การศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ชนิดครีบและท่อ กรณีศึกษา ภายใต้สภาวะการเกิดชั้นน้ำแข็งที่ผิว Studying and Parameter Analysis of Fin – tube Heat Exchanger Case study Frosting Condition

นายจิตติ พัทธวณิช รศ.คร.ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ถนนพิบูลสงคราม เขตดุสิต กรุงเทพ 10800 โทร 06-527-0401 E-mail: jittip@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ มีจุดประสงค์เพื่อทำการ จำลองแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ชนิดครีบและ ท่อ กรณีเกิดชั้นน้ำแข็งที่ผิวของคอล์ยเย็น ขนาด 10.3 kW จากการจำลองแบบ พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของ ความหนาชั้นน้ำแข็งจะแปรผันโดยตรงกับ ความชื้น สัมพัทธ์ และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ แต่ จะแปรผกผันกับความหนาแน่นครีบ และอัตราการ ถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับคอล์ยจะแปรผกผัน กับความหนาของชั้นน้ำแข็ง ผลจากการจำลองแบบ นำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ARI-1983 พบว่าก่า ความหนาของชั้นน้ำแข็งมีก่าความแตกต่างอยู่ในช่วง 4.65% จนถึง 10.6%

Abstract

The objective of this research is to simulate 10.3 kW finned tube heat exchanger to study the effect of frost forming on the surface upon the cooling coil. From the simulation it was found that the frost growth rate varies directly with relative humidity and air volume flow rate. In contrast, the growth rate negatively correlates with fin density while the heat transfer rate between air and cooling coil with frost thickness. When the result of the simulation was compared to the ARI-1983 standard testing, it was discovered that the errors of frost thickness ranged between 4.65% and 10.6%.

1. ບກນຳ

การเกิดชั้นน้ำแข็งปกคลุมผิวของเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่ออากาศชื้นไหลผ่าน ผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ศูนย์องศาเซลเซียส เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำ ความร้อนภายในชั้นน้ำแข็งมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์ การพาความร้อนของอากาศ ดังนั้นเมื่อความหนาของ ชั้นน้ำแข็งเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้เสมือนกับเป็นการหุ้ม ฉนวนที่ผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [1] ทำให้ ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลง และทำให้ เกิดค่าความดันแตกต่างที่ช่องการไหลของอากาศเพิ่ม สูงขึ้น

2. ทฤษฎี

2.1 การถ่ายเทความร้อนและมวลของใอน้ำ

จากกระบวนการควบแน่นของไอน้ำในอากาศ กลายเป็นชั้นน้ำแข็ง พบว่าจะมีทั้งการถ่ายเทความร้อน สัมผัส (Sensible heat) และความร้อนแฝง (Latent heat)

ดังนั้นความร้อนที่ถ่ายเททั้งหมดเท่ากับผลรวม ของกวามร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_S + \dot{Q}_L \tag{1}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนสัมผัสเท่ากับ

$$\dot{Q}_s = h_a \cdot A \cdot \left(T_a - T_s\right) \tag{2}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนแฝงเท่ากับ

$$\dot{Q}_{L} = h_{m} \cdot A \cdot \left(\omega_{a} - \omega_{s}\right) \cdot i_{ig} \qquad (3)$$

อัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำเท่ากับ

$$\dot{m}_{v} = h_{m} \cdot A \cdot \left(\omega_{a} - \omega_{s}\right) \tag{4}$$

จากสมมุติฐานความคล้ายของเรย์โนลด์ (Reynolds analogy) จะได้ความสัมพันธ์ [2]

$$h_m = \frac{h_a}{Le^{\frac{2}{3}} \cdot Cpm}$$
(5)

โดยกำหนดให้ค่า *Le* มีค่าเท่ากับ 1 [2]

2.2 แบบจำลองของการเกิดชั้นน้ำแข็ง[1]

แบบจำลองการเกิดชั้นน้ำแข็ง จะพิจารณาไอ น้ำที่ถ่ายเทสู่ผิวชั้นน้ำแข็งเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็น ไอน้ำที่ซึมผ่านชั้นความพรุนซึ่งจะมีผลต่อความ หนาแน่นของชั้นน้ำแข็ง ไอน้ำส่วนที่สองจะเกิดการ ควบแน่นและกลายเป็นน้ำแข็งที่ผิวด้านบนของชั้น น้ำแข็งซึ่งจะทำให้ความหนาชั้นน้ำแข็งเพิ่มขึ้น โดย สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

อัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำส่วนที่ซึมผ่าน ชั้นความพรุนของน้ำแข็งแสดงได้ดังนี้

$$\frac{d\rho_{frost}}{dt} \cdot x_{frost} = \dot{m}_{sd} \tag{6}$$

อัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำส่วนที่ทำให้ ความหนาของชั้นน้ำแข็งเพิ่มขึ้นเท่ากับผลต่างระหว่าง มวลของไอน้ำรวมกับมวลของไอน้ำส่วนที่ซึมผ่านชั้น ความพรุนของน้ำแข็ง

$$\frac{dx_{frost}}{dt}\rho_{frost} = \dot{m}_T - \dot{m}_{sd} \tag{7}$$

เมื่อ

$$\dot{m}_{sd} = D \frac{\left(1 - \frac{\rho_{frost}}{\rho_{ice}}\right)}{\tau} \left(\frac{d\rho_{v}}{dx}\right)$$
(8)

2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ อากาศ

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศที่ ใหลผ่านผิวท่อและครีบ สามารถคำนวณได้จาก Colburn factor (j)ของการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดง ได้ดังสมการ (9)

$$j = \frac{h_a \operatorname{Pr}^{2/3}}{\rho_a C p m \overline{V}} \tag{9}$$

ค่า Colburn factor ของอากาศที่ใหลผ่านท่อที่ มีการจัดเรียงแบบแถวเยื้อง (Stagger arrangement) กับ ครีบที่มีลักษณะขรุขระ (Wavy fin) ค่า Colburn factor ของครีบแบบขรุขระกับจำนวนท่อ 3 แถว สามารถหา ได้จากความสัมพันธ์ [2] ดังนี้

$$j_3 = 0.39 \operatorname{Re}_{D}^{0.037} \cdot \left(\frac{X_i}{X_i}\right)^{-0.272} \cdot \left(\frac{s}{D}\right)^{-0.205} \cdot \left(\frac{X_j}{P_d}\right)^{-0.558} \cdot \left(\frac{P_d}{s}\right)^{-0.133} \quad (10)$$

2.4 ประสิทธิภาพของครีบกรณีที่ผิวครีบมีชั้น น้ำแข็งปกคลุม

กรณีที่ครีบมีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม (Rectangular plate fin) ค่าประสิทธิภาพของครีบหาได้จาก การใช้พื้นฐานของประสิทธิภาพของครีบวงแหวนที่มี รัศมีเท่ากับ R_e ที่มีประสิทธิภาพของครีบเท่ากับ ประสิทธิภาพของครีบที่มีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม [2]

ประสิทธิภาพของครีบวงแหวนหาได้จาก[2]

$$\eta_f = \frac{\tanh(m \cdot r \cdot \phi)}{m \cdot r \cdot \phi} \tag{13}$$

2.5 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับ ภายในท่อที่มีการใหลแบบปั่นป่วน [8]

เมื่อสารทำความเย็นอยู่ในสภาวะสองสถานะ Pierre [4] ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับ การระเหย ที่ไม่สมบูรณ์ จากค่าคุณภาพไอที่ทางเข้าเท่ากับ 0.2 และที่ทางออก 0.9 ซึ่งสามารถใช้ได้กับสารทำความ เย็น R12, R22 และR11 ได้สมการดังนี้

$$\frac{h_{2p} \times D_i}{k_{r,l}} = 0.0009 \times \left[\text{Re}_r^2 \times K f \right]^{0.5} \quad (14)$$

2.6 การถ่ายเทความร้อนรวมในเครื่อง แถกเปลี่ยนความร้อน

การถ่ายเทความร้อนรวม

$$Q_T = UA\Delta T_{lm} \tag{15}$$

จะเท่ากับ

$$Q_{T} = \frac{UA[(T_{a,in} - T_{r}) - (T_{a,out} - T_{r})]}{\ln\left(\frac{T_{a,in} - T_{r}}{T_{a,out} - T_{r}}\right)}$$
(16)

3. ผลการวิจัย

ในการจำลองแบบจะแบ่งเป็น 4 กรณีตามการ ทดลอง [5] ซึ่งแต่ละกรณีได้กำหนดก่าพารามิเตอร์ ของอากาศดังตารางที่ 1

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการเพิ่มขึ้น ของความหนาชั้นน้ำแข็งที่ผิวครีบเทียบกับเวลาที่ได้ จากการทดลองดังภาพที่ 3-1 พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้น ของความหนาชั้นน้ำแข็งในช่วงเวลา 0 จนถึง34 min จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 0.0076 mm/min และที่ อัตราเฉลี่ย 0.018 mm/min ในช่วงเวลา 34 จนถึง 51 min แต่จากกราฟที่ได้จากการจำลองแบบ พบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาชั้นน้ำแข็งจะมีอัตรา การเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 0.0061 mm/min ที่ ช่วงเวลา 0 จนถึง34 min และที่อัตราเฉลี่ย 0.0069 mm/min ที่ช่วงเวลา 34 จนถึง 51 min

3.2 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับการ จำลองแบบที่ 2



ตารางที่ 3-1 เงื่อนไขสภาวะของอากาศและคอล์ย

การจำลองแบบนี่	อัตราการ ^ท ี่หลเชิง ปริมาตร (m ³ /min)	อุณหภูมิ ([°] C)	ลามชื่นสัมพัทธ ์	จำนวนครีบที่คอลัย แถวที่ 1
1	79.3	1.7	82%	8 fins/cm
2	59.5	1.7	82%	8 fins/cm
3	59.5	1.7	95%	8 fins/cm
4	79.3	1.7	82%	6 fins/cm

3.1 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับการ
จำลองแบบที่ 1



จากกราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการเพิ่มขึ้น ของความหนาชั้นน้ำแข็งที่ผิวครีบเทียบกับเวลาที่ได้ จากการทดลองดังภาพที่ 3-3 พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้น ของความหนาชั้นน้ำแข็งในช่วงเวลา 0 จนถึง20 min จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 0.0085 *mm*/min และ ที่ อัตราเฉลี่ย 0.032 *mm*/min ในช่วงเวลา 20 จนถึง29 min แต่จากกราฟที่ได้จากการจำลองแบบ พบว่าอัตรา การเพิ่มขึ้นของความหนาชั้นน้ำแข็งจะมีอัตราการ เพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 0.0094 *mm*/min ที่ช่วงเวลา 0 จนถึง20 min และที่อัตราเฉลี่ย 0.0092 *mm*/min ที่ช่วงเวลา 20 จนถึง29 min

3.4 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับการ จำลองแบบที่ 4



จากกราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการเพิ่มขึ้น ของความหนาชั้นน้ำแข็งที่ผิวครีบเทียบกับเวลาที่ได้ จากการทดลองดังภาพที่ 3-2 พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้น ของความหนาชั้นน้ำแข็งในช่วงเวลา 0 จนถึง36 min จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 0.0086 *mm*/min และ ที่ อัตราเฉลี่ย 0.0159 *mm*/min ในช่วงเวลา 36 จนถึง 40 min แต่จากกราฟที่ได้จากการจำลองแบบ พบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาชั้นน้ำแข็งจะมีอัตรา การเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 0.011 *mm*/min ที่ ช่วงเวลา 0 จนถึง36 min และที่อัตราเฉลี่ย 0.0073 *mm*/min ที่ช่วงเวลา 36 จนถึง40 min

3.3 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับการ จำลองแบบที่ 3



จากกราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการเพิ่มขึ้น ของความหนาชั้นน้ำแข็งที่ผิวครีบเทียบกับเวลาที่ได้ จากการทดลองดังภาพที่ 3-4 พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้น ของความหนาชั้นน้ำแข็งในช่วงเวลา 0 จนถึง65 min จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 0.0043 *mm*/min และ ที่ อัตราเฉลี่ย 0.0124 *mm*/min ในช่วงเวลา 65 จนถึง 90 min แต่จากกราฟที่ได้จากการจำลองแบบ พบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาชั้นน้ำแข็งจะมีอัตรา การเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 0.0041 *mm*/min ที่ ช่วงเวลา 0 จนถึง65 min และที่อัตราเฉลี่ย 0.0064 *mm*/min ที่ช่วงเวลา 65 จนถึง90 min

4. สรุปผลการจำลองแบบ

จากภาพแสดงความแตกต่างระหว่างผลการ ทดสอบและผลการจำลองแบบ พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จะมีค่าความแตกต่างเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในการ จำลองแบบ ค่าอุณหภูมิและอัตราการ ใหลของสารทำ ความเย็นจะถูกกำหนดให้คงที่ตลอดช่วงเวลาการ คำนวณแต่ในการทคสอบค่าอุณหภูมิและอัตราการ ใหลของสารทำความเย็นจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เนื่องจากผลของความหนาชั้นน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะ ส่งให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงซึ่งจะส่งผลต่อ อุปกรณ์ควบคุมอัตราการ ใหลของสารทำความเย็น และอุณหภูมิของสารทำความเย็น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุน และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์การ ทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rin Yun, Yongchan Kim, Man-ki Min, "Modelling of frost growth and frost properties with air flow over flat plate." <u>International Journal of Refrigeration</u>. 25, (2002): 362-371.
- [2] B. W. Jones, J. D. Parker, "Frost Formation With Varying Environmental Parameter." <u>Journal of Heat Transfer.</u> 97, (1975) : 255-259.
- [3] Faye C. McQuiston, Jerald D. Parker. <u>Heating,Ventilating,and Air Conditioning</u> <u>Analysis and Design.</u> 4th ed. John Wiley & Sons. c1994
- [4] N. H. Kim, J. H. Yun and R. L. Webb. "Heat Transfer and Friction Correlations for Wavy Plate Fin-and-Tube Heat Exchangers." Journal of Heat Transfer. 119, (1997) : 560-567.
- [5] S. P. Oskarsson, K. I. Krakow and S. Lin. "Evaporator Model for Operation with Dry, Wet, and Frosted Finned Surfaces Part1: Heat Transfer and Fluid Flow Theory." <u>ASHRAE</u> <u>Transaction</u>. 96, (1990) : 373-380.
- [6] Richard J. Watters., Dennis L. O' Neal., Jianxin Yang., "Effect of Fin Staging on Frost/Defrost Performance of a Two-Row Heat Pump Evaporator at Standard Test Condition." <u>ASHRAE Transaction</u>. 107, (2001) : 240-249.