนาดท่อมีความหนา 0.006 m ซึ่งมีความหนามากเกินไป เป็นผลให้ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและความดันลดต่ำ และไม่สอดคล้องกับทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อน (พงศ์ธร จรัญญากรณ์, 2542) ว่าเมื่อ



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทิ้งกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทิ้งกับความดันลด

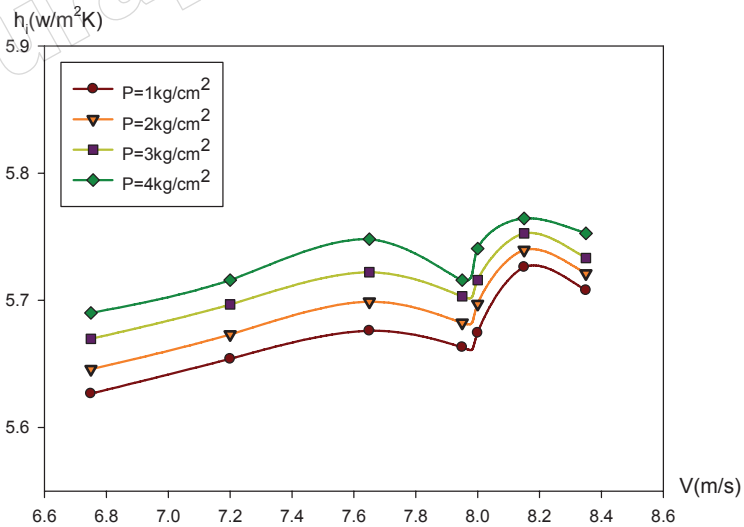
อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและความดันลดจะสูงขึ้น นอกจากนี้ความเร็วดูดความร้อนทิ้งมีความเร็วเพิ่มขึ้นด้วย

2. การวิเคราะห์ส่วนท่อ

การวิเคราะห์ผลส่วนท่อที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ ความดันลดและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน ที่ความดันใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 ดังนี้

ภาพที่ 8 ผลการวิเคราะห์ส่วนท่อที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.75-7.65 m/s อุณหภูมิน้ำป้อนอยู่ระหว่าง 30-34°C อัตราการไหลของน้ำคงที่ ที่ความดันการใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 พบว่าได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในท่อเฉลี่ยสูงสุด 63.88-65.58 kW และที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 7.95-8.00 m/s จะได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลงเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 63.09-64.81 kW เพราะว่าอัตราการไหลของน้ำไม่คงที่ และอุณหภูมิของน้ำป้อนที่ไหลเข้ามาในเครื่องอุ่นน้ำป้อนส่วนท่อมีอุณหภูมิต่ำ

ภาพที่ 9 ผลการวิเคราะห์ความดันลดภายในท่อที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.75-8.35 m/s อุณหภูมิน้ำป้อน 30-40°C ความดันการใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 และอุณหภูมิความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำ 259-275°C พบว่า เมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นแต่ความดันลดภายในท่อลดลง ซึ่งไม่สอดคล้อง



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทิ้งกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ

กับทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อน (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2536) เมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง ความดันลดจะต้องเพิ่มขึ้น สาเหตุที่ความดันลดลงเพราะ ความเร็วดูดความร้อนทิ้งมีความเร็วเพิ่มขึ้น

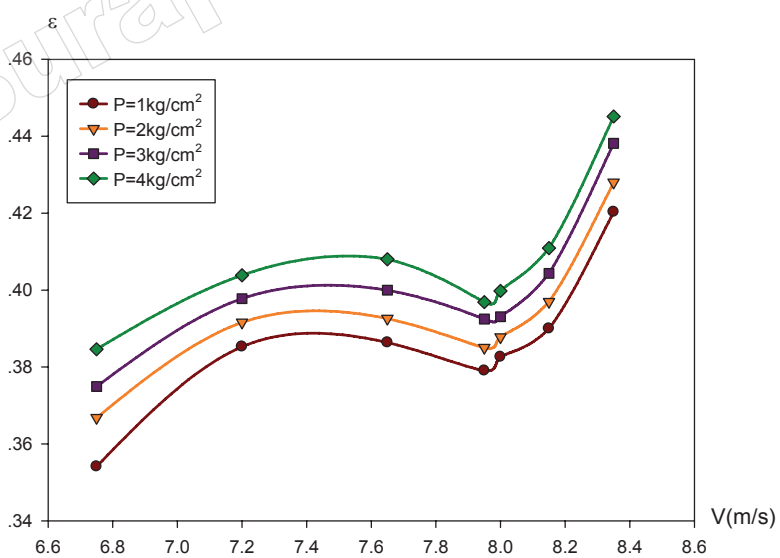
ภาพที่ 10 การวิเคราะห์ผลสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.75-8.35 m/s อุณหภูมิน้ำป้อนเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนอยู่ระหว่าง 30-40°C อุณหภูมิความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำ 259-275°C ที่ความดันการใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนต่ำ เพราะว่าความเร็วดูดความร้อนทิ้งมีความเร็วเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความดันลดภายในท่อ

ภาพที่ 8-10 สรุปผลการวิเคราะห์เครื่องอุ่นน้ำป้อนส่วนท่อ ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.75-8.35 m/s และอุณหภูมิน้ำป้อนอยู่ระหว่าง 30-40°C ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนที่น้ำได้รับผ่านพื้นผิวท่อ ความดันลดภายในท่อและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนพบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 7.20-7.65 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความสูงสุดเฉลี่ย 65.58 kW มีความดันลดต่ำสุดเฉลี่ย 2.27 Pa และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 5.68 W/m2K ซึ่งเป็นเป็นค่าที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ (ส่วนท่อ) ที่มีพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน 3.55 m^2 ท่อมีความยาว 34 m สำหรับการถ่ายโอนความร้อนระหว่างความร้อนทิ้งกับน้ำที่อยู่ภายในท่อซึ่งอุณหภูมิน้ำเพิ่มขึ้น 45-50% สอดคล้องกับงานวิจัย (อุทัย ผ่องรัศมี, 2554) ได้ออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดสำหรับหม้อน้ำไหลผ่านทางเดียว เมื่อนำความร้อนทิ้งถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำ พบว่าอุณหภูมิน้ำป้อนภายในท่อ สูงขึ้น 40-45% ซึ่งประหยัดค่าเชื้อเพลิงได้ 34,409 บาทต่อปี

3. การวิเคราะห์ผลสมรรถนะเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

การวิเคราะห์ได้ประสิทธิผลเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวต่อความเร็วในการดูดความร้อนทิ้งที่ความดันต่างๆ ดังภาพที่ 11

ภาพที่ 11 สรุปผลการวิเคราะห์เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.75-8.35 m/s กับประสิทธิผล เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ พบว่า มีประสิทธิผลเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสูงสุดเฉลี่ย 0.39-0.40 เมื่ออุณหภูมิน้ำป้อนอยู่ระหว่าง 32-34°C ปริมาณน้ำป้อนคงที่ และมีความเร็วดูดความร้อนทิ้งระหว่าง 7.20-7.65 m/s ที่ความดันการใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 ในกรณีมีความเร็วดูดความร้อนทิ้งเพิ่ม มีการจ่ายไอน้ำไปใช้งานน้ำป้อนจะถูกส่งเข้ามาในเครื่องอุ่นน้ำป้อนใหม่ อุณหภูมิน้ำป้อนอยู่ระหว่าง 36-40°C ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 7.95-8.15 m/s สมรรถนะเครื่องอุ่นน้ำป้อนลงลด เพราะว่าอัตราการไหลของน้ำป้อนไม่คงที่และอุณหภูมิน้ำป้อนต่ำ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิน้ำป้อนที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่หม้อน้ำและเมื่ออัตราไหลของน้ำป้อนคงที่ประสิทธิผลเครื่องอุ่นน้ำป้อนจะสูงขึ้นตามลำดับ



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการดูดความร้อนทิ้งกับประสิทธิผลเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ

Burapha University

ตารางที่ 3 วิเคราะห์ความเหมาะสมเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

ความเหมาะสมการใช้เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ	
1. ชั่วโมงการทำงาน	6 h
2. ราคาน้ำมันดีเซล	30 Baht/liters
3. ค่าพลังงานที่ประหยัดได้	17.42 kW
4. ค่าพลังงานที่ประหยัดได้	45 Baht /h
5. ค่าพลังงานที่ประหยัดได้	270 Baht /day
6. ราคาสร้างเครื่อง	190,000 Baht
7. ค่าบำรุงรักษา	15,000 Baht
8. ระยะเวลาคืนทุน	7.2 year

4. การวิเคราะห์ความเหมาะสม ความคุ้มค่าและการประยัดพลังงานการใช้เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ

ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์การประหยัดพลังงานและระยะเวลาคืนทุนของการออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวจากต้นทุนการสร้างเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อและการบำรุงรักษาใช้งบประมาณ 205,000 บาท ในกรณีเดินเครื่องวันละ 6 ชั่วโมง และใช้น้ำมันดีเซลราคาลิตรละ 30 บาท พบว่า เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสามารถประหยัดพลังงานได้ 17.42 kW เมื่อคิดค่าพลังงานเชื้อเพลิงประหยัดได้ 270 บาทต่อวัน และมีระยะเวลาคืนทุน 7.2 ปีสอดคล้องกับงานวิจัย (ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2547) ได้นำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำแบบหลอดไฟขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 1, 2 และ 3 t/h มาอุ่นน้ำป้อนโดยใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ผลการวิจัยพบว่าหม้อน้ำที่มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 1 t/h สามารถประหยัดพลังงาน ได้ 18,500 บาทต่อปี มีระยะเวลาคืนทุน 2.5 ปี ซึ่งถ้าเป็นหม้อน้ำขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 3 t/h สามารถประหยัดพลังงานได้ 100,000 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 0.9 ปี จะเห็นว่าถ้าเป็นหม้อน้ำขนาดเล็กจะใช้ระยะเวลาคืนทุนมากกว่า หม้อน้ำขนาดใหญ่ เพราะว่าหม้อน้ำขนาดเล็กมีอัตราการผลิตไอน้ำน้อยกว่า

สรุป

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิผลเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว กับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง พบว่าการออกแบบและสร้างเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ โดยใช้ข้อมูลด้านเทคนิคของหม้อน้ำขนาด 500 kg/h ได้พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนส่วนท่อและส่วนเปลือก 3.55 m^2 และ 5.60 m^2 ท่อมีความยาว 34 m และเปลือกมีความยาว 1.8 m ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 7.20-7.65 m/s อุณหภูมิความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสีย 264.75-265.75°C อัตราการไหลของน้ำคงที่ ที่อุณหภูมิน้ำป้อน 32-34°C ความดันใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 ได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกและภายในท่อ 87.26-87.92 และ 64.70-65.58 kW สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยภายในเปลือกและภายในท่อ 33.42-33.45 และ 5.68-5.71 W/m^2K ความดันลดเฉลี่ยภายในเปลือกและภายในท่อ 25.82-25.69 และ 2.41-2.27 Pa และเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อมีสมรรถนะเฉลี่ยสูงสุด 0.39-0.40 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ส่วนความคุ้มค่าการประหยัดพลังงานสามารถประหยัดพลังงานได้ 34,409 บาทต่อปี เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก สำหรับต้นทุนการลงทุน 205,000 บาท จะพบว่าได้ค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 13.04% เมื่อเปรียบกับอัตราดอกเบี้ยของธนาคาร เพื่อกลุ่มอุตสาหกรรมร้อยละ 10 จะเห็นว่าผลตอบแทนภายในสูงกว่า แสดงว่าเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อมีความเหมาะสมต่อการลงทุน ถึงแม้ว่าจะเป็นหม้อน้ำขนาดเล็กและใช้ระยะเวลาคืนทุนนานถึง 7.2 ปี

ข้อเสนอแนะ

1. ในการออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อควรเพิ่มอัตราความเร็วของการไหลของน้ำ ซึ่งจะเป็นผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น

2. ถ้าสามารถเพิ่มพื้นที่การรับความร้อน ส่วนท่อ (Tube) อาจจัดทำโดยการใส่ครีบ ซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนและค่าประสิทธิผลเพิ่มขึ้น

3. ควรหาวิธีการที่เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของความร้อนทิ้ง ซึ่งอาจจะใช้วิธีใช้สารเคลือบท่อซึ่งและชนิดของวัสดุที่ใช้ ซึ่งต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม จะต้องวิจัยต่อไป

4. ต้นทุนการผลิต ถ้าสามารถลดได้ จะทำให้ค่าประหยัดเพิ่มขึ้นและมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้การลงทุนนั้นคุ้มค่าสมควรแก่การลงทุน

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย. (2551). *สถิติการขอขึ้นทะเบียนการใช้หม้อน้ำของอุตสาหกรรม*. (ครั้งที่ 1). กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.

ธนิต ดวงมุสิกร์. (2547). *การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้อุ่นน้ำป้อนโดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซร้อนทิ้งจากหม้อน้ำไปใช้อุ่นน้ำป้อน*. กองฝึกอบรมศูนย์วิทยาการอนุรักษ์พลังงาน.

ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2547). *การใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับคืน*. สำนักงานนโยบายและพลังงาน, กระทรวงพลังงาน.

พงศ์ธร จรัญญากรณ์. (2542). *อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. (2536). *อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในงานอุตสาหกรรม*. กรุงเทพมหานคร : ส.เอเชียเพรส

อุทัย ผ่องรัศมี. (2554). *การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด*. คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี : มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี.

เอกอาทิตย์ ปรางมณี. (2555). *การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของ Economizer เพื่อการประหยัดพลังงานของหม้อไอน้ำ*. , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

A. Yumnus Cengel and A. Michael Boles. (2008). *Thermodynamics an Engineering Approach*. New York : Mc Graw-Hill.

Massimo Gobbi. (2011). *Thailand Dioxins and Cabondioxide Reduction on Power and Heat Sectors*. (pp. 11-14). BAT/BFP : Bankok.

N. V. Suryanarayana and Oner Arici. (2003). *Design and Simulation of Thermal System*. New York : Mc Graw-Hill.

P. Chattopadhyoy. (2000). *Boiler Operation Engineering*. New York : Mc Graw-Hill.

P. K. Nag. (2002). *Heat Transfer*. New York : Mc Graw-Hill.

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University