RMUTP Research Journal Special Issue
The 5th Rajamangala University of Technology National Conference

การออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็งหลอด

The Design and Construction of Shell and Tube Heat Exchangers For Use in the Manufacture of Ice

ณัฐดนย์ พรรณุเจริญวงษ์[1*] รพีพัฒน์ ลาดศรีทา[1] สุกัญญา ทองโยธี[1]
ประพัฒพงษ์ ศรีเชียงสา[2] ดาวิทย์ สุภาภิรักษ์[2] และ ยุทธนากร วรรณศรี[2]

[1]อาจารย์ [2]นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดขอนแก่น 40000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบชุดแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อนำน้ำทิ้งจากระบบการผลิตน้ำแข็งมาใช้ประโยชน์ทั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็ง โดยได้ทำการออกแบบชุดแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยสแตนเลสมีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน 4.023 ตารางเมตร จากนั้นได้ทำการสร้างและนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนในบ่อน้ำทิ้งที่มีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จากการทดสอบพบว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้สามารถลดอุณหภูมิน้ำขาเข้าจากเดิม 28 องศาเซลเซียส เป็น 22 องศาเซลเซียสและทำให้ค่า COP ของระบบเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 52,034 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าใช้จ่าย 61,993 บาทต่อปีและมีระยะเวลาคืนทุน 0.5 ปี

Abstract

This paper presents a study of heat exchanger design for improving the performance of ice maker by using waste water from ice factory. The heat exchanger was made of stainless steel and had 4.023 m2 of heating surface. After using the heat exchange in the waste water pond which the temperature was 0 ˚C, the temperature of feed water was decreased from 28 ˚C to 22 ˚C. The COP of the ice maker was increased and the factory can save energy consumption 52,034 kWh/year or 61,993 baht/year. The payback period was 0.5 year

คำสำคัญ : เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน น้ำแข็งหลอด ระยะเวลาคืนทุน
Keywords : Heat exchanger, Tubular ice, Payback period

[*]ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ nattadon.pa@gmail.com โทร. 0 4323 5403

1. บทนำ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สาหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่าง ๆ ทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อน ส่วนใหญ่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ เช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบ สำหรับเปลี่ยนสภาวะของไอที่ออกมาจากหอ กลั่นให้เป็นของเหลว และสำหรับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือก๊าซ ในทำนองเดียวกันกับในอุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ก็ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิและลดอุณหภูมิ หรือหมุนเวียนความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่

ดังนั้นการนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้กับอุตสาหกรรมการทำน้ำแข็งหลอดเพื่อลดอุณหภูมิของน้ำก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องทำน้ำแข็งหลอด ซึ่งจะทำให้ลดการใช้พลังงานในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งของน้ำให้น้อยลง และจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลงได้ในท้ายที่สุด

2. วิธีการทดลอง

2.1 การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การออกแบบหรือเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในงานทางวิศวกรรมจำต้องมีความสามารถในการคาดคะเนอุณหภูมิตรงทางออกของของไหลร้อนและเย็นและสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดระหว่างของของไหลร้อนและเย็นได้ เมื่อทราบอัตราการไหลของมวลของของไหล ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (LMTD) และวิธี NTU ประสิทธิผลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยปกติมักใช้เป็นเวลานานโดยไม่เปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการทำงาน ดังนั้นอาจสมมุติว่าอุปกรณ์มีการไหลแบบสภาวะคงที่คุณสมบัติของไหลเช่นอุณหภูมิความเร็วที่ทางออกหรือทางเข้ามีค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ความร้อนจำเพาะของของไหลจะใช้ค่าเฉลี่ยเป็น ค่าคงที่การนำความร้อนตามแนวแกนของท่อมีไม่ค่อยมีความสำคัญและจะไม่นำมาคิดก็ได้ สุดท้ายสมมุติให้ ผิวนอกสุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มด้วย ฉนวนเป็นอย่างดีจนไม่มีการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้ง 2 ชนิดเท่านั้น

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์ ถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเท่ากับอัตราความจุความร้อนของของไหลคูณกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหลอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้ใน รูปของความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT ระหว่างของไหลที่ร้อนและเย็นโดยที่

$$\Delta T = T_i - T_o \qquad (1)$$

เมื่อ

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ, °C

T_i คือ อุณหภูมิขาเข้า, °C

T_o คือ อุณหภูมิขาออก, °C

อัตราการถ่ายเทความร้อนนี้หาจากกฎการเย็นตัวของนิวตันโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U แทนสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h แต่เนื่องจาก ΔT อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามตำแหน่ง ต่างๆในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีรูปสมการ เป็น

$$Q = UA\Delta T \qquad (2)$$

เมื่อ

Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, W

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, $W/m^2°C$

A คือ พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน, m^2

ΔT คือ ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสม
ระหว่างของไหล 2 ชนิด, $°C$

2.1.1 การถ่ายเทความร้อนรวม (The Overall Heat Transfer Coefficient)

เรื่องที่สำคัญเป็นอันดับแรกในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อในเชิงความร้อน ก็คือการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลสองชนิดนั้นได้นิยามความหมายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิเป็น T_h กับของไหลเย็นที่มีอุณหภูมิเป็น T_c ที่กั้นโดยผนังทึบด้วยสมการ

$$Q = UA(T_h - T_c) \quad (3)$$

$$UA = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=3} R_n} \quad (4)$$

เมื่อ

T_h คือ ของไหลอุณหภูมิสูง, $°C$

T_c คือ ของไหลอุณหภูมิต่ำ, $°C$

R คือ ค่าการต้านทานความร้อน, $°C/W$

สำหรับในกรณีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ประกอบด้วยท่อสองขนาดซ้อนร่วมแกนเดียวกันนั้น พื้นที่ผิวด้านในนั้นมีค่าเป็น $2\pi R_i L$ ส่วนที่พื้นผิวด้านนอกจะมีค่าเป็น $2\pi R_o L$ ดั้งนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คิดจาก A_o ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวด้านนอกก็จะมีค่าเป็น

$$U_0 A_0 = \frac{1}{\frac{1}{\bar{h}_{c,i} A_i} + \frac{\ln(r_0/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{\bar{h}_{c,o} A_o}} \quad (5)$$

$$U_0 = \frac{1}{\frac{A_o}{\bar{h}_{c,i} A_i} + \frac{A_o \ln(r_0/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{\bar{h}_{c,o} A_o}} \quad (6)$$

แต่ถ้าหากคิดจาก A_i ซึ่งเป็นพื้นที่ด้านในก็มีค่าเป็น

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{\bar{h}_{c,i}} + \frac{A_i \ln(r_0/r_i)}{2\pi kL} + \frac{A_i}{\bar{h}_{c,o} A_o}} \quad (7)$$

เมื่อ

k คือ ค่าการนำความร้อน, $W/m.K$

$\bar{h}$ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2°C$

r คือ รัศมี, m

2.1.2 หลักในการเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

- ต้องมีขนาดเหมาะสมกับสถานที่ติดตั้ง
- สามารถประกอบติดตั้งเครื่องด้วยความสะดวก
- มีอัตราการสูญเสียภายในท่อน้อยที่สุด

โดย อัตราการสูญเสียภายในท่อหาได้จาก

$$TDH = h_s + h_1 \quad (8)$$

เมื่อ

$h_s = \frac{KV^2}{2g}$ คือ การสูญเสียในอุปกรณ์ข้อต่อต่าง ๆ

$h_l = f\frac{LV^2}{D2g}$ คือ การสูญเสียภายในท่อตรง

h คือ เฮดสูญเสีย, m

K คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียภายในท่อ, -

V คือ ความเร็วของของไหล, m/s

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 m/s^2

f คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน, -

L คือ ความยาวของท่อ, m

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

- สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีโดย อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนหาได้จาก

$$Q = UA\Delta T \quad (9)$$

เมื่อ

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำกับน้ำแข็งซึ่งมีค่าเท่ากับ 900 W/m^2K

A คือ พื้นที่ผิวสัมผัส, m^2

ΔT คือ อุณหภูมิที่เข้าและออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, $°C$

2.1.3 การวิเคราะห์หากำลังไฟฟ้า

สมการการถ่ายเทความร้อน

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_2 - T_1) \quad (10)$$

เมื่อ

$\dot{Q}$ คือ ภาระความหลังปรับปรุงที่ประหยัดได้, kW

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของน้ำ kg/s

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ คือ 4.186 $kJ/kg.°C$

T_2 คือ อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าเครื่องทำน้ำแข็ง, $°C$

T_1 คือ อุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องทำน้ำแข็งหลังผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, $°C$

สมการการหากำลังไฟฟ้า

$$W = \frac{Q}{COP} \quad (10)$$

เมื่อ

W คือ กำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้, kW

COP คือ ค่าสมรรถนะของเครื่องทำน้ำแข็ง

$$Es = Wxh \quad (12)$$

เมื่อ

Es คือ พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้, kWh/y

h คือ ชั่วโมงในการทำงานในหนึ่งปี = 8,760 h/y

$$Bs = EsxB \quad (13)$$

เมื่อ

Bs คือ เงินที่ประหยัดได้, Baht/y

B คือ ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย, Baht/kWh

$$PBP = Price/Bs \quad (14)$$

เมื่อ

PBP คือ ระยะเวลาคืนทุน, y

Price คือ เงินลงทุนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, Baht

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

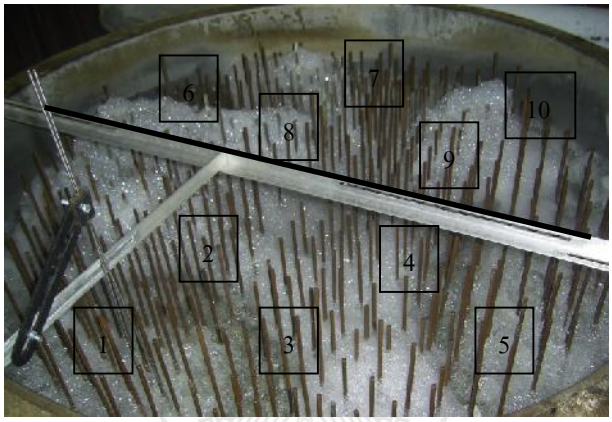
3.1 การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

รูปที่ 1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังรูปที่ 1 จากนั้นทำการทดลองดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. ติดตั้งเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า เครื่องมือวัดอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมผัสอากาศ เครื่องมือวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล

2. เลือกหลอดทำน้ำแข็งที่จะทำการวัดจำนวน 10 หลอด โดยที่แต่ละหลอดจะตั้งอยู่ในตำแหน่งต่างๆของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เลือกหลอดทำน้ำแข็ง

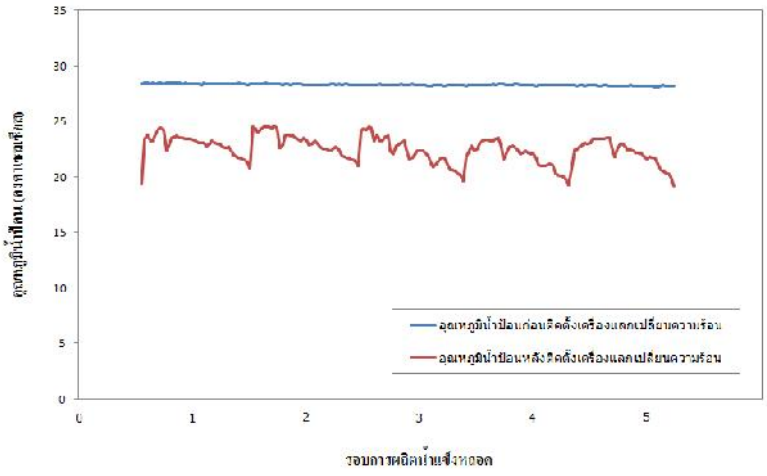
3. เริ่มทำการวัดเก็บข้อมูลเมื่อมีการปล่อยน้ำเข้าสู่ท่อทำน้ำแข็งเป็นค่าแรก และอ่านค่าความดันขาเข้าและออกที่เครื่องอัดไอเพื่อใช้ในการหาค่าอุณหภูมิอิ่มตัวของแอมโมเนีย R-717 ในการผลิตนั้นๆ

4. จากนั้นเริ่มทำการเก็บวัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดทุกๆ 5 นาที โดยเริ่มจาก หลอดที่ 1 ในนาทีที่ 5 หลอดที่ 2 ในนาทีที่ 10 หลอดที่ 3 ในนาทีที่ 15 ทำเช่นนี้
ไปเรื่อยๆจนครบทั้ง 10 หลอดในนาทีที่ 35 โดยค่าสุดท้ายในนาทีที่ 36 จะเป็นการวัดค่าของน้ำแข็งที่ออกจากเครื่องมาแล้ว ถือเป็นข้อมูล 1 ชุด วัดค่าอุณหภูมิต่างๆ และวัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด

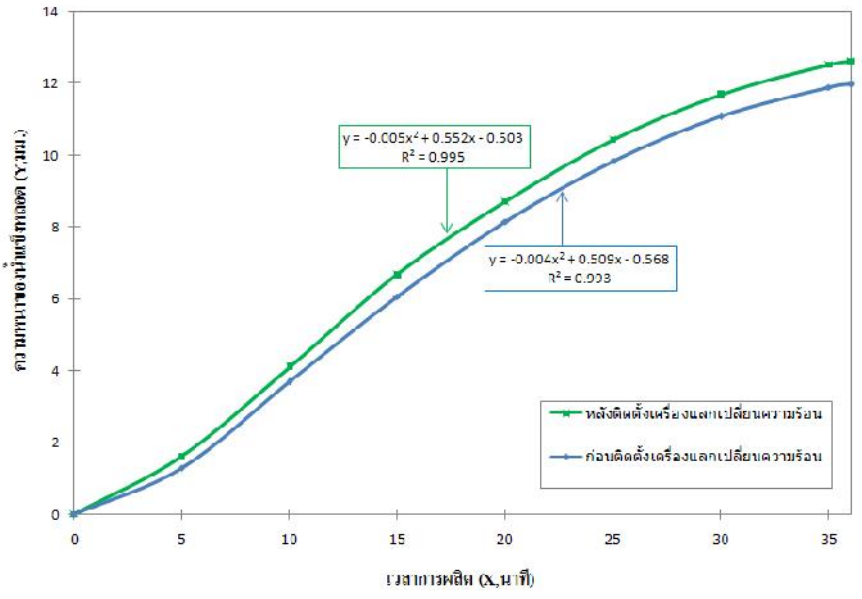
5. ในรอบการผลิตถัดๆไปจะเริ่มเก็บวัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดจากหลอดที่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ตามลำดับ สลับหมุนเวียนกันไปเรื่อยๆซึ่งจะได้ข้อมูลมาทั้งสิ้นจำนวน 10 ชุด

6. จากนั้นนำค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ได้นั้นมาคูณกับค่าปรับแก้ที่ได้จากทฤษฎีสามเหลี่ยมคล้าย โดยที่หัววัดนี้มีค่าปรับแก้ที่ 2.579 และนำมาลบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อคือ 35 มิลลิเมตร แล้วหารค่าที่ได้ด้วย 2 เพื่อจะได้ค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด ณ เวลา นั้นๆ ของแต่ละชุดข้อมูล

7. นำค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ได้มาทั้งหมดหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาเมื่อยังไม่ได้ติดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



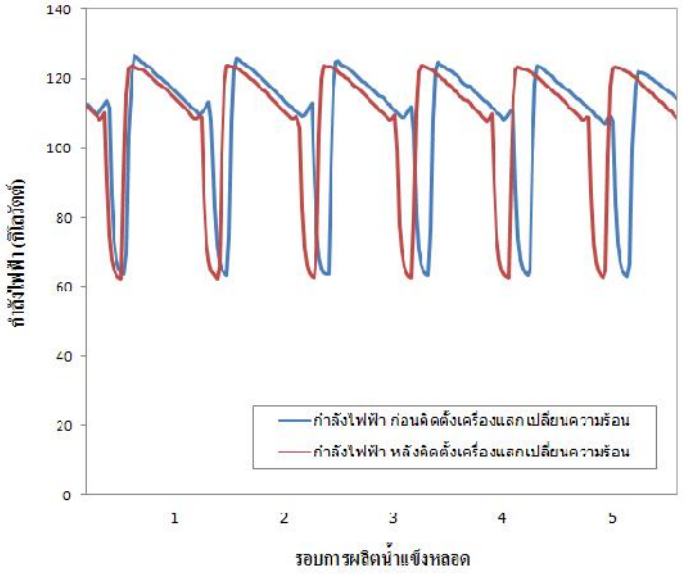
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำป้อนกับรอบการผลิตน้ำแข็งหลอดเปรียบเทียบกัน ระหว่างก่อน-หลังติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผลิตกับความหนาของน้ำแข็งเปรียบเทียบกัน ระหว่างก่อน-หลังติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากรูปที่ 3 และ 4 แสดงผลต่างของอุณหภูมิก่อน-หลังติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการวัดค่าหลังจากติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอุณหภูมิน้ำขาเข้าแสดงเป็นเส้นสีน้ำเงินและอุณหภูมิน้ำขาออกแสดงเป็นเส้นสีแดง จากกราฟ (รูปที่ 3) จะเห็นว่าเส้นอุณหภูมิสีน้ำเงินจะค่อนข้างคงที่ เนื่องจากน้ำที่เข้ามาเป็นน้ำดิบที่ยังไม่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนเส้นอุณหภูมิของน้ำขาออกจะเห็นว่ามีบางช่วงของกราฟมีอุณหภูมิต่ำลงถึง $19\,^{\circ}C$ ซึ่งเป็นช่วงที่ครบรอบการทำงานของเครื่องทำน้ำแข็งทำให้เกิดน้ำล้นจากเครื่องทำน้ำแข็งไหลลงอ่างน้ำล่างที่มี

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแช่อยู่ ทำให้อุณหภูมิของน้ำในอ่างน้ำล่างต่ำลงทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงนี้ดีขึ้น ทำให้น้ำขาออกมีอุณหภูมิต่ำลงมาก เมื่อเครื่องทำน้ำแข็งดึงน้ำเข้าเครื่องในรอบการผลิตใหม่ จะทำให้อุณหภูมิของน้ำขาออกมีอุณหภูมิสูงขึ้นมา ดังนั้นจะเห็นว่าอุณหภูมิน้ำป้อนก่อนติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเฉลี่ย 28 °C อุณหภูมิน้ำป้อนหลังติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเฉลี่ย 22 °C จะได้ผลต่างของอุณหภูมิน้ำป้อนก่อน-หลังติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ลดต่ำลงเฉลี่ย 6 °C ต่อรอบการผลิตน้ำแข็งหลอด จึงส่งผลให้น้ำแข็งหลอดหนาเร็วขึ้นกว่าก่อนติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบการผลิตน้ำแข็งหลอดกับกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ เปรียบเทียบกันระหว่างก่อน-หลังติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ก่อนติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่า 109.05 kW หรือ 58.72 kW-h/ton กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์หลังติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่า 108.00 kW หรือ 58.15 kW-h/ton กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์เฉลี่ยหลังติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ผลิตน้ำแข็งหลอดมีค่าลดลงประมาณ 1.05 kW หรือ 0.57 kW-h/ton ภาระความเย็นหลังปรับปรุงที่ประหยัดได้ 18.34 kW ค่าสมรรถนะของเครื่องทำน้ำแข็งเท่ากับ 3.09 กำลังไฟฟ้าที่ประหยัดได้ 5.94 kW พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ 52,034 kWh/y เงินที่ประหยัดได้ 61,993 Bath/y ระยะเวลาคืนทุนประมาณ 6 เดือน

4. สรุป

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งเข้ากับเครื่องทำน้ำแข็งหลอดสามารถลดอุณหภูมิน้ำขาเข้าจากเดิม 28 องศาเซลเซียส เป็น 22 องศาเซลเซียสและทำให้ค่า COP ของระบบเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 52,034 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ 61,993 บาทต่อปีและมีระยะเวลาคืนทุน 0.5 ปี

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

6. เอกสารอ้างอิง

Frank P. Incropera and Dewitt, David P. 2002. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. John-Wiley & Sons. New York. USA: pp. 905-916.

Dube and et al. 1996. **Design construction and testing of a thermosyphon heat exchanger for medium temperature heat recovery**. Proc.5th Int. Heat pipe symposium. Australia.

เจนจิรา เปี่ยมดี. 2545. **การออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในขบวนการอบแห้งขนม**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย.มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุนทร สิงหจารุ. 2547. **การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการดึงกลับความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงถ่านหิน**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Roshsenow, W.M., Harnett, J.P. and Ganic, E.N. 1985. **Handbook of Heat Transfer Applications, McGraw-Hill**. New York.