

การออกแบบปรับปรุงเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด

The Improvement Design of Plate Heat Exchanger for Bottle Washing Machines

ถาวร ราชรองเมือง^{1*}, เพชร แสนบริสุทธิ์², มนัส ดิลกกลาก³, ว่าที่เรือตรีอนุสรณ์ ดวงกระสินธุ์⁴Thaworn Ratrongmuang^{1*}, Pet Saenborisut², Manus Dirloglap³, Anusorn Thuangkrasin⁴^{*1234}สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคหนองคาย สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1 จังหวัดหนองคาย 4300^{*1234}Field of Mechanical Technology, Nongkhai Technical College, Institute of Vocational Education : Northeastern Region 1 Nongkhai 43000

Received : 2021-03-23 Revised : 2021-04-21 Accepted : 2021-04-21

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวดโรงงานสุรา บริษัทเทพอรุณภัย จำกัด ซึ่งเป็นการศึกษาผลของตัวแปรทางด้านอัตรา การไหลของน้ำป้อน อุณหภูมิทางเข้าของน้ำสุราและ น้ำป้อน ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด โดยออกแบบพื้นที่ถ่ายเทความร้อนได้ค่าเท่ากับ 12.542 m^2 ซึ่งมีวัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นแลกเปลี่ยน ความร้อนคือเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel 304) ชนิดแบบแผ่นอัดขึ้นรูปให้เกิดส่วนนูนและส่วนเว้า ประกอบเป็นชุดแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีขนาด ความกว้าง 32 cm x ความยาว 85 cm และมีขนาด พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน มีความกว้าง 30 cm x ความยาว 60 cm อัดซ้อนกันรวมจำนวน 70 แผ่น เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 204.6284 kW ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น มีสมรรถนะดี โดยทำให้อุณหภูมิ น้ำป้อนเพิ่มขึ้น 34 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิปกติที่ 28 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นเป็น 62 องศาเซลเซียส จึงสามารถประหยัด พลังงานไอน้ำที่ใช้ในการล้างขวดได้เท่ากับ 0.0103 ตันต่อพันขวด หรือเทียบเท่า 1.81 ตันต่อวัน คิดเป็น เงิน 426,523.84 บาท และเพิ่มประสิทธิภาพให้กับ เครื่องล้างขวดได้ดี ทำให้ขวดสะอาดเร็วล้างขวดได้

ปริมาณที่มากขึ้น โดยใช้พลังงานที่น้อย และจะ สามารถคืนทุนในระยะเวลา 0.80 ปี หรือ 11 เดือน (155 วัน)

คำสำคัญ : เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

Abstract

This research project aimed to study the result of input water flow rate, input temperature of liquor and input water that cause changing of heat transfer coefficient of Heat Exchanger Plate for bottle washing machines. By designing 12.543 square meters of heat transfer area with stainless steel 304 plate used as a survey material, formed creating shapes and curves, assembled to be heat transfer set. The width of 32 cm x 85 cm long, that the heat transfer area of 30 cm wide x 60 cm long. which was compressed 70 layers. This heat exchanger plate has heat transfer rate of 204.6284 kW with efficiency value of 77%. It is found that the heat exchanger plate has a good performance, by increasing input water temperature 34°C from 28°C to 62°C, which saving steam energy for bottle washing of 0.0103 ton per 1,000 bottles or equal 1.81 tons per day that can calculate into 382,362.50 Baht. Besides, it can also

*ถาวร ราชรองเมือง

E-mail : thaworn_r@hotmail.com

increase efficiency of the bottle washing machine for faster in cleaning a large amount of bottles with less energy. All of this will come to the breakeven point in 0.80 year or 11 month. (155 day)

Keywords : Plate heat exchanger.

1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันบริษัท เทพอร์โธทัย จำกัด ได้มีการผลิตสุรา โดยมีกระบวนการต่าง เช่น กระบวนการหมักสา กระบวนการกลั่น และกระบวนการบรรจุ ซึ่งกระบวนการบรรจุมีการใช้น้ำในขั้นตอนการล้างขวดโดยใช้เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ใช้น้ำมันเตาเกรด C [2] เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำป้อนกระบวนการผลิตสุรา โดยในขั้นตอนการล้างขวดได้ใช้น้ำเพื่อให้ความร้อนในการทำความสะดวกขวด โดยใช้น้ำป้อนที่อุณหภูมิในสภาวะอากาศปกติประมาณ 28–32 องศาเซลเซียส ต้องใช้น้ำในการอุ่นน้ำป้อนให้ได้อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานไอน้ำในการอุ่นน้ำ [4] ซึ่งในการกระบวนการกลั่นสุรามีอุณหภูมิสุราประมาณ 80 องศาเซลเซียส ที่ต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการลดอุณหภูมิสุราลงให้อยู่ระหว่าง 30–40 องศาเซลเซียส ทั้งโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งในปัจจุบันมีวิวัฒนาการเทคโนโลยีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้มีการพัฒนาขึ้นมาเป็นลำดับโดยคำนึงถึงการประหยัดพลังงาน และผลกระทบที่เกิดจากการใช้พลังงานที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม โดยได้มีการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate heat exchanger) ใช้งานกับของไหลทุกชนิด ให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ไม่น้อยกว่า 5 เท่า ของ Shell & Tube [1] ที่พื้นผิวความร้อน (Heating Surface) เท่ากัน มีขนาดเล็กกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchangers) ทั่วไปมาก สะดวก และง่ายในการติดตั้ง สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดของภาระ (Load) ได้ง่าย โดยการเพิ่ม หรือ ลดจำนวนแผ่น และการถอดล้างทำความสะอาดได้ง่าย

สามารถล้างทำความสะอาดได้ทั้ง 2 ด้าน (ด้านร้อนและเย็น) เพียงถอดสลักเกลียว (Stud) และแป้นเกลียว (Nut) ที่ยึดออกเท่านั้น มีความยืดหยุ่นสูงในการใช้งาน การออกแบบ และการประกอบโดยออกแบบและเลือกจาก โปรแกรม (Program) สำเร็จรูปอย่างรวดเร็ว ประกอบจากแผ่น (Plate) สำเร็จรูปเข้ากับโครงมาตรฐานเท่านั้น

ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้คิดค้นปรับปรุงเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด ของบริษัท เทพอร์โธทัย จำกัด ขึ้นเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานที่สิ้นเปลือง โดยเปล่าประโยชน์ในการผลิตสุราทั้งในกระบวนการกลั่น และกระบวนการล้างขวด รวมทั้งกระบวนการอื่น ๆ ในการผลิตสุราเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และลดต้นทุนในการผลิต โดยปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ที่ใช้ลดอุณหภูมิสุรา เพื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนเครื่องล้างขวด ให้สูงขึ้นจากอุณหภูมิปกติก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องล้างขวด

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อออกแบบปรับปรุงเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวดสุรา บริษัท เทพอร์โธทัย จำกัด

2.2 เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด

2.3 เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด

3. สมมุติฐานของงานวิจัย

อุ่นน้ำป้อนเครื่องล้างขวดด้วย เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น เพื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนเครื่องล้างขวด ที่อุณหภูมิในสภาวะอากาศปกติประมาณ 28–32 องศาเซลเซียส ให้ได้อุณหภูมิ 60–65 องศาเซลเซียส เพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงานไอน้ำในการอุ่นน้ำป้อนเครื่องล้างขวดให้ได้ 85 องศาเซลเซียส

4. การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อน

เป็นการกำหนดค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) และพื้นที่ถ่ายเทความร้อน (A) โดยอัตราการถ่ายเทความร้อน สามารถคำนวณจากคุณสมบัติทางด้านน้ำป้อน สำหรับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ค่าแฟกเตอร์แก้ไข (Correction factor) ; F อุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยเชิงล็อก (LMTD) [1] โดยค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาสามารถเขียนเป็นสมการการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำสุรา กับน้ำป้อน ดังนั้น การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีขั้นตอนดังนี้

กำหนดคุณสมบัติและลักษณะการไหลของของไหลและอุณหภูมิน้ำป้อนทางออก

อัตราการไหลของน้ำป้อน $m_c = 1.111 \text{ kg/s}$

อัตราการไหลของน้ำสุรา $m_{fg} = 1.111 \text{ kg/s}$

น้ำป้อน กำหนดอุณหภูมิน้ำป้อนทางเข้า, $T_{ci} = 30^\circ\text{C}$

และต้องการอุณหภูมิน้ำป้อนทางออก, $T_{co} = 65^\circ\text{C}$

เปิดตารางหาคุณสมบัติของน้ำป้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย,

$$\frac{30 + 65}{2} = 47.5^\circ\text{C}$$

ได้คุณสมบัติดังนี้

$\rho = 990.20 \text{ kg/m}^3$, $U = 0.5964 (10^{-2}) \text{ kg/m.s}$

$C_p = 4.182 \text{ kJ/kg.C}$, $u_o = 0.6347 \text{ w/m}^2 . \text{C}$

น้ำสุรา กำหนดอุณหภูมิน้ำสุราทางเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อน,

$T_{hi} = 80^\circ\text{C}$; $C_p = 4.195 \text{ kJ/kg.C}$

คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้ำป้อนได้รับ คำนวณได้จากสมการ

$$Q_c = (mCp)_c (T_{ci} - T_{co}) \quad \text{สมการที่ 1...}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Q_c &= (1.111)(4.182)(65-30) \\ &= 162.62 \text{ kW} \end{aligned}$$

จากการสมดุลพลังงาน

อัตราความร้อนที่น้ำป้อนได้รับ=อัตราความร้อนที่น้ำสุรา
ระบายออก

$$\text{ดังนั้น } Q_c = Q_e = 162.62 \text{ kW}$$

คำนวณอุณหภูมิน้ำสุราที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อน (T_{ho})

คำนวณได้

จากสมการ

$$Q_h = (mCp)_h (T_{hi} - T_{ho}) \quad \text{สมการที่ 2...}$$

$$\text{แทนค่า } 162.62 = (1.111) (4.195) (80 - T_{ho})$$

$$\text{ดังนั้น } T_{ho} = 45.11^\circ\text{C}$$

คำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธี LMTD

คำนวณอุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยเชิงล็อก (LMTD)

$$\text{จากสมการ } Q = UAF (\text{LMTD}) \quad \text{สมการที่ 3...}$$

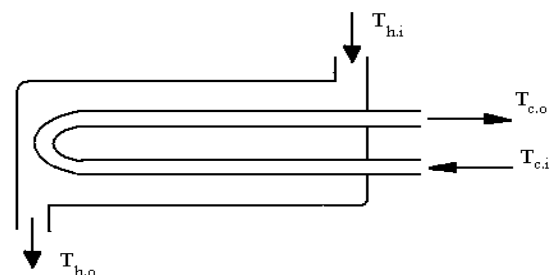
$$\Delta T_1 = 80 - 65 = 15^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 45.11 - 30 = 15.11^\circ\text{C}$$

$$\text{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = \frac{15 - 15.11}{\ln(15/15.11)} = 15.05^\circ\text{C}$$

$$\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2) \quad \ln(15/15.11)$$

คำนวณค่าแฟกเตอร์แก้ไข (correction factor); F



รูปที่ 1 แสดงอุณหภูมิการไหลตั้งฉากกัน

ในการหาค่าตัวประกอบปรับแก้ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบไหลตัดขวางจะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 ตัว คือค่า P และค่า R ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

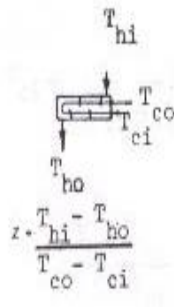
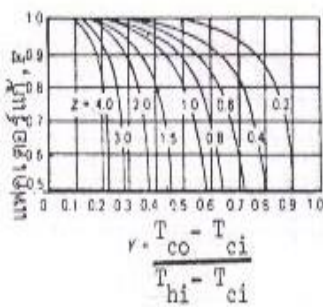
$$R = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{co} - T_{ci}} = \frac{80 - 45}{65 - 30} = 1.00$$

$$T_{co} - T_{ci} \quad 65 - 30$$

$$P = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}} = \frac{65 - 30}{80 - 30} = 0.70$$

$$T_{hi} - T_{ci} \quad 80 - 30$$

จากกราฟจะได้ค่า $F = 0.24$



รูปที่ 2 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ F

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U)
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหล
ทั้งสอง คำนวณได้จากสมการ

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_o} + 0.0015$$

$$\text{แทนค่า } U = \left(\frac{1}{\frac{1}{0.6347} + 0.0015} \right) 5.68$$

$$U = 3.60 \text{ kW/m}^2 - ^\circ\text{C}$$

คำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน จากสมการ

$$Q = UAF \text{ (LMTD)}$$

$$\text{ซึ่ง } A = \frac{Q}{UF \text{ (LMTD)}}$$

$$\text{แทนค่า } A = \frac{162.62}{3.60 \times 0.24 \times 15.05}$$

$$= 12.542 \text{ m}^2$$

คำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนต่อ 1 แผ่น
ซึ่งมีขนาดพื้นที่แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน กว้าง (W)
0.30 m ยาว (L) 0.60 m

$$\text{จากสมการ } A_{pc} = WL \text{ สมการที่ 4...}$$

$$\text{ดังนั้น } A_{pc} = 0.30 \times 0.60$$

$$= 0.180 \text{ m}^2$$

คำนวณหาจำนวนแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\text{จากสมการ } A_{pc} = \frac{A}{A_{pc}} \text{ สมการที่ 5...}$$

$$\text{ดังนั้น } A_{pc} = \frac{12.542}{0.180}$$

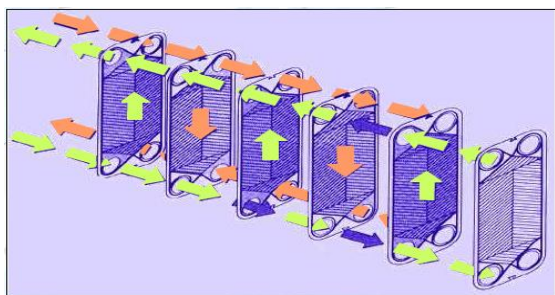
$$= 70 \text{ Pc}$$

4.1 การวิเคราะห์จากการคำนวณออกแบบ

จากการคำนวณเมื่อออกแบบพื้นที่ถ่ายเทความร้อน ขนาดความกว้าง ความยาว ช่องว่างระหว่างแผ่น และจำนวนแผ่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ผลดังนี้ ได้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน 45.172 W พื้นที่ถ่ายเทความร้อนได้ค่าเท่ากับ 12.542 m² คิดเป็นจำนวนแผ่น และวัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนคือเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel 304) อัดให้เกิดส่วนนูนและส่วนเว้า ขนาดโดยรวม ความกว้าง 32 cm ความยาว 85 cm และมีขนาดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนคือความกว้าง 30 cm ความยาว 60 cm จำนวน 70 แผ่น

4.2 วัสดุ อุปกรณ์และขั้นตอนการปรับปรุงเครื่องอุ่นน้ำป้อน ในการวิจัยครั้งนี้ได้ออกแบบเพื่อปรับปรุงเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด โดยโครงสร้างของเครื่องอุ่นน้ำป้อนประกอบด้วย แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน, ปะเก็น และตัวเรือน โดยแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ทำหน้าที่เป็นพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลทั้งสองโดยไม่ผสมกัน น้ำป้อนจะไหลอยู่ภายในช่องว่างระหว่างแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน [3] แบบขนานกันส่วนน้ำสุราจะประกบสลับกันไปกับน้ำป้อนโดยมีปะเก็นเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของของไหลทั้งสองชนิดไม่ให้ผสมกัน สำหรับตัวเรือน ทำหน้าที่เป็นเปลือกหุ้มและประกบแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน อยู่ 2 ด้านเพื่อไม่ให้แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ที่อยู่ระหว่างกลางแยกออกจากกัน โดยใช้น็อต, สกรูยึดตัวเรือนทั้ง 2 ด้าน ส่วนตัวเรือนจะติดตั้งอยู่กับท่อน้ำทั้ง 4 จุด ที่ด้านหน้าตัวเรือน [5] สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้ออกแบบปรับปรุงเครื่องอุ่นน้ำป้อน ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ส่วนประกอบและรายละเอียดมีดังนี้คือ

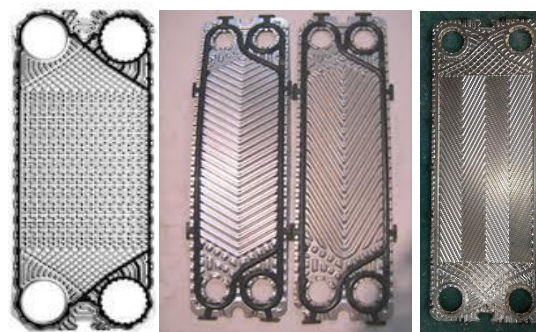
4.2.1 แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (Plate heat exchanger) เป็นแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนสำเร็จรูปที่ผลิตจาก แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel 304) อัดให้เกิดส่วนนูน และส่วนเว้า ขนาดโดยรวมความกว้าง 32 cm ความยาว 85 cm และมีขนาดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนคือความกว้าง 30 cm ความยาว 60 cm ช่องว่างระหว่างแผ่น 5 mm ความหนาของผนังแผ่น 0.35 mm โดยวางเรียงซ้อนกันหลาย ๆ และมีปะเก็นกันระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แล้วให้ของเหลวแต่ละชนิดไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นในลักษณะที่สลับกันช่องเว้นช่องรวมทั้งหมด 70 แผ่น โดยมีช่องว่างระหว่างแผ่น ในแนวตั้งฉาก (Transverse Pitch, ST) เท่ากับ 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (Plate heat exchanger)

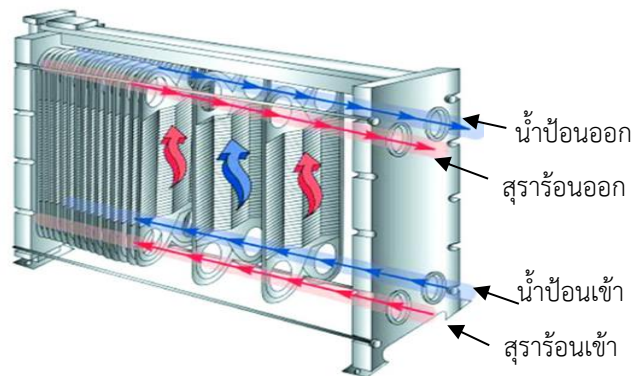
(ที่มา : <https://www.google.com/search?source=univ&tbn=isch&q>)

4.2.2 ปะเก็น (Gasket) เป็นปะเก็นสำเร็จรูปที่ผลิตจากยาง EPDM ขนาดของปะเก็น หนา 3 mm กว้าง 10 mm ติดอยู่กับแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของของไหลทั้งสองชนิดไม่ให้ผสมกัน จำนวน 1 เส้นต่อแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 4



ภาพที่ 4 ปะเก็น (Gasket) และแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน

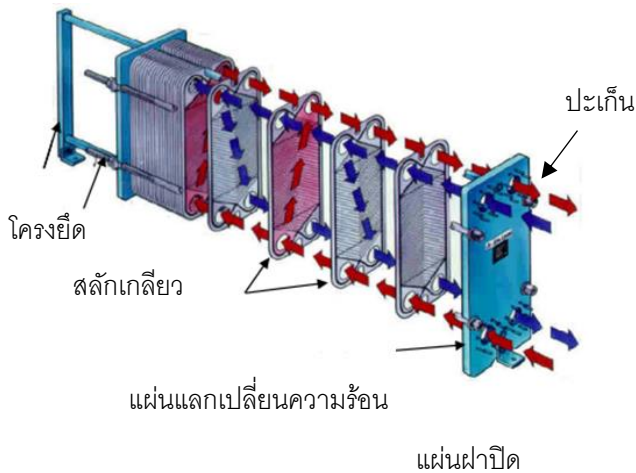
(ที่มา : <https://www.indiamart.com/proddetail/food-grade-plate-heat-exchanger-gasket-2256462412.html>)



รูปที่ 5 ภาพแสดงทิศทางการไหลของเหลวภายในเครื่องอุ่นน้ำป้อน

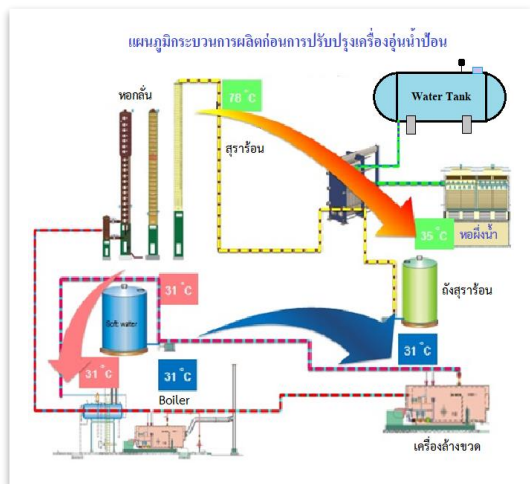
(ที่มา : <https://tempmaker.yellowpages.co.th/>)

4.2.3 ตัวเรือน (Frame) ใช้วัสดุเหล็กแผ่น หนา 3 cm ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 40 cm และ ยาว 93 cm ประกอบแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน อยู่ 2 ด้านเพื่อไม่ให้แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ที่อยู่ระหว่างกลางแยกออกจากกัน โดยใช้สลักเกลียวยึดตัวเรือนทั้ง 2 ด้าน ส่วนตัวเรือนจะติดตั้งอยู่กับท่อน้ำ ทั้ง 4 จุด ที่ด้านหน้าตัวเรือนภาพตัวเรือนเครื่องอุ่นน้ำป้อนดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างส่วนประกอบของตัวเรือน
เครื่องอุ่นน้ำป้อน

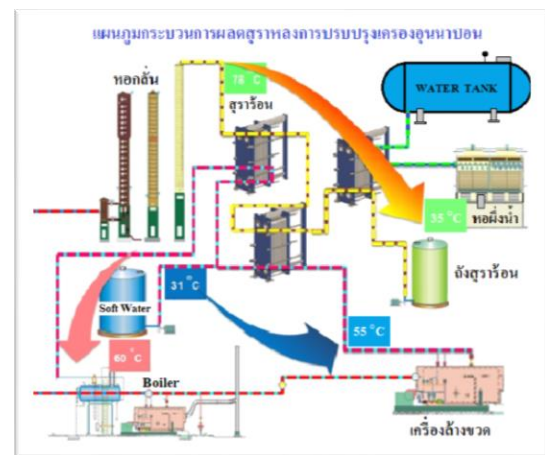
(ที่มา : <https://www.google.com/search?q=plate+heat+exchanger+diagram&tbm=isch&hl=th&chips=q:plate+heat>)



รูปที่ 7 วงจรการผลิตสุราก่อนติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน

หลักการทำงานของกระบวนการล้างขวดก่อนการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด เครื่องล้างขวดจะนำน้ำ Soft จากถังเก็บ (Soft Water) ที่มีอุณหภูมิสถานะปกติที่ 31 องศาเซลเซียส ป้อนเข้าเครื่องล้างขวดแล้วนำไอน้ำมาเพิ่มอุณหภูมิ น้ำภายในเครื่องล้างขวดให้ได้อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส จึงนำขวดเข้าเครื่องล้างขวดเพื่อทำความสะอาด

หลักการทำงานของกระบวนการกลั่นสุราก่อนติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด โดยการนำน้ำสา้เข้าภายในเครื่องกลั่นใช้ไอน้ำในการให้ความร้อนกับน้ำสา้เพื่อให้เกิดแอลกอฮอล์ที่มีจุดเดือดสูงกลายเป็นน้ำสุราที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และทำการลดอุณหภูมิ น้ำสุรา ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระหว่างน้ำหล่อเย็นในกระบวนการกลั่นกับน้ำสุรา ทำให้อุณหภูมิลดลงที่ 30-40 องศาเซลเซียส แล้วนำไปจัดเก็บในถังพักสุราร้อน



รูปที่ 8 วงจรการผลิตสุราหลังการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน

หลักการทำงานของกระบวนการล้างขวดหลังการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด เครื่องล้างขวดจะนำน้ำ Soft จากถังเก็บ (Soft Water) ที่มีอุณหภูมิสถานะปกติที่ 31 องศาเซลเซียส ป้อนเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวดแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับน้ำสุราที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ น้ำป้อนให้กับเครื่องล้างขวดที่มีอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แล้วนำไอน้ำมาเพิ่มอุณหภูมิ น้ำภายในเครื่องล้างขวดให้ได้อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส จึงนำขวดเข้าเครื่องล้างขวดเพื่อทำความสะอาด

หลักการทำงานของกระบวนการกลั่นสุราหลังติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด โดยการนำน้ำสา้เข้าภายในเครื่องกลั่นใช้ไอน้ำในการให้ความร้อนกับน้ำสา้เพื่อให้เกิดแอลกอฮอล์ที่มี

จุดเดือดสูงกลายเป็นน้ำสุราที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และนำน้ำสุราเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่นสำหรับเครื่องล้างขวด เพื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนให้กับเครื่องล้างขวดที่มีอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แล้วไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นตัวที่ 2 ทำการลดอุณหภูมิน้ำสุราระหว่างน้ำ

หล่อเย็นในกระบวนการกลั่นกับน้ำสุราทำให้อุณหภูมิลดลงที่ 30-40 องศาเซลเซียส แล้วนำไปจัดเก็บในถังพักสุราร้อน



รูปที่ 9 แสดงการเตรียมเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น



รูปที่ 10 แสดงการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น



รูปที่ 11 การติดตั้งระบบท่อทางเข้ากับระบบการกลั่นสุรา



รูปที่ 12 แสดงการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนเสร็จสิ้น



รูปที่ 13 แสดงเครื่องอุ่นน้ำป้อนหลังทำการติดตั้งเข้ากับระบบการกลั่นเสร็จสิ้น

5. การทดสอบการใช้งานของแผ่นความร้อน

จากการออกแบบและปรับปรุงติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่นสำหรับเครื่องล้างขวดโรงงานสุรา บริษัท เทพอริโนทัย จำกัด เพิ่มเติมเป็น 3 ชุด ดังภาพที่ 8 โดยการนำน้ำสาเข้าภายในเครื่องกลั่นใช้น้ำในการให้ความร้อนกับน้ำสาเพื่อให้เกิดแอลกอฮอล์ที่มีจุดเดือดสูงกลายเป็นน้ำสุราที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และนำน้ำสุราเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น เพื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนให้กับเครื่องล้างขวดได้ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นการทดลองที่กำหนดอัตราการไหลของน้ำป้อน และอุณหภูมิทางเข้าของน้ำสุรากับน้ำป้อนเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในสภาวะการใช้งาน เมื่อดูผลที่มีต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อน ตลอดจนความดันสูญเสียของน้ำป้อนเมื่อผ่านเครื่องอุ่นน้ำป้อน ค่ากำหนดอัตราการไหลของน้ำป้อน อุณหภูมิทางเข้าของน้ำสุรากับน้ำป้อนนำผลที่ได้จากการบันทึกข้อมูลมาวิเคราะห์

เพื่อหาเวลาคืนทุนของเครื่องอุ่นน้ำป้อนและความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอุ่นน้ำป้อน โดยใช้ระยะเวลาการทดลอง จำนวน 9 วัน

5.1 เครื่องมือที่ใช้

5.1.1 Thermometer ใช้วัดอุณหภูมิที่จุดต่าง

5.1.2 Pressure gauge ใช้วัดแรงดันที่จุดต่าง

5.1.3 Water Flow Meter ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำป้อน

5.1.4 Alcohol Flow Meter ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำป้อน

5.1.5 Steam Flow Meter ใช้วัดอัตราการไหลของไอน้ำ

รายละเอียดดังนี้

5.1.1 Thermometer ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิ น้ำสุราและน้ำป้อน ที่เข้าและออกเครื่องอุ่นน้ำป้อน จำนวน 4 จุด

5.1.1.1 ท่อน้ำสุรา ด้านเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อน

5.1.1.2 ท่อน้ำสุรา ด้านออกเครื่องอุ่นน้ำป้อน

5.1.1.3 ท่อน้ำป้อน ด้านเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อน

5.1.1.4 ท่อน้ำป้อน ด้านออกเครื่องอุ่นน้ำป้อนเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนจากค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ



รูปที่ 14 Thermometer

5.1.2 Pressure gauge ทำหน้าที่วัดแรงดัน น้ำสุราและน้ำป้อน ที่เข้าและออกเครื่องอุ่นน้ำป้อน จำนวน 4 จุด

5.1.2.1 ท่อน้ำสุรา ด้านเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อน

5.1.2.1 ท่อน้ำสุรา ด้านออกเครื่องอุ่นน้ำป้อน

5.1.2.2 ท่อน้ำป้อน ด้านเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อน

5.1.2.3 ท่อน้ำป้อน ด้านออกเครื่องอุ่นน้ำป้อนเพื่อตรวจสอบการอุดตันของเครื่องอุ่นน้ำป้อนจากค่าความแตกต่างของแรงดัน



รูปที่ 15 Pressure gauge

5.1.3 Water Flow Meter ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของน้ำป้อน ที่ท่อน้ำที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อน เพื่อนำไปคำนวณประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องอุ่นน้ำป้อน



รูปที่ 16 Water Flow Meter

5.1.4 Alcohol Flow Meter ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของน้ำสุราที่ท่อน้ำสุราที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อน เพื่อนำไปคำนวณประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องอุ่นน้ำป้อน



รูปที่ 17 Alcohol Flow Meter

5.1.5 Steam Flow Meter ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของไอน้ำป้อนเครื่องล้างขวด ที่ท่อไอน้ำเข้าเครื่องล้างขวด เพื่อนำไปคำนวณระยะเวลาคืนทุนของเครื่องอุ่นน้ำป้อน



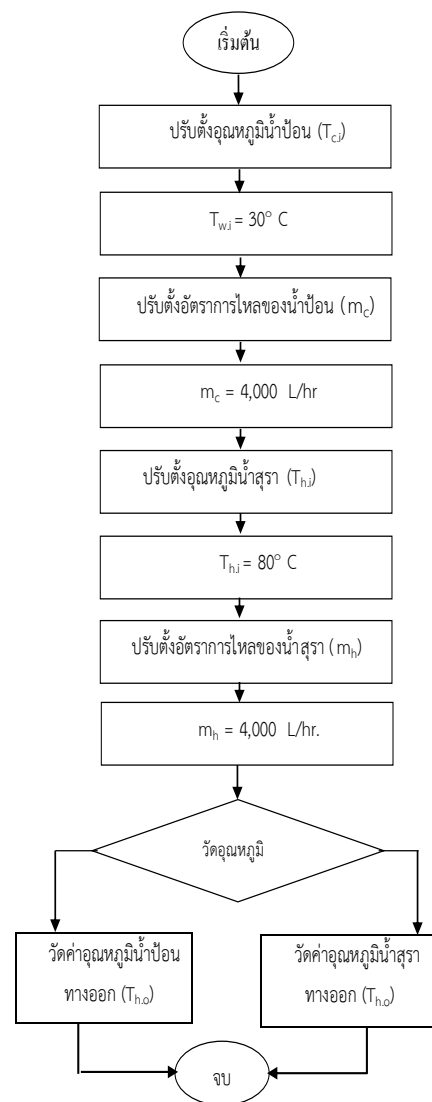
รูปที่ 18 Steam Flow Meter

5.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

น้ำป้อนกับน้ำสุราที่ได้จากกระบวนการกลั่น

5.3 วิธีการทดลอง

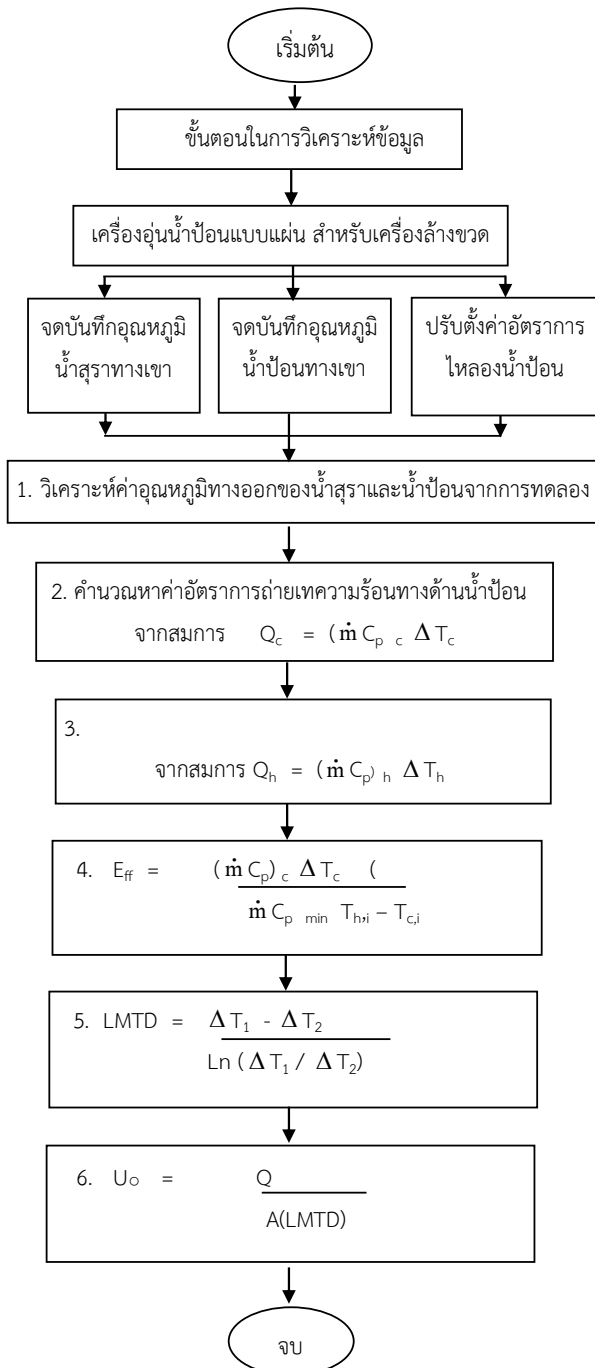
เป็นการทดลองที่กำหนดอัตราการไหลของน้ำป้อน และอุณหภูมิทางเข้าของน้ำสุรากับน้ำป้อนเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในภาวะการใช้งาน เมื่อดูผลที่มีต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าประสิทธิผลของเครื่องอุ่นน้ำป้อน ตลอดจนความดันสูญเสียของน้ำป้อนเมื่อผ่านเครื่องอุ่นน้ำป้อน ค่ากำหนดอัตราการไหลของน้ำป้อน อุณหภูมิทางเข้าของน้ำสุรากับน้ำป้อนนำผลที่ได้จากการบันทึกข้อมูลมาวิเคราะห์ เพื่อหาเวลาคืนทุนของเครื่องอุ่นน้ำป้อน



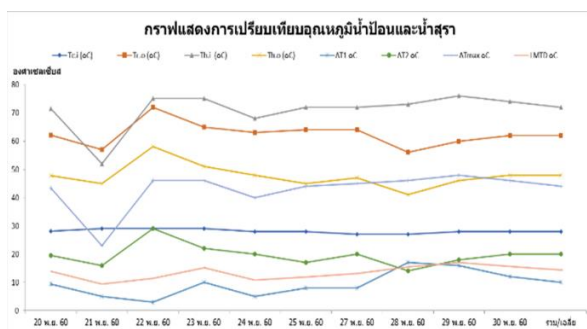
รูปที่ 19 วิธีการทดลอง

6. ผลการทดลองและวิเคราะห์

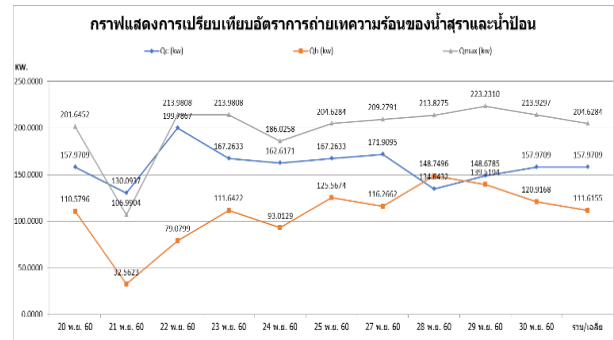
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยแบ่งออกเป็น การทดลองที่การปรับเปลี่ยนตัวแปรคือ อุณหภูมิ น้ำป้อน อุณหภูมิ น้ำสุรา และอัตราการไหลของน้ำป้อนทางด้านทางเข้าของเครื่องอุ่นน้ำป้อนและการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 20 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิ น้ำป้อนและน้ำสุรา



รูปที่ 22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำสุราและน้ำป้อน

ประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น (Plate heat exchanger) สำหรับเครื่องล้างขวด จากรูปที่ 19 และรูปที่ 20 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อน (Eff) ที่ 77% และอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Q_{max}) ที่ 204.6284 kW เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำออกเครื่องอุ่นน้ำป้อน (T_{co}) จะแปรผันตามอุณหภูมิของน้ำสุราก่อนเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อน (T_{hi}) ทำให้ค่าความต่างของอุณหภูมิสูงสุด (ΔT_{max}) ที่กราฟแสดงเป็นแนวเส้นตรงในช่วงที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกันเฉลี่ยที่ 44 องศาเซลเซียส ดังนั้นการแลกเปลี่ยนความร้อนในอัตราการไหลของน้ำป้อนคงที่ ทำให้ค่าความต่างของอุณหภูมิสูงสุดสม่ำเสมอ ส่วนอุณหภูมิของน้ำสุราก่อนเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อน (T_{hi}) จะแปรผันตามการควบคุมสภาวะการกลั่น จึงทำให้ค่าอุณหภูมิของน้ำออกเครื่องอุ่นน้ำป้อน (T_{co}) แปรผันตาม แต่ยังคงอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เครื่องล้างขวดต้องการทำให้การใช้ไอน้ำในการล้างขวดลดลงตามลำดับ

7. วิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด

จากผลการทดลองเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด ที่อัตราการไหลของน้ำป้อน 4,000 Lite/hr. (1.111 kg/s) อุณหภูมิทางเข้าเฉลี่ยของน้ำสุรา กับน้ำป้อน 72 องศาเซลเซียส และ 28 องศาเซลเซียส จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด คือ 70.66 % ซึ่งสามารถทำให้อุณหภูมิ น้ำป้อนเพิ่มขึ้น

เป็น 62 องศาเซลเซียส เมื่อนำข้อมูลทางด้านน้ำป้อนมาคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน (Qact) ทำให้เครื่องอุ่นน้ำป้อนสามารถดึงกลับมาใช้ใหม่ได้ สามารถคำนวณได้ดังนี้

การหาอัตราการใช้น้ำในการล้างขวดก่อนติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น

อัตราการใช้น้ำ = $\frac{\text{ไอน้ำที่ใช้ต่อวัน}}{(\text{จำนวนขวด}/1,000)}$ สมการที่ 5...

โดยที่ อัตราการใช้น้ำ = $55.65 / (953,640/1,000)$

อัตราการใช้น้ำ = 0.0584 ตัน/พันขวด

ตารางที่ 1 แสดงอัตราการใช้น้ำในการล้างขวดก่อนติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น

ก่อนติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่นสำหรับเครื่องล้างขวด			
วันที่	จำนวน (ขวด/คละ)	ไอน้ำที่ใช้ (ตัน)	อัตราการใช้น้ำ (ตัน/พันขวด/คละ)
13 พ.ย. 62	321,840.00	18.34	0.0570
14 พ.ย. 62	288,360.00	18.52	0.0642
15 พ.ย. 62	343,440.00	18.79	0.0547
รวม	953,640.00	55.65	0.0584
เฉลี่ย	317,880.00	18.55	0.0584

การหาอัตราการใช้น้ำในการล้างขวดหลังติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น

จากสมการอัตราการใช้น้ำ = $\frac{\text{ไอน้ำที่ใช้ต่อวัน}}{(\text{จำนวนขวด}/1,000)}$

โดยที่ อัตราการใช้น้ำ = $175.95 / (3,659 \text{ ตัน} (3,659,041/1,000))$

อัตราการใช้น้ำ = 0.0481 ตัน/พันขวด

การหาอัตราการใช้น้ำในการล้างขวดที่ลดลงต่อวัน

อัตราการใช้น้ำที่ลดลงต่อวัน = อัตราการใช้น้ำ

ก่อน - อัตราการใช้น้ำหลัง สมการที่ 6...

อัตราการใช้น้ำที่ลดลงต่อวัน = $0.0584 - 0.0481$

อัตราการใช้น้ำที่ลดลงต่อวัน = 0.0103 ตัน/พันขวด

การหาไอน้ำที่ใช้ในการล้างขวดลดลงต่อวัน

ไอน้ำที่ลดลงต่อวัน = อัตราการใช้น้ำที่ลดลงต่อวัน X อัตราการใช้น้ำ สมการที่ 7...

ไอน้ำหลัง

ไอน้ำที่ลดลงต่อวัน = 0.0103×175.95

ไอน้ำที่ลดลงต่อวัน = 1.81 ตัน

ตารางที่ 2 แสดงอัตราการใช้น้ำในการล้างขวดหลังติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น

หลังติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับเครื่องล้างขวด			
วันที่	จำนวน (ขวด/คละ)	ไอน้ำที่ใช้ (ตัน/วัน)	อัตราการใช้น้ำ (ตัน/พันขวด/คละ)
20 พ.ย. 62	408,240.00	17.15	0.0420
21 พ.ย. 62	332,640.00	17.15	0.0516
22 พ.ย. 62	369,600.00	17.94	0.0485
23 พ.ย. 62	378,000.00	18.35	0.0485
24 พ.ย. 62	376,320.00	18.17	0.0483
25 พ.ย. 62	378,000.00	17.71	0.0469
27 พ.ย. 62	288,960.00	16.33	0.0565
28 พ.ย. 62	361,200.00	17.58	0.0487
29 พ.ย. 62	384,720.00	17.86	0.0464
30 พ.ย. 62	381,361.00	17.71	0.0464
รวม	3,659,041.00	175.95	0.0481
เฉลี่ย	365,904.10	17.60	0.0481
อัตราการใช้น้ำที่ลดลงได้		1.81	0.0103

ตารางที่ 3 แผนการผลิตสุราขาวตราวงขาว 40 ดีกรีประจำปี 2562

แผนการบรรจุสุราขาวตราวงขาว		
รายการ	แผนการผลิตรวม 2562	แผนการผลิต 70 %
สุราขาว 40 ดีกรี (625)	32,476,032.00	22,733,222.40
สุราขาว 40 ดีกรี (330)	60,476,160.00	42,333,312.00
รวม	92,952,192.00	65,066,534.40
จำนวนวันที่กลั่น	242.00	169.00

ต้นทุนผลิตไอน้ำ แผนกต้นกำลัง บริษัท เทพ
อรุณทัย จำกัด ประจำเดือนพฤศจิกายน 2562

ตารางที่ 4 ต้นทุนผลิตไอน้ำ ประจำเดือน
พฤศจิกายน 2562

รายการ	หน่วย	พ.ย. 62
ต้นทุนผลิตไอน้ำ		
หมักส่า โมลาส	Ton	36.340
กลั่นโมลาส	Ton	992.300
บรรจุ	Ton	387.540
ไอน้ำที่ผลิตได้	Ton	1,416.180
ค่าไฟฟ้า	บาท	21,161.20
ต้นทุนผลิตไอน้ำ		
หมักส่า โมลาส	Ton	36.340
กลั่นโมลาส	Ton	992.300
บรรจุ	Ton	387.540
ไอน้ำที่ผลิตได้	Ton	1,416.180
ค่าไฟฟ้า	บาท	21,161.20
น้ำ Soft + น้ำ Semi-Demin	บาท	9,675.86
535000011 เชื้อเพลิง ใช้ไป	บาท	1,534,252.58
535000030 Chemical Used & Factory Supply	บาท	429.93
รวมค่าใช้จ่ายผันแปร		1,565,519.57
เงินเดือน/ค่าจ้าง	บาท	178,355.52
คชจ.สินถาวรและวัสดุ สิ้นเปลือง	บาท	4,741.85
ค่าใช้จ่ายตัดจ่าย	บาท	64,693.54
ค่าซ่อมแซม	บาท	161,375.25
รวมเสียหุ้ยการผลิต	บาท	409,166.16
รวมต้นทุน	บาท	1,974,685.73
ต้นทุนผลิตไอน้ำบาท/ ตัน(รวมทั้งหมด)	บาท	1,394.37

8. ผลการวิเคราะห์การประหยัดพลังงาน

(ก) การคิดพลังงานที่ประหยัดได้

ไอน้ำที่ลดลงต่อวัน = 1.81 ตัน

จำนวนวันในการผลิตที่ 70% ของแผนปี = 169 วัน

ต้นทุนการผลิตไอน้ำต่อตัน = 1,394.37 บาท

คำนวณได้จากสมการ

พลังงานที่ประหยัดได้ = พลังงานที่ประหยัดได้ X

จำนวนวันในการผลิต X ต้นทุนการผลิตไอน้ำ

สมการที่ 8...

= 1.81 X 169 X 1,394.37

= 426,523.84 บาท

(ข) การคิดระยะเวลาคืนทุน

ราคาการสร้างเครื่องอุ่นน้ำป้อน = 294,332.00 บาท

ค่าดำเนินการ = 20,000 บาท

ค่าบำรุงรักษารายปี ปีละ = 35,000 บาท

ระยะเวลาคืนทุน = เงินทุนเบื้องต้น/(กำไร - ค่า

บำรุงรักษา) =

(294,332.00+20,000)/(426,523.84-35,000)

= 0.80 ปี

= 11 เดือน หรือ 155 วัน

ดังนั้นเมื่อใช้เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่นสำหรับ

เครื่องล้างขวด ทำงาน 24 ชั่วโมง ต่อวัน และใน 1 ปี

ทำงาน 169 วันสามารถคืนทุนได้ในเวลา 11 เดือน

หรือ 155 วัน

9. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า

การทำงานของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น สำหรับ

เครื่องล้างขวด โดยลดการใช้ไอน้ำในการอุ่นน้ำป้อนมี

อุณหภูมิของน้ำอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส เมื่อนำน้ำ

ป้อนมาแลกเปลี่ยนความร้อนจากน้ำสุราจาก

กระบวนการกลั่นโดยผ่านเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น

ด้วยติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่นให้กับเครื่อง

เครื่องล้างขวด ทำให้อุณหภูมิ น้ำป้อนเพิ่มขึ้น 33-35

องศาเซลเซียส ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ

เท่ากับ 0.0481 ตันต่อพันขวด คิดเป็นผลประหยัด

พลังงานไอน้ำ เท่ากับ 0.0103 ตันต่อพันขวด หรือ

เทียบเท่า 1.81 ต้นต่อวัน คิดเป็นเงิน 382,362.50 บาท เป็นไปตามข้อกำหนด และสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลา 0.80 ปี หรือ 11 เดือน (155 วัน) ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการ 204.6284 KW ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแผ่น มีสมรรถนะดี อัตราการใช้ไอน้ำในการล้างขวด

10. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากระบบการทำงานของเครื่องอุ่นน้ำป้อน ทำงานได้ดีแล้ว แต่ต้องระวังเรื่องการปรับอัตราการไหลของน้ำป้อน เมื่อเปิดวาล์วปรับอัตราการไหลของน้ำป้อนที่มากกว่าอัตราที่ทดลองจะทำให้อุณหภูมิของน้ำป้อนลดลงได้ จึงต้องระวังในการปรับอัตราการไหลของน้ำป้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย, การถ่ายเทความร้อน, ปรับปรุงและพิมพ์ครั้งที่ 3, โครงการตำราเรียนสำนักพิมพ์ ฟิสส์เซ็นเตอร์, พ.ศ.2533.
- [2] กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สถิติการขอขึ้นทะเบียนการใช้หม้อน้ำของอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร : กลุ่มงานวิศวกรรมเครื่องกล, พ.ศ.2551.
- [3] เกษม เสรีภาพสากล, ระบบการนำความร้อนกลับมาใช้ของน้ำทิ้งหม้อไอน้ำ สาขาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พ.ศ.2547, หน้า 129.
- [4] บริษัท วันไทยอุตสาหกรรมอาหาร จำกัด, การนำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสีย หม้อน้ำมาอุ่นน้ำป้อน. กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, พ.ศ.2550.
- [5] อุทัย ผ่องศรีมี, การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อชุด สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว, ศูนย์วิจัยพลังงานมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี, พ.ศ.2553.