

การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด

Design of Coil – Tube Economizer for Once – Through Boiler

อุทัย ผ่องศรี^{1*}, เสนีย์ ศิริไชย² และสำรวจ อินแบน³

^{1,2} สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

38 หมู่ 8 ต.นาุ้ง อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000 โทร. 081-9399069 E-mail : uthai_mt@hotmail.com

³ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิคนครพนม มหาวิทยาลัยนครพนม 103 หมู่ 3 ต.ขามเฒ่า อ.เมือง จ.นครพนม 48000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดเพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วดูดก๊าซร้อนทิ้งต่อเงื่อนไขที่เหมาะสม สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ซึ่งมีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h จากการวัดอุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้งมีอุณหภูมิสูงถึง 180 องศาเซลเซียส จึงได้ติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด โดยนำก๊าซร้อนทิ้งมาอุ่นน้ำป้อน ให้แก่หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดมีพื้นที่การถ่ายโอนความร้อน 3.55 m^2 ท่อมีความยาว 34 m ก๊าซร้อนไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด และได้ติดตั้งพัดลมดูดก๊าซร้อนทิ้งหลังจากการถ่ายโอนความร้อนให้แก่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด ผลการวิจัยพบว่าที่อัตราการผลิตไอน้ำ 200 kg/h ที่ความเร็วดูดก๊าซร้อนทิ้ง 5.33 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่พื้นผิวท่อขดภายนอก และพื้นที่ผิวภายในท่อเฉลี่ย 54.42 และ $0.89 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความดันลดเฉลี่ย 87.42 และ 0.65 Pa มีประสิทธิภาพ 0.36 ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ 122,500 บาทต่อปี และระยะเวลาคืนทุน 19 เดือน ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับหม้อน้ำแบบให้ความร้อนไหลผ่านทางเดียว

คำสำคัญ: หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว, อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด, ความเร็วก๊าซร้อนทิ้ง

Abstract

The research was to design and develop a coil-tube economizer to investigate the effect of exhaust gas velocity on the performance of the economizer used in a once-through boiler generating steam at a rate of 500 kg/h. The measured temperature of the exhaust gas was 180°C . The coil-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 approximately 3.55 m^2 and 34 m. The hot exhaust gas, moving at 5.33 m/s , entered the cross-flow economizer used to preheat the feeding water of the boiler at a rate of 200 kg/h. The heat transfer coefficients of the tube outer and inner areas are 54.42 and $0.89 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively while the pressure drops for the shell and the tube were 87.42 and 0.65 Pa . The effectiveness of the economizer was 0.36 and the energy savings would amount to 122,500 Baht/year, giving a payback period of around 19 months.

Keywords: once – through boiler, economizer coil tube and velocity hot ai

1. บทนำ

ปัจจุบันหม้อน้ำแบบหลอดน้ำหรือหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 200 – 2000 kg/h มีใช้ในภาคอุตสาหกรรมประมาณ 300 เครื่อง (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2551) การถ่ายโอนความร้อนจะเป็นแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (Once-Through Boiler) ซึ่งในบทความนี้จะกล่าวเฉพาะหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ซึ่งเป็นหม้อน้ำชนิดเปลือกตั้งภายในติดตั้งหลอดน้ำเป็นแบบงอกระบอก ส่วนบนท่อจะมีพื้นที่เก็บไอน้ำ ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ใช้หัวฉีด 2 หัวที่ความดันการฉีด 2 bar และตั้งความดันการใช้ไอน้ำที่ 5 kg/cm^2 จากการใช้เครื่องมือตรวจวัดสมรรถนะหม้อน้ำ (การทำงานปกติ) พบว่าที่ความเร็วความร้อนทั้งที่ปล่องไอเสีย $5.5 - 6.5 \text{ m/s}$ อุณหภูมิความร้อนทั้งอยู่ระหว่าง $180-310$ องศาเซลเซียส และปริมาณความร้อนที่สูญเสียที่ปล่องไอเสียหม้อน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 15-20 (Massimo Gobbi, 2011) และสอดคล้องกับงานวิจัยประยุกต์ (ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2547) ได้นำความร้อนทั้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำแบบหลอดไฟขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 1, 2 และ 3 t/h มาอุ่นน้ำป้อน โดยใช้หม้อน้ำรยยนต์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยให้ความร้อนทั้งไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับหม้อน้ำรยยนต์ ผลการวิจัย พบว่าสมรรถนะหม้อน้ำโดยรวมเพิ่มขึ้น และสามารถประหยัดพลังงานได้ 18,500, 23,000 และ 100,000 บาทต่อปี มีระยะเวลาคืนทุน 2.5, 2.23 และ 0.9 ปี



ภาพที่ 1 ระบบการสูญเสียความร้อนทั้งของหม้อน้ำ

ที่มา : (Massimo Gobbi. (2011))

ผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญกับพลังงานความร้อนทั้งที่ปล่องไอเสียหม้อน้ำ ซึ่งจะนำความร้อนทั้งกลับมาอุ่นน้ำป้อนให้แก่หม้อน้ำโดยผ่านอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (Economizer) จากประโยชน์ดังกล่าวเป็นการจัดการระบบการนำความร้อนส่วนนี้กลับมาใช้ใหม่ซึ่งนับว่ามีความสำคัญยิ่งสำหรับการนำความร้อนทั้งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็กชนิดความร้อนไหลผ่านทางเดียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและเพื่อลดพลังงานความร้อนที่สูญเสียในระบบหม้อน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (ธนิต ดวงมุสิก, 2547) ที่ได้ติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุด ร่วมกับหม้อน้ำแบบหลอดไฟมีอัตราการผลิตไอน้ำ 12 และ 14 t/h ภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนร่วมกับหม้อน้ำ พบว่า อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุด สามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าสู่หม้อน้ำได้

42 องศาเซลเซียส เป็นผลให้เกิดการประหยัดพลังงานได้ 12,207.18 Btu/y และประหยัดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง 2,213,283 บาทต่อปี มีระยะเวลาคืนทุน 8 เดือน ดังนั้น การวิจัยนี้จึงได้ออกแบบอุปกรณ์

อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด (Coil Tube) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน เนื่องจากมีความเหมาะสมกับชนิดของของไหลที่มีความดันคงที่ การออกแบบสามารถทำได้ง่าย ต้นทุนไม่สูงมาก และสามารถนำพลังงานกลับมาใช้ได้อย่างคุ้มค่า อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดที่ออกแบบใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ที่ความดันการใช้งานไอน้ำ ไม่เกิน 5 kg/cm^2 เหตุผลที่เลือกใช้วิธีนี้ เพราะว่ามีน้ำหนักเบาและเหมาะสมกับของไหลในท่อที่มีความดันสูง และเป็นของเหลว ส่วนความร้อนทิ้งที่จะถ่ายโอนความร้อนให้แก่ น้ำที่อยู่ภายในท่อ จะไหลอยู่ในส่วนเปลือกในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดจะต้องคำนึงถึง การเลือกเส้นทางการไหล ซึ่งจะเลือกให้ความร้อนทิ้งไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับท่อ ส่วนเงื่อนไขการออกแบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเปลือกและส่วนท่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ : เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการดูดความร้อนทิ้งออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดที่ความเร็วต่าง ๆ V ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกและท่อ, Q_s, Q_t ต่อความดันตกภายในเปลือกและท่อ, $\Delta P_s, \Delta P_t$ ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกและท่อ, $h_{s,i}, h_{t,o}$ ต่อประสิทธิภาพอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด, $\mathcal{E}$ และเพื่อการวิเคราะห์ความเหมาะสมการลงทุนและการประหยัดพลังงาน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด ใช้คุณสมบัติของความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำและคุณสมบัติของน้ำป้อนของระบบหม้อน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิที่ได้จากการวัดขณะที่หม้อน้ำทำงานปกติดังนี้ $T_{s,i}, T_{s,o}, T_{t,i}, T_{t,o}$ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของน้ำ, U ความร้อนจำเพาะของน้ำ, C_w และอัตราการไหลของน้ำ, $\dot{m}$ ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการออกแบบเรียงตามลำดับสมการ (1) – (4)

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

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

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

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

ผลที่ได้จากการออกแบบ ได้พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน, A_t ของส่วนเปลือกได้แก่พื้นผิวท่อภายนอกและความยาวท่อสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด ซึ่งสมการที่ใช้ในการทดสอบและคุณสมบัติของความร้อนที่อยู่ภายในเปลือกนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิความร้อนทั้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำ ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการทดสอบเรียงตามลำดับสมการ (5) – (10) ดังนี้

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

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

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

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

$$f_s = \left[\frac{0.044 + \frac{0.08 S_L / D_o}{0.43 + 1.13 D_o / S_L}}{(S_T - D_o) / D_o} \right] Re_{s,max}^{-0.15} \quad (9)$$

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

สมการที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของน้ำที่อยู่ภายในท่อ เมื่อน้ำได้รับการถ่ายโอนความร้อนจากความร้อนทั้งของส่วนเปลือก ซึ่งจะมีสมการที่ใช้ในการทดสอบเรียงตามลำดับสมการ (11) – (17) ซึ่งเป็นสมการของ Sieder and Tate ที่ได้ค้นพบจากการทดลอง (วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล, 2536)

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

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

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

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

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

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

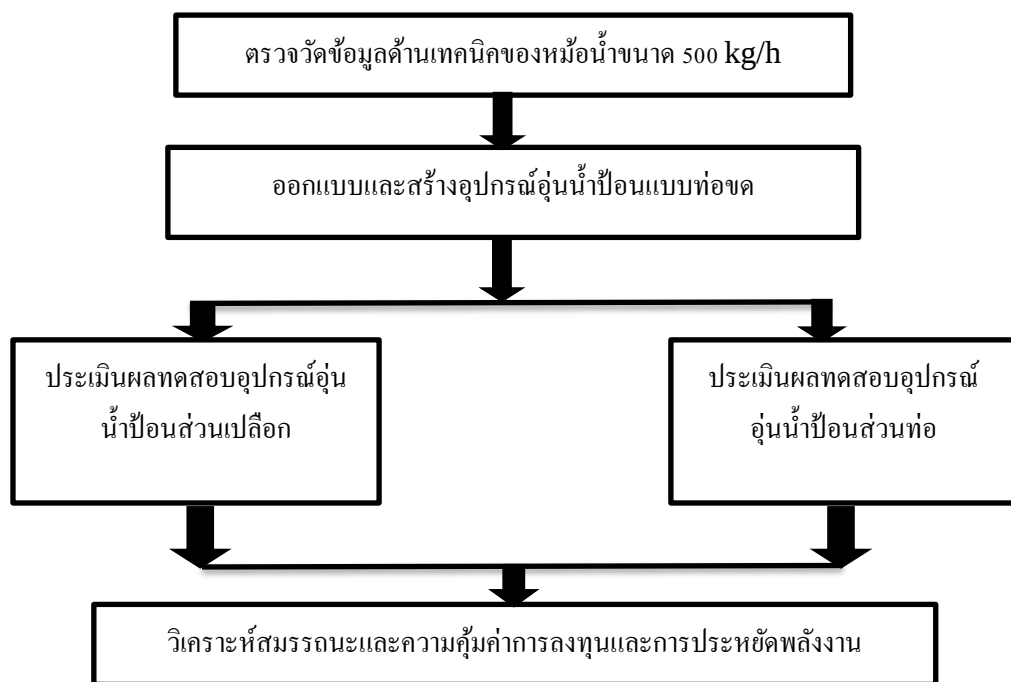
$$\Delta P_t = \frac{f_t N_L L G_t^2}{2000 D_i S_t \phi} \quad (17)$$

ผลที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุดตามสมการ (5) – (10) และ (11) – (17) จะได้สมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุดหรือประสิทธิภาพอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุด, $\mathcal{E}$ ตามสมการ (18) ดังนี้

$$\mathcal{E} = \frac{\dot{m}_s C p_s (T_{s,i} - T_{s,o}) + \dot{m}_t C p_t (T_{t,i} - T_{t,o})}{\dot{m}_t C p_t (T_{s,i} - T_{t,i})} \quad (18)$$

3. การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการตรวจสอบข้อมูลด้านเทคนิคหม้อน้ำแบบหล่อตื้นที่มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h เพื่อการออกแบบ สร้าง ติดตั้ง อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุด ส่วนที่สอง เป็นการวิเคราะห์ส่วนเปลือก ส่วนท่อ ประสิทธิภาพและส่วนที่สาม ความเหมาะสมการลงทุนการประหยัดพลังงานของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุดสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว



ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 การประเมินสมรรถนะหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h

การประเมินสมรรถนะหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีขนาดกำลังการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ที่ความดัน (เกจ) การใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm² ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง และใช้เครื่องมือ

วิเคราะห์สมรรถนะ Visitor – 01 ซึ่งใช้ข้อมูลด้านเทคนิคและข้อมูลที่ได้จากการทำงานจริง (ตารางที่ 1 - 2) มาใช้ในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุด ดังนี้

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

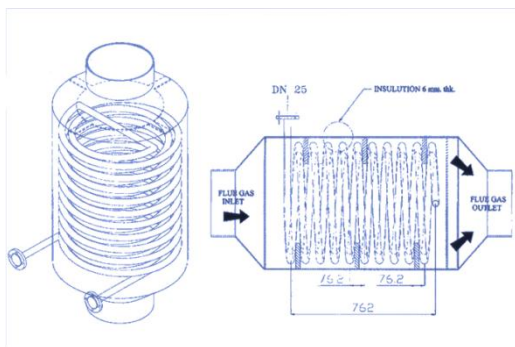
จากข้อมูลด้านเทคนิคนำมาออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุด สำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก

ตารางที่ 2 ข้อมูลได้จากการวัดด้านเทคนิคหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวนำมาออกแบบ

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

ตารางที่ 3 ผลที่ได้จากการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดสำหรับหม้อน้ำแบบให้ความร้อนไหลผ่านทางเดียว

ข้อมูล	ปริมาณ
1. ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม, ΔT_{lm}	98.22 °C
2. ปริมาณความร้อนของน้ำ, Q_c	17.33 kW
3. พื้นที่ผิวส่วนท่อสำหรับการถ่ายโอนความร้อน, A_t	3.55 m ²
4. ความยาวท่อ, L_t	34 m
5. พื้นที่ผิวส่วนเปลือก, A_s	5.67 m ²
6. ความยาวเปลือก, L_s	1.8 m



(ภาพออกแบบ)

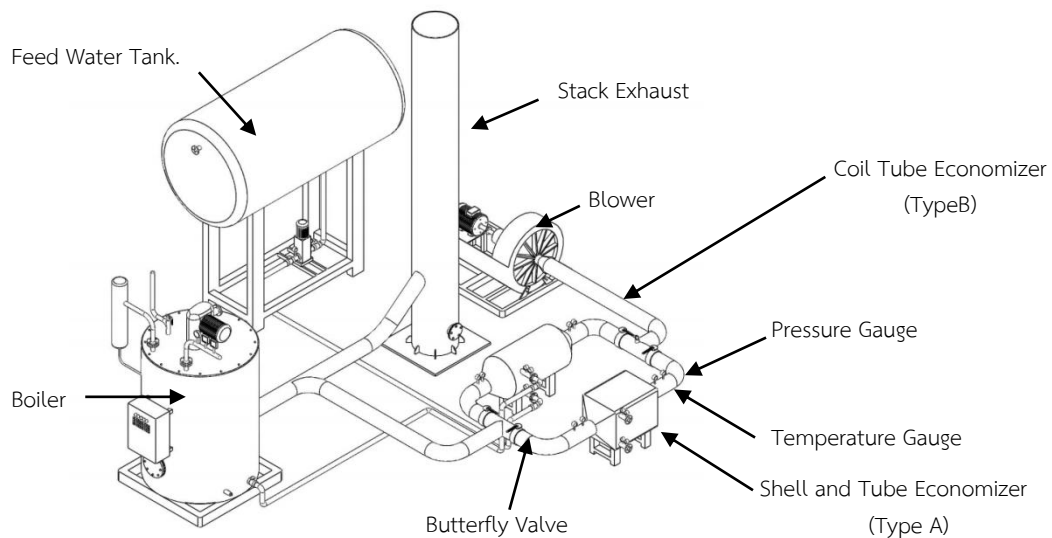


(ภาพของจริง)

ภาพที่ 3 อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดที่ออกแบบและสร้างขึ้น

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดสำหรับหม้อน้ำแบบให้ความร้อนไหลผ่านทางเดียว (Type B)

การติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดโดยให้ความร้อนทั้งไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับท่อ (4 แถว) เมื่อความร้อนทั้งถ่ายโอนความร้อนให้แก่พื้นผิวท่อ (น้ำ) ซึ่งติดตั้งพัดลมดูด (Blower) ช่วยดูดความร้อนทั้งออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด พัดลมดูดใช้มอเตอร์เป็นเครื่องต้นกำลัง ซึ่งมีการควบคุมความเร็ว (f) ในส่วนอุปกรณ์ของระบบได้ติดตั้ง เกจวัดอุณหภูมิแบบกระเปาะทางเข้า - ออก และเกจวัดความดันเข้า - ออก (น้ำและความร้อนทั้ง) และเจาะรูทางเข้า-ออกเพื่อใส่ เครื่องมือวัดสมรรถนะของความร้อนทั้งทั้งสองด้าน



ภาพที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุด (Type B) ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (Once -Through Boiler)

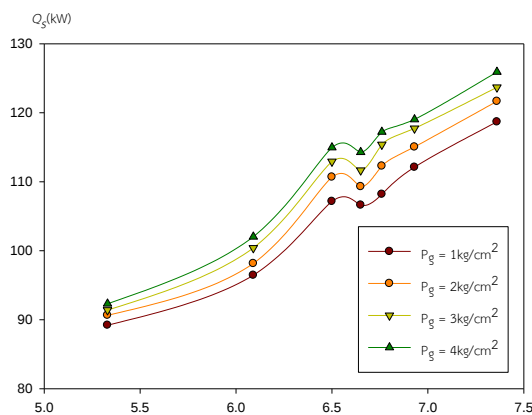
4. ผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุด สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

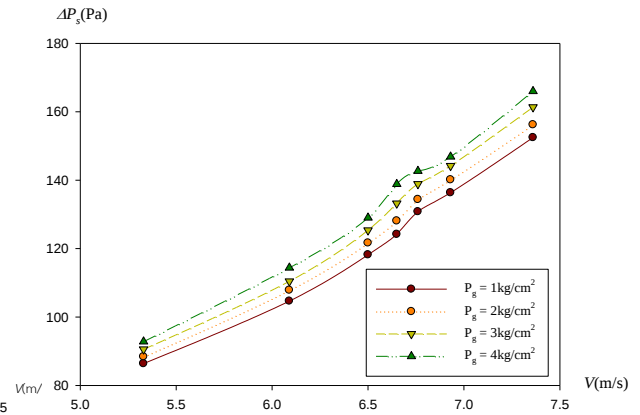
4.1 การวิเคราะห์ส่วนความร้อนภายในเปลือก

การวิเคราะห์ผลส่วนเปลือกที่ความเร็วดูดความร้อนทั้งต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน, ความดันลดภายในเปลือกและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ความดันการใช้ไอน้ำ $1 - 4 \text{ kg/cm}^2$ ดังภาพที่ 5 – 7

ผลการวิเคราะห์ส่วนเปลือกที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง $5.33 - 6.59 \text{ m/s}$ อุณหภูมิก๊าซร้อนทั้งที่ออกจากปล่องไอเสียหม้อน้ำ $258 - 286$ องศาเซลเซียส ที่ความดันไอน้ำ $1 - 4 \text{ kg/cm}^2$ ในขณะที่ก๊าซร้อนทั้งไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับท่อชุด ซึ่งน้ำมีอุณหภูมิ $30 - 34$ องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณความร้อนสูงสุด $99.25 - 111.18 \text{ kW}$ ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุดที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ซึ่งสอดคล้องกับการวัดความเร็วดูดก๊าซร้อนทั้งก่อนการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุดที่วัดความเร็วดูดก๊าซร้อนทั้งได้ $5.5 - 6.5 \text{ m/s}$ ดังภาพที่ 5 ส่วนผลวิเคราะห์ส่วนเปลือกที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง $5.33 - 6.59 \text{ m/s}$ ที่ความดันไอน้ำ $1 - 4 \text{ kg/cm}^2$ น้ำป้อนมีอุณหภูมิ $30 - 34$ องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าความดันลดสูงขึ้น เพราะว่าอัตราการไหลของน้ำป้อนคงที่และการเลือกใช้วัสดุทำท่อชุด (STB35.8) ไม่เหมาะสมกับขนาดของหม้อน้ำในขณะเดียวกันเมื่อมีความเร็วดูดก๊าซร้อนทั้งเพิ่มขึ้นจะเป็นผลเกิดความดันลดเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิน้ำป้อนในท่อชุดก็มีผลต่อความดันลดด้วย ดังภาพที่ 6

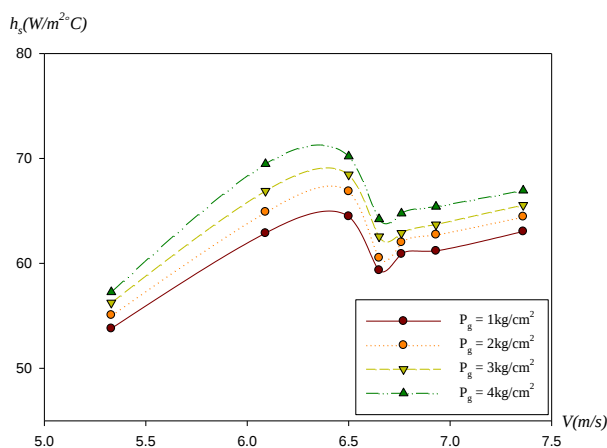


ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทิ้งกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกผลการวิเคราะห์



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทิ้งกับความดันตกภายในเปลือก

ผลการวิเคราะห์ส่วนเปลือกที่ความเร็วดูดก๊าซร้อนทิ้ง 5.33 – 6.59 m/s ความดันใช้น้ำ 1 – 4 kg/cm² อุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้งอยู่ระหว่าง 258 – 286 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงสุดอยู่ระหว่าง 65.53 – 67.25 W/m²°C ให้แก่พื้นที่ผิวภายนอก 3.55 m² ท่อมีความยาว 34 m ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมกับหม้อน้ำขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ดังภาพที่ 7



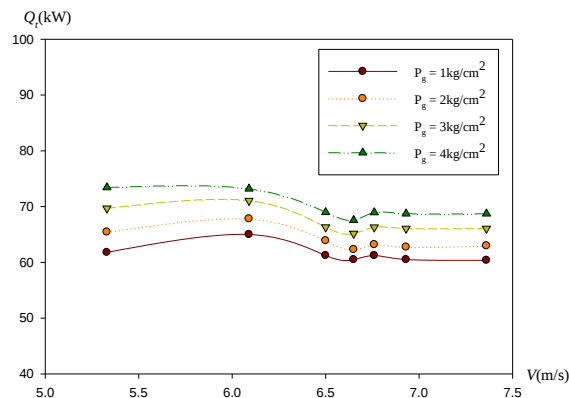
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทิ้งกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือก

จากภาพที่ 5 – 7 สรุปผลการวิเคราะห์อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนส่วนเปลือก ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.33 – 7.36 m/s ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกให้แกพื้นที่ผิวท่อภายนอก, ความดันตกภายในเปลือก และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือก พบว่าที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.33 – 6.59 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนระหว่าง 99.25 – 111.28 kW มีความดันตกอยู่ระหว่าง 87.41 – 108.57 Pa และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 65.53 – 67.25 W/m²K ซึ่งเป็นค่า

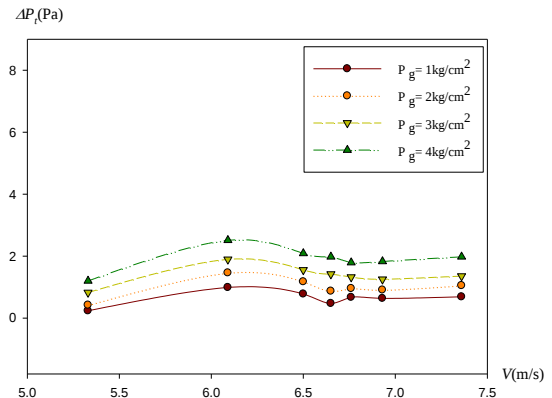
ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน ส่วนเปลือก มีพื้นที่ผิว 5.67 m^2 สำหรับให้ความร้อน เกิดการหมุนวนเพื่อการถ่ายโอนความร้อนให้แก่ท่อ น้ำ ซึ่งค่าดังกล่าวมีความสอดคล้องกับความเร็วดูดความร้อนทั้งก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุด $5.5 - 6.5 \text{ m/s}$ ที่ความดันการใช้ไอน้ำไม่เกิน 5 kg/cm^2 สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีอัตราการผลิตไอน้ำไม่เกิน 500 kg/h ในขณะเดียวกันเมื่อความเร็วดูดความร้อนทั้งเพิ่มขึ้นที่ $6.65 - 7.36 \text{ m/s}$ มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงระหว่าง $110.41 - 122.49 \text{ kW}$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน มีค่าอยู่ระหว่าง $61.76 - 66.07 \text{ W/m}^2\text{K}$ และค่าความดันลดอยู่ระหว่าง $124.55 - 159 \text{ Pa}$ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ และความดันลดสูงตามค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนด้วย เพราะว่าในขณะอุณหภูมิ น้ำป้อนสูงขึ้น $34 - 40$ องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ ก๊าซร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น $267 - 31$ องศาเซลเซียส เป็นผลให้คุณสมบัติของก๊าซร้อนทั้งที่อยู่ภายในส่วนเปลือก สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อน (พงศ์ธร จรรย์ญากรณ์) ทว่าเมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและความดันลดจะสูงขึ้นตามลำดับ

4.2 การวิเคราะห์ส่วนท่อ

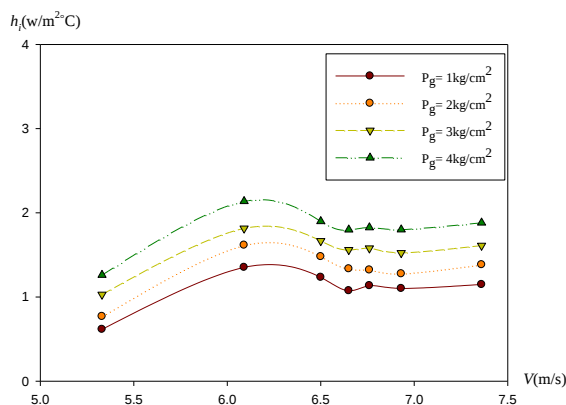
การวิเคราะห์ผลส่วนท่อที่ความเร็วดูดความร้อนทั้งต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ ความดันลดและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน ที่ความดันใช้ไอน้ำ $1 - 4 \text{ kg/cm}^2$ ดังนี้ ผลการวิเคราะห์ส่วนท่อที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง $5.33 - 6.08 \text{ m/s}$ อุณหภูมิ น้ำป้อนอยู่ระหว่าง $30 - 34$ องศาเซลเซียส อัตราการไหลของน้ำคงที่ ที่ความดันการใช้ไอน้ำ $1 - 4 \text{ kg/cm}^2$ พบว่าได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในท่อเฉลี่ยสูงสุด $67.33 - 69.26 \text{ kW}$ และที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง $6.55 - 7.36 \text{ m/s}$ จะได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลงเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $65.09 - 64.53 \text{ kW}$ เพราะว่าอัตราการไหลของน้ำไม่คงที่ และอุณหภูมิของน้ำป้อนที่ไหลเข้ามาในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนส่วนท่อมีอุณหภูมิต่ำ ดังภาพที่ 8 ส่วนผลการวิเคราะห์ความดันลดภายในท่อที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง $5.33 - 7.36 \text{ m/s}$ อุณหภูมิ น้ำป้อน $30 - 40$ องศาเซลเซียส ความดันการใช้ไอน้ำ $1 - 4 \text{ kg/cm}^2$ และอุณหภูมิความร้อนทั้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำ $258 - 286$ องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าความดันลดภายในท่อเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อน (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2536) เมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง ความดันลดจะต้องเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 9 และการวิเคราะห์ผลสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง $5.33 - 7.36 \text{ m/s}$ อุณหภูมิ น้ำป้อนเข้าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนอยู่ระหว่าง $30 - 40$ องศาเซลเซียส อุณหภูมิความร้อนทั้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำ $258 - 286$ องศาเซลเซียส ที่ความดันการใช้ไอน้ำ $1 - 4 \text{ kg/cm}^2$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนเพิ่มขึ้นในขณะที่อัตราการไหลของน้ำคงที่และความเร็วดูดก๊าซร้อนทั้งอยู่ระหว่าง $5.33 - 6.59 \text{ m/s}$ เมื่ออัตราการไหลของน้ำเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ น้ำต่ำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนลดลง เมื่อความเร็วดูดก๊าซร้อนทั้งสูงขึ้น ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทั้งกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทั้งกับความดันลด

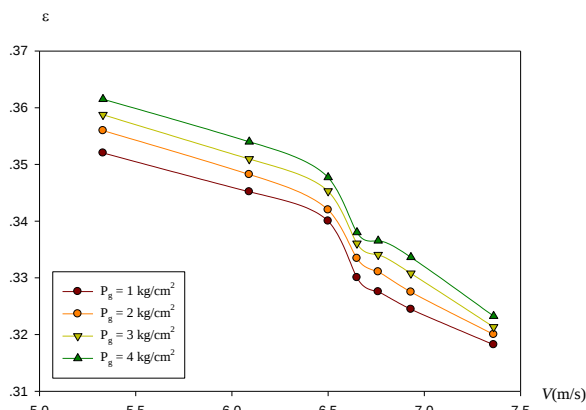


ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทั้งกับสัมประสิทธิ์ถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ

จากภาพที่ 8 – 10 สรุปผลการวิเคราะห์ห่ออุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนส่วนท่อ ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.33 – 7.36 m/s และอุณหภูมิน้ำป้อนอยู่ระหว่าง 30 – 40 องศาเซลเซียส ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนที่น้ำได้รับผ่านพื้นผิวท่อ ความดันลดภายในท่อและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนพบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.33 – 6.08 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 69.29 kW มีความดันลดต่ำสุดเฉลี่ย 1.76 Pa และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 1.72 W/m²K ซึ่งเป็นเป็นค่าที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด (ส่วนท่อ) ที่มีพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน 3.55 m² ท่อมีความยาว 34 m สำหรับการถ่ายโอนความร้อนระหว่างความร้อนทั้งกับน้ำที่อยู่ภายในท่อซึ่งอุณหภูมิน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 40 – 45 สอดคล้องกับงานวิจัย (อุทัย ผ่องศรี, 2554) ได้ออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว เมื่อนำความร้อนทั้งถ่ายโอนความร้อนให้แก่ น้ำ พบว่าอุณหภูมิน้ำป้อนภายในท่อ สูงขึ้นร้อยละ 45 – 50 ซึ่งประหยัดค่าเชื้อเพลิงได้ 78,843.14 บาทต่อปี

4.3 การวิเคราะห์ผลสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

การวิเคราะห์ที่ได้ประสิทธิภาพอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อน ไหลผ่านทางเดียวต่อความเร็วในการดูดความร้อนทั้งที่ความดันต่าง ๆ ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการดูดความร้อนทั้งที่ประสิทธิภาพอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด

สรุปผลการวิเคราะห์อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.33 – 7.36 m/s กับประสิทธิภาพ อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด พบว่า มีประสิทธิภาพอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด สูงสุดเฉลี่ย 0.35 - 0.36 เมื่ออุณหภูมิน้ำป้อนอยู่ระหว่าง 30 – 32 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำป้อนคงที่ และมีความเร็วดูดความร้อนทั้งระหว่าง 5.33 – 6.08 m/s ที่ความดันการใช้ไอน้ำ 1 – 4 kg/cm² ในกรณีมีความเร็วดูดความร้อนทั้งเพิ่ม มีการจ่ายไอน้ำไปใช้งานน้ำป้อนจะถูกส่งเข้ามาในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนใหม่ อุณหภูมิน้ำป้อนอยู่ระหว่าง 36 – 40 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 6.59 – 7.36 m/s สมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนลดลง เพราะอัตราการใช้ไอน้ำของน้ำป้อนไม่คงที่ อุณหภูมิน้ำป้อนต่ำ และความเร็วดูดความร้อนทั้งเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับอุณหภูมิน้ำป้อนที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่หม้อน้ำและเมื่ออัตราการใช้ไอน้ำของน้ำป้อนคงที่

4.4 การวิเคราะห์ความเหมาะสม ความคุ้มค่าและการประหยัดพลังงานการใช้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด

ตารางที่ 3 วิเคราะห์ความเหมาะสมอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

ความเหมาะสมการใช้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด	
รายการ	หน่วย
1. ชั่วโมงการทำงาน	6 h
2. ราคาน้ำมันดีเซล	30 Baht/liters
3. ค่าพลังงานที่ประหยัดได้	31.40 kW
4. ค่าพลังงานที่ประหยัดได้	45 Baht /h

ตารางที่ 3 วิเคราะห์ความเหมาะสมอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (ต่อ)

ความเหมาะสมการใช้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด	
รายการ	หน่วย
5. ค่าพลังงานที่ประหยัดได้	122,500 Baht /year
6. ราคาสร้างเครื่อง	190,000 Baht
7. ค่าบำรุงรักษา	15,000 Baht
8. ระยะเวลาคืนทุน	1.6 year

ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์การประหยัดพลังงานและระยะเวลาคืนทุนของการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวจากต้นทุนการสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดและการบำรุงรักษาใช้งบประมาณ 205,000 บาท ในกรณีเดินเครื่องวันละ 6 ชั่วโมง และใช้น้ำมันดีเซลราคาเฉลี่ย 30 บาท พบว่า อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดสามารถประหยัดพลังงานได้ 31.40 kW เมื่อคิดค่าพลังงานเชื้อเพลิงประหยัดได้ 122,500 บาทต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุน 1.6 ปี สอดคล้องกับงานวิจัย (ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2547) ได้นำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำแบบหลอดไฟขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 1, 2 และ 3 t/h มาอุ่นน้ำป้อนโดยใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ผลการวิจัยพบว่าหม้อน้ำที่มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 1 t/h สามารถประหยัดพลังงานได้ 18,500 บาทต่อปี มีระยะเวลาคืนทุน 2.5 ปี ซึ่งถ้าเป็นหม้อน้ำขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 3 t/h สามารถประหยัดพลังงานได้ 100,000 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 0.9 ปี จะเห็นว่าถ้าเป็นหม้อน้ำขนาดเล็กจะใช้ระยะเวลาคืนทุนมากกว่า หม้อน้ำขนาดใหญ่ เพราะว่าหม้อน้ำขนาดเล็กมีอัตราการผลิตไอน้ำน้อยกว่า

5. สรุป

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว กับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง พบว่าการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดโดยใช้ข้อมูลด้านเทคนิคของหม้อน้ำขนาด 500 kg/h ได้พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนส่วนท่อและส่วนเปลือก 3.55 m² และ 5.67 m² ท่อมีความยาว 34 m และเปลือกมีความยาว 1.8 m ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.08 – 6.59 m/s อุณหภูมิความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสีย 258 – 286 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของน้ำคั่งที่ ที่อุณหภูมิ น้ำป้อน 32 – 34 องศาเซลเซียสความดันใช้ไอน้ำ 1 – 4 kg/cm² ได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกและภายในท่อ 99.25 – 111.18 และ 67.33 – 69.26 kW สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยภายในเปลือกและภายในท่อ 65.53 – 67.25 และ 1.76 – 1.34 W/m²K ความดันลดเฉลี่ยภายในเปลือกและภายในท่อ 108.57 – 124.55 และ 1.76 – 1.39 Pa และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดมีสมรรถนะเฉลี่ยสูงสุด 0.35 – 0.36 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ส่วนความคุ้มค่าการประหยัดพลังงาน สามารถประหยัดพลังงานได้ 122,500 บาทต่อปี เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์

สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก สำหรับต้นทุนการลงทุน 205,000 บาท จะพบว่าได้ค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ร้อยละ 46.52 เมื่อเปรียบกับอัตราดอกเบี้ยของธนาคาร เพื่อกลุ่มอุตสาหกรรมร้อยละ 10 จะเห็นว่าผลตอบแทนภายในสูงกว่า แสดงว่าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดมีความเหมาะสมต่อการลงทุน ถึงแม้ว่าจะเป็นหม้อน้ำขนาดเล็กและใช้ระยะเวลาคืนทุนนานถึง 1.6 ปี

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด ควรเพิ่มอัตราความเร็วของการไหลของน้ำ ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น

6.2 ถ้าสามารถเพิ่มพื้นที่การรับความร้อน ส่วนท่อ (Tube) อาจจัดทำโดยการใส่ครีป ซึ่งจะช่วยให้อัตราการถ่ายโอนความร้อน และค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

6.3 ควรหาวิธีการที่เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของความร้อนทิ้ง ซึ่งอาจจะใช้วิธีใช้สารเคลือบท่อซึ่งและชนิดของวัสดุที่ใช้ ซึ่งต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม จะต้องวิจัยต่อไป

6.4 ต้นทุนการผลิต ถ้าสามารถลดได้ จะทำให้ค่าประหยัดเพิ่มขึ้นและมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้การลงทุนนั้นคุ้มค่าสมควรแก่การลงทุน

7. บรรณานุกรม

เกษม เสรีภาพสกล. (2547). ระบบการนำความร้อนกลับมาใช้ของน้ำทิ้งหม้อน้ำ. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

กฎกระทรวง. (2549). กำหนดมาตรฐานความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อน้ำ. กระทรวงอุตสาหกรรม : ผู้ประกาศ.

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (2551). การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของหม้อน้ำในอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2550). เทคนิคการนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ใหม่. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.

กองฝึกอบรม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2550). เทคนิคการนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ใหม่. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

จตุรงค์ สมตระกูล. (2550). รายงานการวิจัยเรื่องการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของระบบความร้อนทิ้งกลับคืน. กรุงเทพฯ: คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

จรัส จิรวินุลย์. (2553). หม้อไอน้ำ. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.

ณัฐ ธารยศ และทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2549). รายงานการวิจัยเรื่องอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการนำความร้อนทิ้งจากอากาศร้อนลอยตัวอย่างธรรมชาติกลับมาใช้ใหม่. เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2547). รายงานวิจัยเรื่องการใช้หม้อไอน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับคืน. กรุงเทพฯ: สำนักงานนโยบายและพลังงาน, กระทรวงพลังงาน.

- ทวีศักดิ์ ทวีวิทยาการ. (2547). รายงานการวิจัยเรื่องการออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อความร้อน. เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ธนากร ณ พัทลุง และคณะ. (2550). รายงานการวิจัยเรื่องการนำความร้อนจากปล่องไอเสียมาอุ่นน้ำป้อนในงานอุตสาหกรรม (กรณีศึกษา). กรุงเทพฯ: กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- ธนิต ดวงมุสิก. (2547). การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้อุ่นน้ำป้อนโดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซร้อนทิ้งจากหม้อน้ำไปใช้อุ่นน้ำป้อน. กองฝึกอบรมศูนย์วิทยาการอนุรักษ์พลังงาน.
- ธนัญญ์ เอื้อภราดร. (2547). รายงานการวิจัยเรื่องการนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ : กรณีศึกษา บริษัทน้ำตาลราชบุรี. กรุงเทพฯ: สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษา สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- บริษัทไทยอุตสาหกรรมอาหาร จำกัด. (2550). การนำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำมาอุ่นน้ำป้อน. กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- พงศ์ธร จริญญากรณ์. (2542). อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- โยชิฮิโกะ นาคามูระ. (2543). การประหยัดพลังงานความร้อนในอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย - ญี่ปุ่น.
- วิชัย พงษ์ธาราธิกุล. (2539). ผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ. กรุงเทพฯ: ธวิพัฒน์.
- วิวัฒน์ ตัณตะพานิชกุล. (2536). อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: ส.เอเชียเพรส
- ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และสมพงษ์ พิเชษฐ์ภิญโญ. (2541). เทคนิคการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์ทรัพยากรฝึกอบรมเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. (2547). การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
- สุรพล รูปาน, ญันท์ เทศยปนนท์ และทวีวัฒน์ สุภารส. (2551). การวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ. บทความวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย. (2551). สถิติการขอขึ้นทะเบียนการใช้หม้อน้ำของอุตสาหกรรม. (ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อุทัย ผ่องศรี. (2554). การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อ. เพชรบุรี: คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี.
- A. Yumnus Cengel and A. Michael Boles. (2008). *Thermodynamics an Engineering Approach*. New York : Mc Graw-Hill.
- E. V. Cavasen. (editor). (1979). *Process heat exchanger*. New York : McGraw-Hill.
- Frass P. (1989). *Heat Exchanger Design*. 2nd ed. New York : John Wiley and Sons, Inc.

- L. Cabeza – Gome, H. A. Navarro, S. M. Godoy and J. M. Saiz – Jabardo. (2006). **A New Cross-Flow Thermally Efficiency Heat Exchanger Flow Arrangement**. Universidade de Sao Paulo Brazil, and Universidade Estadual Spain.
- M. Akyurt, N. J. Lamfon, Y. S. H. Najjar, M. H. Habeebullan and T. Y. Alp. (2010). **Modeling of Waste Heat Recovery by Leaped Water-Insteel Heat Pipes**. King Abdulaziz University Saudi Arabia.
- 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.
- S. Ramchandran, P. Kalaichelvi and S. Sundaram. (2006). **Heat Transfer Studies for Two Phase Flow in a Spiral Plate Heat Exchanger**. National Institute of Technology. Tamilnady India.
- Somkiat Boonnasa. (2007). **The Effect of Waste Heat Recovery Efficiency on the Cost Reduction of the Electric Generation Fueled by a Paddy Husk**. King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok.
- Thai Support Engineering. (2010). **Standards of Mechanical Engineering Designs**. [online]. Available HTTP : <http://www.seddesigns.com/webboard/index.php> on 2/07/2011
- The Natural gas boiler burner consortium. (2011). **Boiler Efficiency**. [online]. Available HTTP : http://cleanboiler.org/eff_Improve/efficiency/Index_boiler_efficiency.asp on 2/07/2011
- V. Gannapathy. (2005). **Heat Recovery Stean-Generator for Change Cycle Application**. B. heil International power technology palo alto california.
- Xian – Guo Ma and Zhi – Hang Chen. (1997). **Heat Recovery From the Staring Vessel of a Once-Through Boiler System**. University of Shanghai China.
- Y. Suzve, K. Morimoto, N. Shikazano, Y. Suzuki and N. Kasagi. (2006). **High Performance Heat Exchanger With Oblique – Wave Wall**. Interwadianal heat transfer sydney australia.