



## อุปกรณ์อุณหภูมิต่ำแบบเปลือกและท่อ ชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

### Rectangular in Twisted Tape Economizer Shell and Tube

อุทัย ผ่องรัศมี<sup>1\*</sup> เสนีย์ ศิริไชย<sup>1</sup> อนุชา สายสร้อย<sup>1</sup> และ สำรจ อินแบน<sup>2</sup>

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอผลกระทบ การใส่แผ่นบิดอลูมิเนียมชนิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ในอุปกรณ์อุณหภูมิต่ำแบบเปลือกและท่อ ที่ใช้ความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ถ่ายโอนความร้อนให้แก่พื้นที่ผิวท่อ  $3.55 \text{ m}^2$  ท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $0.033 \text{ m}$  ความยาวท่อ  $34 \text{ m}$  โดยถ่ายโอนความร้อนให้แก่พื้นที่ผิวภายในท่อ ซึ่งภายในท่อใส่แผ่นบิดอลูมิเนียมที่มีสัดส่วนการบิด ( $y/w$ ) เท่ากับ 3 แผ่นบิดได้ตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมมีพื้นที่รวม  $0.09 \text{ m}^2$  ผลการวิจัยพบว่า ที่ความเร็วจุดความร้อนทิ้ง  $5 \text{ m/s}$  ได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนภายนอกและภายในท่อ  $429$  และ  $212.85 \text{ kW}$  มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน  $5,470$  และ  $24.82 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$  มีความดันลด  $28.77$  และ  $5.34 \text{ Pa}$  และอุปกรณ์อุณหภูมิต่ำแบบเปลือกและท่อที่มีสมรรถนะ  $0.60$  สามารถประหยัดพลังงานได้  $136,084.44$  บาทต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุน  $1.1$  ปี ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ  $500 \text{ kg/h}$  ที่ความดันใช้ไอน้ำไม่เกิน  $7 \text{ kg/cm}^2$

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี 38 หมู่ 8 ต.นาุ้ง อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000

<sup>2</sup>มหาวิทยาลัยนครพนม 103 หมู่ 3 ต.ขามเฒ่า อ.เมือง จ.นครพนม 48000

\*Corresponding Author; E-mail: Uthai\_mt@hotmail.com

## ABSTRACT

This paper presents the effects of insertion of twisted tape on heat transfer performance a shell-and tube heat exchanger recovering a waste heat from an once-through boiler. The heat exchanger consisted of tube of 0.033 m outside diameter and 34 m total length, corresponding to total heat transfer area of 3.55 m<sup>2</sup>. The twisted-tape with rectangular-shape hole with twist ratio (y/w) of 3 and total area of 0.09 m<sup>2</sup> was inserted in the heat exchange tube. As revealed by the experiential results, at exhaust gas speed of 5 m/s, the heats of 429 kW and 212.82 kW were found at outer and inner surfaces of tube, respectively, ensuring the heat transfer coefficients of 5,470 W/m<sup>2</sup>°C and 24.82 W/m<sup>2</sup>°C and corresponding pressure drops were 28.77 Pa and 5.34 Pa. The performance of the heat exchange was 0.6. As a result, energy saving cost of 136,084 Baht/year was achievable, leading to quite short simple payback period of 1.1 year. These operating conditions were recommended/suitable for the once-through boiler generating steam at 500 kg/h at the maximum pressure of 7 kg/cm<sup>2</sup>

**คำสำคัญ:** หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม การประหยัดพลังงานของหม้อน้ำ

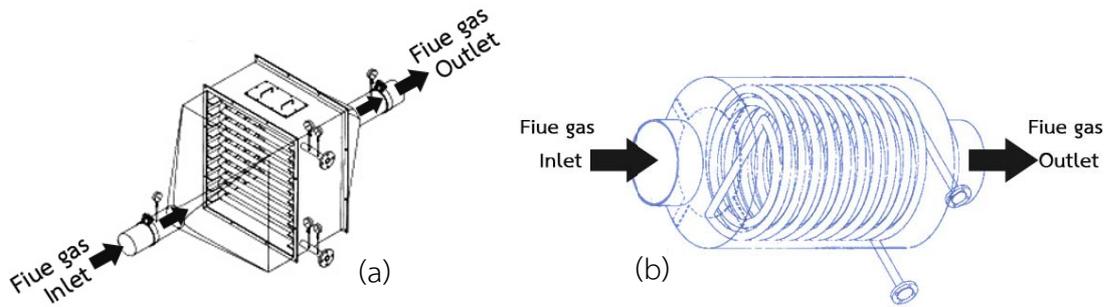
**Keyword:** Once-through boiler, Economizer shell and tube with twisted tape, Energy saving cost

## บทนำ

การนำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ที่ความดันการใช้ไอน้ำสูงสุด 7 kg/cm<sup>2</sup> นำมาอุ่นน้ำป้อนให้แก่หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของศูนย์วิจัยพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ที่ได้ทำการวิจัย (อุทัย, 2553; 2555) การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชนิดรูปที่ 1(b) และการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ดังรูปที่ 1(a) โดยให้ความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับกลุ่มท่อทั้ง 2 แบบ หลังจากให้ความร้อนทิ้งถ่ายโอนความร้อนให้แก่ กลุ่มท่อทั้ง 2 แบบแล้ว จะมีพัดลมดูดความร้อนทิ้งออกไปยังปล่องไอเสียหม้อน้ำ ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนทั้ง 2 แบบ ใช้เงื่อนไขการออกแบบเดียวกัน

ผลการวิจัยพบว่า อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อมีประสิทธิภาพ 0.40 และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชนิดมีประสิทธิภาพ 0.36 สรุปว่า อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อที่มีสมรรถนะสูงกว่าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชนิด ซึ่งมีความเหมาะสมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ที่มีความดันใช้ไอน้ำสูงสุด 7 kg/cm<sup>2</sup> จากผลการวิจัยของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะพัฒนาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อให้มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น โดยทำการใส่แผ่นบิดลู่มีเนียมภายในท่อซึ่งแต่ละช่วงการบิดจะตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2 เพื่อให้ไอน้ำที่อยู่ภายในท่อเกิดการหมุนควง ซึ่งจะเป็นผลให้อัตราการ

ถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang et al. (2007) ได้ทำการศึกษา ทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในหลอดที่สอดใส่แผ่นบิดแบบตัดครึ่งแถบสี่เหลี่ยมในแนวของการไหล โดยมีอัตราส่วนการบิด 1.56 1.88 และ 2.81 ที่เลขเรย์โนลด์ 5000–25000 พบว่า แผ่นบิดแบบตัดครึ่งแถบสี่เหลี่ยมในแนวขวางการไหล สามารถเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนได้ 250–480% เมื่อเทียบกับท่อเปล่าและให้ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 1.25–1.67 เมื่อเทียบกับแผ่นบิดแบบธรรมดา



รูปที่ 1 การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (a) แบบเปลือกและท่อ และ (b) แบบท่อขด



รูปที่ 2 ลักษณะแผ่นบิดตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่อยู่ภายในท่อ

## วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม และการวิเคราะห์ความเหมาะสมการประหยัดพลังงานสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ที่ความดันการใช้ไอน้ำสูงสุด 7 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งใช้ข้อมูลด้านเทคนิคของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว สำหรับการออกแบบงานวิจัยซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

### 1. ทฤษฎี

การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ใช้ความร้อนทั้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำ แบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวขนาด 500 kg/h จากการทดสอบวัดค่าขณะที่หม้อน้ำทำงานปกติดังนี้  $T_{s,i}$ ,  $T_{s,o}$ ,  $T_{t,i}$ ,  $T_{t,o}$  สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของน้ำ,  $C_w$  และอัตราการไหลของน้ำ,  $\dot{m}$  และแผ่นบิดอลูมิเนียม โดยกำหนดสัดส่วนการบิด ( $y/w$ ) ในแต่ละช่วงการบิดตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการออกแบบเรียงตามลำดับสมการ (1)–(4) ดังนี้

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

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

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

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

ผลที่ได้จากการออกแบบ ได้พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนของส่วนเปลือก โดยให้ความร้อนทิ้งไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับกลุ่มท่อ การทดสอบเก็บข้อมูลส่วนเปลือก จะใช้ข้อมูลจากการปฏิบัติจริง แล้วนำค่าที่วัดผลการทดสอบมาคำนวณวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังสมการ (5)–(10) ดังนี้

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

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

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

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

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

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

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ส่วนท่อชนิดใส่แผ่นบิดลูมิเนียมซึ่งมีส่วนการบิด ( $y/w$ ) เท่ากับ 3 และตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม เมื่อน้ำได้รับการถ่ายโอนความร้อนจากความร้อนทิ้งของส่วนเปลือกจะมีสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาตัวแปรเรียงตามลำดับสมการ (11)–(17) ดังนี้

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

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

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

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

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

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

$$\Delta P_t = \frac{f_t N_L L G_t^2}{Re_t} \quad (17)$$

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ตามสมการ (5)–(10) และ (11)–(17) จะได้สมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนหรือประสิทธิภาพ อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม,  $\mathcal{E}$  ตามสมการ (18) ดังนี้

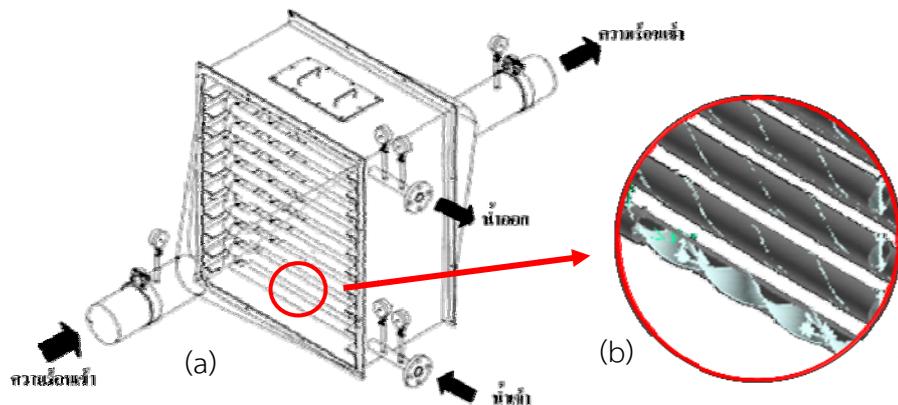
$$\mathcal{E} = \frac{\dot{m}_s C_{p_s} (T_{s,i} - T_{s,o}) + \dot{m}_t C_{p_t} (T_{t,i} - T_{t,o})}{\dot{m}_t C_{p_t} (T_{s,i} - T_{t,i})} \quad (18)$$

## 2. อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม วัสดุที่ใช้เป็นเหล็ก STB 35.8 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.033 m มีความหนา 0.004 m มีความยาว 34 m จำนวน 50 กลีบ ในแต่ละกลีบใช้ท่อมีความยาว 0.75 m ลักษณะการวางท่อเป็นแบบแถวเรียง 5 แถวนอน 10 แถวตั้ง ซึ่งมีระยะห่างระหว่างท่อแนวนอน 0.072 m และระยะห่างระหว่างแถวตั้ง 0.076 m ภายในท่อใส่แผ่นบิดอลูมิเนียมซึ่งมีการตัดพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 3 แห่งต่อ 1 แผ่นบิด ซึ่งมีพื้นที่ตัดรวม 0.09 m<sup>2</sup> สัดส่วนการบิด ( $y/w$ ) เท่ากับ 3 ตลอดความยาวท่ออุ่นน้ำป้อนตามรูปที่ 2

### 2.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (รูปที่ 3(a) และ (b)) ติดตั้งร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (once-through boilers) ที่มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ที่ความดันการใช้ไอน้ำสูงสุด 7 kg/cm<sup>2</sup> โดยใช้ความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับกลุ่มท่อ ซึ่งมีพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนรวม 3.55 m<sup>2</sup> (ภายนอก) พื้นที่แผ่นบิดรวม 0.56 m<sup>2</sup>



รูปที่ 3 (a) อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ (b) ลักษณะการวางท่อที่ใส่แผ่นบิด

### 2.2 วิธีการทดลอง

- อุณหภูมิน้ำป้อน 30–40 องศาเซลเซียส
- ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5–7 m/s ( $f = 3\text{--}7$  Hz)

- อุณหภูมิความร้อนทั้ง 250–300 องศาเซลเซียส
- ความดันใช้ไอน้ำ 1–4 kg/cm<sup>2</sup>
- บันทึกผลการทดสอบ  $T_{s,i}, T_{s,o}, T_{t,i}, T_{t,o}, \dot{m}_s, \dot{m}_t, P_s, P_t, V_s, V_t, CO_2, CO, O_2, \eta_b, \lambda$  และ Loss (ก่อนและหลังการทดสอบอุปกรณ์ไอน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อฯ)

### 2.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในสภาวะการทำงานหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่อัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ความดันการใช้ไอน้ำ 7 kg/cm<sup>2</sup> อุณหภูมิไอน้ำป้อน 30–40 องศาเซลเซียส สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ขณะทำงานปกติได้ดังนี้ ความเร็วความร้อนทั้ง 5.0–6.5 m/s อุณหภูมิความร้อนทั้งที่ปล่อยไอเสียหม้อน้ำ 250–300 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของหม้อน้ำ 88.97% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 9.75% ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 7.25% ก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการสันดาป 6.45% และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 31.50 L/h เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ไอน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว โดยให้ความร้อนทั้งถ่ายโอนความร้อนภายนอกและภายใน ( $Q_s, Q_t$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน ( $h_s, h_t$ ) ค่าความดันลด ( $\Delta P_s, \Delta P_t$ ) เลขเรย์โนลด์ ( $Re_s, Re_t$ ) เลขนัสเซลท์ ( $Nu_s, Nu_t$ ) และสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อน ( $\varepsilon$ ) ซึ่งมีรายละเอียดสมการวิเคราะห์ส่วนเปลือก (ก๊าซร้อน) ตามสมการ (5)–(10) และมีสมการที่ใช้วิเคราะห์ส่วนท่อที่ใส่แผ่นบิดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (น้ำ) ตามสมการ (11)–(17)

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ อัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกและภายในท่อ ตามสมการ (5)–(10) และ (11)–(15) จะนำมาวิเคราะห์หาสมรรถนะหรือประสิทธิภาพ ( $\varepsilon$ ) อุปกรณ์ไอน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ตามสมการ (18)

## ผลการวิจัย

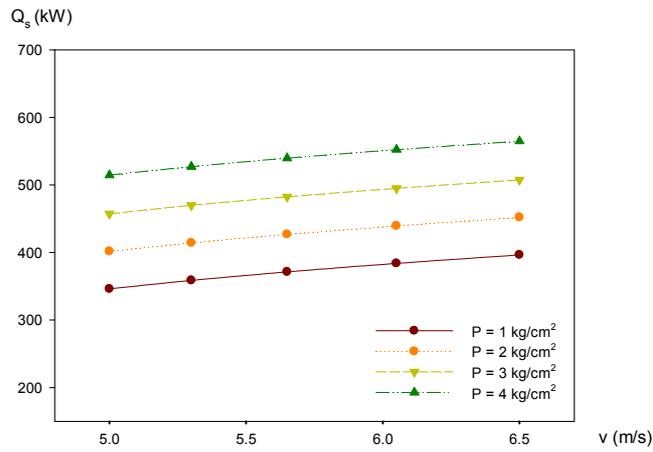
### 1. ผลการวิเคราะห์ส่วนเปลือก (shell)

ที่ความเร็วดูความร้อนทั้ง 5.00–6.50 m/s ที่ความดันการใช้ไอน้ำ 1–4 kg/cm<sup>2</sup> อุณหภูมิไอน้ำป้อน 30–40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลของน้ำ 0.138 kg/s พบว่า ที่ความเร็วดูความร้อนทั้ง 5.00 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนในส่วนเปลือกเฉลี่ย 429.90–442.46 kW ดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นช่วงที่ให้ความร้อนสูงสุดและสอดคล้องกับการทำงานของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่ทำงานเดินเครื่องปกติ

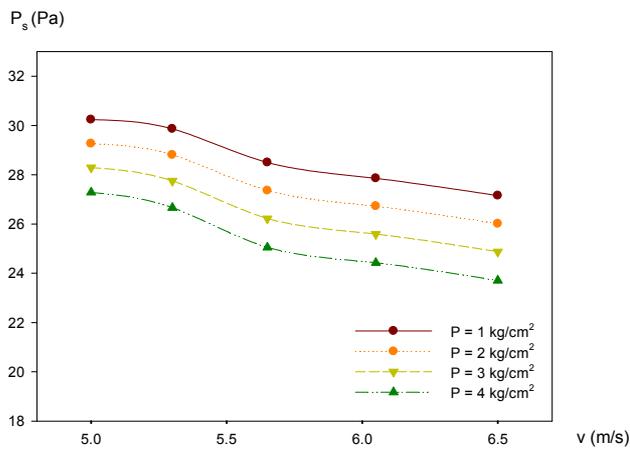
จากรูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ส่วนเปลือกที่ความเร็วดูความร้อนทั้ง 5.00–6.50 m/s ที่ความดันใช้ไอน้ำ 1–4 kg/cm<sup>2</sup> อุณหภูมิไอน้ำป้อน 30–40 องศาเซลเซียส พบว่า ที่ความเร็วดูความร้อนทั้ง 5.00 m/s มีความดันลดในส่วนเปลือกเฉลี่ย 28.77–28.27 Pa เมื่อมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงความดันลดก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่ออัตราการโอนความร้อนลดลงความดันลดก็จะลดลง เพราะความเร็วดูความร้อนทั้งสูงขึ้น

รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ส่วนเปลือกที่ความเร็วดูความร้อนทั้ง 5.00–6.50 m/s ที่ความดันใช้ไอน้ำ 1–4 kg/cm<sup>2</sup> อุณหภูมิความร้อนทั้งอยู่ระหว่าง 220.5–250.3 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความเร็วดูความร้อนทั้ง 5.00 m/s จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกสูงสุด 5.47 kW/m<sup>2</sup>°C เพราะว่า อุณหภูมิของน้ำป้อนที่

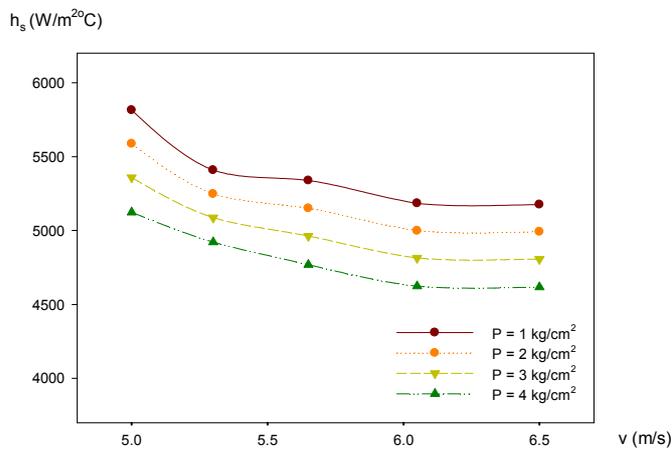
เข้ามาในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนฯ มีอุณหภูมิต่ำ เป็นผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้นในช่วงความเร็วดูดความร้อนที่ต่ำ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทั้งกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทั้งกับความดันลดภายในเปลือก



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทั้งกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือก

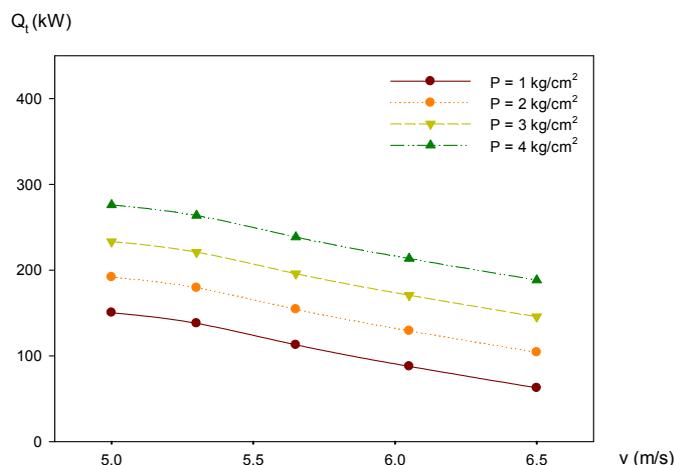
สรุปผลการวิเคราะห์อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นปิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00–6.50 m/s ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือก ความดันลดภายในเปลือก และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือก พบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 429.90 kW มีความดันลด 28.77 Pa และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน 5.471 kW/m<sup>2</sup>°C ต่อพื้นที่ผิวเปลือก 5.17 m<sup>2</sup> เพื่อให้เกิดการหมุนวนสำหรับการถ่ายโอนความร้อนให้แก่ น้ำที่ผ่านพื้นที่ผิวท่อ (ภายนอก-ภายใน) ซึ่งค่าดังกล่าวมีความสอดคล้องกับความเร็วดูดความร้อนที่ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ก่อนติดตั้ง อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนฯ 5.00–6.50 m/s ที่ความดันใช้น้ำไม่เกิน 5 kg/cm<sup>2</sup> สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ในขณะเดียวกันเมื่อความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.30 m/s แล้วอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะลดลงและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจะลดลงด้วยตามลำดับ

## 2. ผลการวิเคราะห์ส่วนท่อ (tube)

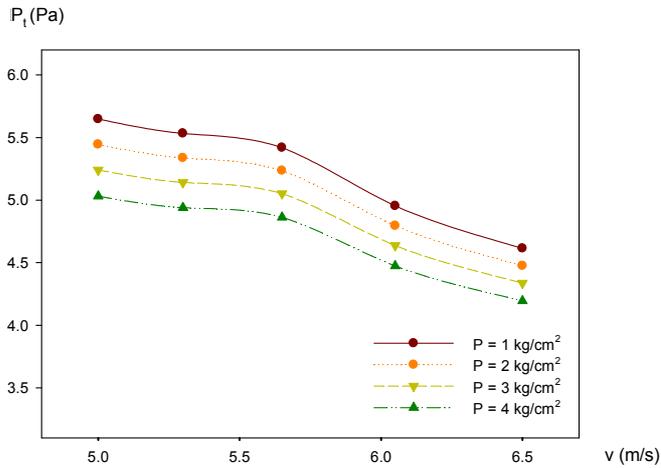
การวิเคราะห์ส่วนท่อที่ความเร็วดูดความร้อนทั้งต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ ความดันลด และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน ที่ความดันใช้น้ำ 1–4 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ส่วนท่อที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00–6.50 m/s อุณหภูมิน้ำอยู่ระหว่าง 30–40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ 0.138 kg/s ที่ความดันใช้น้ำ 1–4 kg/cm<sup>2</sup> พบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00 m/s ได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด 212.85 kW และเมื่อปรับความเร็วดูดความร้อนทั้งเพิ่มขึ้น ความร้อนจะถูกดูดออกไปที่ปล่องไอเสียเพิ่มขึ้น เป็นผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลงตามลำดับ

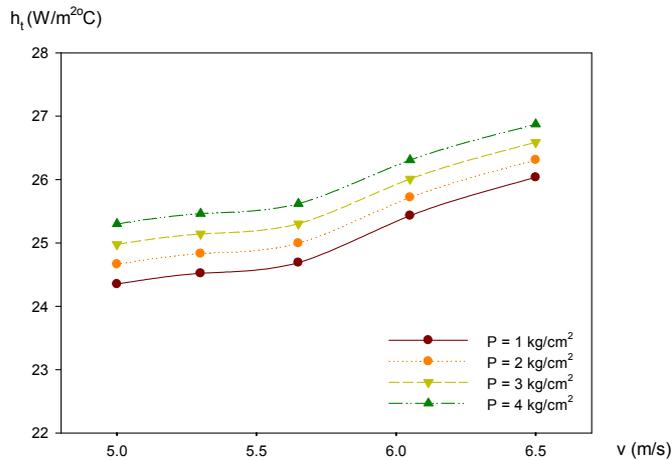
จากรูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ส่วนท่อที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00–6.50 m/s ที่ความดันใช้น้ำ 1–4 kg/cm<sup>2</sup> อุณหภูมิน้ำป้อน 30–40 องศาเซลเซียส พบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00 m/s มีความดันลดในส่วนเปลือกสูงสุด 5.34 Pa เมื่อปรับความเร็วดูดความร้อนทั้งเพิ่มขึ้นความดันลดจะลดลงตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ (อุทัย, 2555) เมื่อเพิ่มความเร็วดูดความร้อนทั้งจะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนต่ำ และความดันลดจะลดลงตามลำดับ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทั้งกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทั้งกับความดันลดยภายในท่อ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทั้งกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ

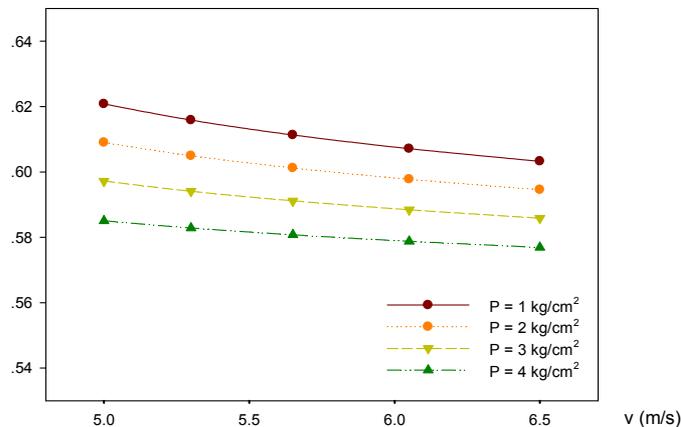
รูปที่ 9 การวิเคราะห์ผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00–6.50 m/s อุณหภูมิน้ำป้อน 30–40 องศาเซลเซียส ที่ความดันใช้ไอน้ำ 1–4 kg/cm<sup>2</sup> พบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00 m/s จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 24.82 W/m<sup>2</sup>°C เมื่อมีการปรับความเร็วดูดความร้อนทั้งเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจะเพิ่มขึ้น เพราะว่าอุณหภูมิน้ำป้อนสูงสุดที่ 40 องศาเซลเซียส

สรุปผลการวิเคราะห์อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยม ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00–6.50 m/s อุณหภูมิน้ำป้อน 30–40 องศาเซลเซียส ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนที่น้ำได้รับผ่านพื้นผิวท่อ ความดันลดยภายในท่อ และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน พบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00 m/s ได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 212.85 kW มีความดันลดย 5.34 Pa และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 24.82 W/m<sup>2</sup>°C ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยม ที่มีพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน 3.55

m<sup>2</sup> ท่อมีความยาว 34 m มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 m และแผ่นบิตมีพื้นที่รวม 0.56 m<sup>2</sup> สำหรับการถ่ายโอนความร้อนระหว่างความร้อนทิ้งกับน้ำที่อยู่ภายในท่อ ทำให้อุณหภูมิของน้ำป้อนสูงขึ้นเป็น 80–85 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (อุทัย, 2555) เมื่อนำความร้อนทิ้งถ่ายโอนความร้อนให้แก่ น้ำ พบว่า อุณหภูมิของน้ำป้อนภายในท่อสูงขึ้น 75–80 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถประหยัดค่าเชื้อเพลิงได้ 136,084.44 บาทต่อปี

### 3. การวิเคราะห์ผลสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิตตัดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

รูปที่ 10 การวิเคราะห์ที่ได้ประสิทธิภาพอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิตตัดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00–6.50 m/s กับประสิทธิภาพอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนฯ พบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00 m/s อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนฯ จะได้ประสิทธิภาพสูงสุดเฉลี่ย 0.60 โดยอุณหภูมิน้ำป้อนอยู่ที่ 30–40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลของน้ำป้อนเท่ากับ 0.138 kg/s ที่ความดันใช้น้ำ 1–4 kg/cm<sup>2</sup> และเมื่อปรับความเร็วการดูดความร้อนทิ้งเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนฯ จะมีค่าลดลงตามลำดับ ทั้งนี้ เพราะความร้อนทิ้งถูกดูดออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนฯ เร็วขึ้นจึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพลดลงตามลำดับ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วดูดความร้อนทิ้งกับประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนฯ

### 4. การวิเคราะห์ความเหมาะสมความคุ้มค่าและการประหยัดพลังงานการใช้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิตตัดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยม ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

จากต้นทุนการสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนฯ และการบำรุงรักษาจะใช้งบประมาณ 150,000 บาท ในกรณีเดินเครื่องวันละ 6 ชั่วโมง และใช้น้ำมันดีเซล (ราคาน้ำมันลิตรละ 30.15 บาท) พบว่า อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อฯ สามารถประหยัดพลังงานได้ 454.06 บาทต่อวัน และใช้ระยะเวลาคืนทุน 1.1 ปี สอดคล้องกับงานวิจัยการนำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำแบบหลอดไฟ (ทงเงียรติ, 2547) ขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 1 t/h และ 3 t/h มาอุ่นน้ำป้อนโดยใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งได้ผลการวิจัยว่า หม้อน้ำขนาด 1 t/h สามารถประหยัดพลังงานได้ 18,500 บาทต่อปี มีระยะเวลาคืนทุน 2.5 ปี และหม้อน้ำขนาด 3 t/h สามารถประหยัดพลังงานได้

100,000 บาทต่อปี ระยะเวลา 0.9 ปี จะเห็นได้ว่าถ้าเป็นหม้อน้ำขนาดเล็กจะใช้ระยะเวลาคืนทุนมากกว่าหม้อน้ำขนาดใหญ่ เพราะว่่าหม้อน้ำขนาดเล็กมีอัตราการผลิตไอน้ำน้อยกว่า

**ตารางที่ 1** สรุปผลการวิเคราะห์การประหยัดพลังงาน และระยะเวลาคืนทุนของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

รายละเอียด	ผลการวิเคราะห์
1. ชั่วโมงการทำงาน	6 ชั่วโมง
2. ราคาน้ำมันดีเซล	30.15 บาท/ลิตร
3. ราคาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อฯ	150,000 บาท
4. กำลังงานที่ประหยัดได้	31.17 กิโลวัตต์
5. ค่าพลังงานเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้	454.06 บาท/วัน
6. ระยะเวลาคืนทุน	1.1 ปี

### สรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยม ที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว โดยใช้ข้อมูลด้านเทคนิคของหม้อน้ำขนาด 500 kg/h ได้พื้นที่การถ่ายโอนความร้อนส่วนท่อและส่วนเปลือก 3.55 m<sup>2</sup> และ 5.17 m<sup>2</sup> ท่อมีความยาว 34 m ส่วนเปลือกมีความยาว 2.18 m ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00–6.50 m/s อุณหภูมิความร้อนที่ออกจากปล่องไอเสีย 220.5–250.3 องศาเซลเซียส ที่ความดันใช้ไอน้ำ 1–4 kg/cm<sup>2</sup> ผลการวิจัยพบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.00 m/s ได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกและภายในท่อเฉลี่ย 429.90 kW และ 212.85 kW มีความดันลด 28.77 Pa และ 5.34 Pa มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน 5,471 W/m<sup>2</sup>°C และ 24.82 W/m<sup>2</sup>°C สาเหตุที่สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในเปลือกสูงกว่าส่วนท่อ เพราะว่่า พื้นที่ผิววนอกอยู่ภายในเปลือกซึ่งมีพื้นที่มากกว่าพื้นที่ผิวส่วนท่อในอัตรา 2:1 นอกจากนี้ยังมีปัจจัยมาจากของไหลที่เป็นก๊าซร้อนทั้งมีอุณหภูมิสูง (250–300 องศาเซลเซียส) (ส่วนเปลือก) ส่วนท่อของไหลจะเป็นของเหลวซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ (30–40 องศาเซลเซียส) จึงเป็นเหตุให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกและส่วนภายในท่อแตกต่างกัน และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยมมีประสิทธิภาพ 0.60 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมกับหม้อน้ำแบบความร้อนแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ส่วนความคุ้มค่าในการประหยัดพลังงานนั้น สามารถประหยัดพลังงานได้ 136,048.44 บาทต่อปี เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าการนำความร้อนทั้งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก สำหรับต้นทุนการลงทุน 150,000 บาท จะพบว่า ได้อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 69.03% เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราดอกเบี้ยของธนาคารเพื่อกลุ่มอุตสาหกรรมร้อยละ 10 จะเห็นว่า ผลตอบแทนภายในสูงกว่า แสดงว่าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยม มีความเหมาะสมต่อการลงทุนซึ่งใช้ระยะเวลาคืนทุน 1.1 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ (อุทัย, 2555) ชนิดที่ไม่ใส่แผ่นบิด ซึ่งมีเงื่อนไขการออกแบบและทดสอบเงื่อนไขเดียวกัน พบว่า อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ (ไม่ใส่แผ่นบิด) มีสมรรถนะ 0.40 สรุปว่า การใส่แผ่นบิดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมภายในท่อ จะทำให้มีพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนภายในเพิ่มขึ้นและทำให้น้ำเกิดการหมุน

ควง เป็นผลให้อุณหภูมิของน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นปิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม มีสมรรถนะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชนิดไม่ใส่แผ่นปิด

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และบริษัทไทยสตีมเซอร์วิส แอนด์ซัพพลาย จำกัด ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัย

## บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2551). สถิติการขอขึ้นทะเบียนการใช้หม้อน้ำของอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: กลุ่มงานวิศวกรรมเครื่องกล
- ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2547). การใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับคืน. สำนักงานนโยบายและพลังงาน กระทรวงพลังงาน
- บริษัท วันไทยอุตสาหกรรมอาหาร จำกัด. (2550). การนำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำมาอุ่นน้ำป้อน. กรมพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน.
- อุทัย ผ่องรัศมี. (2553). การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุด สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว. ศูนย์วิจัยพลังงาน. มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี.
- อุทัย ผ่องรัศมี. (2555). การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว. ศูนย์วิจัยพลังงาน. มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี.
- Ben Lu, Pei-Xue Jiang. (2006). Experimental and Numerical Investigation of Convection Heat Transfer. Thermal and Fluid Science 30: 513-521.
- Cengel, A.Y. and Boles, A.M. (2008). Thermodynamics an Engineering Approach. New York: Mc Graw-Hill.
- Chang, S.W., Jan, Y.J. and Liou, J.S., (2007). Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted type. International Journal of thermal Science 46: 506-518.
- Nag, P.K. (2002). Heat Transfer. Tata McGraw-Hill.
- Nuntaphan A. (2002). Performance Analysis of Heat Pipe Heat Exchanger Using Binary Working Fluids. Unpublished Doctoral Dissertation, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Suryanarayana, N.V. and Arici, O. (2003). Design and Simulation of Thermal System. New York: McGraw-Hill.
- Tanda, G. (2004). Heat Transfer in Rectangular Channels with Transverse and V-Shaped Broken Ribs. Int J Heat Mass Transfer 47: 229-243.
- Thai Support Engineering. (2010). Standards of Mechanical Engineering Designs. ค้นเมื่อ กรกฎาคม 2, 2554 จาก <http://www.seddesigns.com/webboard/index.php>
- The Natural gas boiler burner consortium. (2011). Boiler Efficiency. ค้นเมื่อ กรกฎาคม 2, 2554, จาก [http://cleanboiler.org/eff\\_Improve/efficiency/Index\\_boiler\\_efficiency.asp](http://cleanboiler.org/eff_Improve/efficiency/Index_boiler_efficiency.asp)

