

การศึกษาภาระความเย็นและอัตราการผลิตน้ำแข็งจากการเพิ่มประสิทธิภาพของ กระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดด้วยวิธีการพ่นแต่งผิวด้วยลูกปทราย

A Study of Cooling Load and Production Rate from an Improvement of the Tubular-Ice Making Process by Sand Blasting

ภูวนาท กาบคำ¹ จิตติน แทงเที่ยง²
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เขต ปทุมวัน กรุงเทพฯ, 10330
โทร 0-22186590 โทรสาร 0-22522889 E-mail: puvanat_g@hotmail.com¹, fmectt@eng.chula.ac.th²

Puvanat Ghabkham¹ Chittin Tangthieng²
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Patumwan Bangkok, 10330, Thailand
Tel: 0-22186590 Fax: 0-22522889 E-mail: puvanat_g@hotmail.com¹, fmectt@eng.chula.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาภาระความเย็นและอัตราการผลิตน้ำแข็งเมื่อเทียบกับเวลาของกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยทั่วไปแล้วภาระความเย็นจะส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานของระบบทำความเย็น ดังนั้นวิธีการพ่นแต่งผิวด้วยลูกปทรายที่บริเวณผิวท่อด้านนอกของอีวาพอเรเตอร์ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต ในเบื้องต้นนั้นการศึกษาจะทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างการคำนวณจากทางทฤษฎีและการตรวจวัดภาคสนามในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งโดยทั่วไปท่อที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งจะเป็นท่อเปล้า จากการตรวจวัดในภาคสนามนั้นจะเห็นว่ากระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในคาบเวลาช่วงสั้นๆ ประมาณ 20 ถึง 30 นาทีต่อรอบการผลิต ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งหลอดสู่สารทำความเย็น (แอมโมเนีย) ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ในระหว่างการทำความเย็นนั้น สารทำความเย็นภายในเครื่องระเหยจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอโดยการเดือด ซึ่งคุณสมบัติของแอมโมเนียที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดจะใช้ที่อุณหภูมิอิ่มตัว -7.5 องศาเซลเซียส โดยในการศึกษาทางทฤษฎีนั้น จะมีข้อสมมติฐานเบื้องต้นคือกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เป็นแบบ Quasi-steady ใน 1 มิติ และความหนาของน้ำแข็งเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยการหารูปแบบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะต้องอาศัยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อช่วยในการแก้ปัญหาของระบบสมการและกระบวนการคำนวณซ้ำ ความหนาของน้ำแข็งซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาจะประมาณได้จากเงื่อนไขขอบเขตบริเวณรอยต่อของน้ำและน้ำแข็ง โดยผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าจากภาคสนามและการคำนวณจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกันในเชิงคุณภาพ โดยจะเห็นว่าอัตราการผลิตน้ำแข็งและภาระความเย็นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มแรกหลังจากเริ่มการแข็งตัว หลังจากนั้นอัตราการผลิตน้ำแข็งและภาระความเย็นจะเริ่มลดลงในอัตราที่ช้าลงจนเกือบคงที่จนเสร็จสิ้น

กระบวนการ จากนั้นก็นำทฤษฎีดังกล่าวไปทำนายภาระความเย็นและอัตราการผลิตน้ำแข็งหากพื้นผิวด้านนอกของท่อได้ทำการพ่นแต่งด้วยลูกปทราย จะพบว่าค่าภาระความเย็นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น และส่งผลให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้นเช่นกัน

Abstract

This research is a study of cooling load and ice production rate as a function of time. Generally, the cooling load has a direct effect on the energy consumption of the system. To enhance heat transfer between the tube surface and the refrigerant (ammonia), sand blasting can be applied on the outer surface of the evaporator, resulting in a higher efficiency. In this study, the data obtained from the theoretical calculation are compared with the field data measured from an ice factory. Note that the tubes within the ice-making machine are usually plain ones. According to the field measurement, the cycle of the ice production is approximately 20 to 30 minutes. During the ice-making process, ammonia will boil within the evaporator and absorb heat from the circulated water generating ice on the inner tube surface. The properties of ammonia used in this calculation are at saturation temperature of -7.5 °C. The major assumptions of this theoretical study are one-dimensional and quasi-steady problem. However, the ice thickness, which is still a function of time, can be calculated from the boundary condition at the freezing temperature. Determination of roots of equation and iterative procedure are employed to obtain temperature at the tube surface. The measured data and the theoretical prediction have an agreement quantitatively. It is found that the ice

production rate and the cooling load decrease rapidly in the early stage of solidification. Thereafter, the reduction rates of both quantities start decreasing until they are almost constant at the end of the process. By utilizing the similar method to predict the heat transfer enhancement of the rough tube generated by sand blasting, it can be seen that both cooling load increases, leading to higher ice production rate.

1. บทนำ

เนื่องด้วยในปัจจุบันในประเทศไทยมีโรงงานน้ำแข็งอยู่เป็นจำนวนมากจากการที่การขนส่งจะทำได้ในระยะไกลๆ จึงต้องมีโรงงานอยู่ใกล้กับแหล่งชุมชนที่อยู่อาศัยและธุรกิจอุตสาหกรรมต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้น้ำแข็งในการบริโภคและการดำเนินการ และแนวโน้มของการขยายตัวของแหล่งที่อยู่อาศัยและภาคธุรกิจในปัจจุบันนี้มีการเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งก็ทำให้มีการตั้งโรงงานในอุตสาหกรรมประเภทนี้มากขึ้นสูงตามไปด้วย และในกระบวนการผลิตการผลิตแต่ละครั้งนั้นจำเป็นต้องใช้เวลานานทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมากในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็งนี้ ซึ่งค่าใช้จ่ายในการซื้อพลังงานไฟฟ้าก็สูงมากเช่นกัน การที่กระบวนการผลิตใช้พลังงานน้อยลงและได้ประสิทธิภาพที่มากขึ้นนั้นก็จะเป็นไปได้

ในการวิจัยครั้งนี้จะมุ่งเน้นที่ชุดคอยล์เย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดสวนของวัสดุที่ใช้ทำท่อที่ใช้บรรจุน้ำดิบเพื่อที่จะผลิตเป็นน้ำแข็งหลอด การออกแบบระบบทางความร้อนของชุดคอยล์เย็นนี้ซึ่งจะลักษณะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งจะมีการเดือดของสารทำความเย็นที่ภายนอกของพื้นผิวท่อโดยปรับปรุงสภาพพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนในส่วนที่สัมผัสกับสารทำความเย็น ให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นโดยการทำให้พื้นผิวส่วนที่สัมผัสกับสารทำความเย็นมีพื้นผิวที่ขรุขระโดยการตกแต่งพื้นผิว ด้วยวิธีการพ่นลูกปรายไปที่กับพื้นผิว ซึ่งหากเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในส่วนนี้ได้จะสามารถประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดไอลงได้ หรือสามารถเพิ่มปริมาณผลผลิตขึ้นได้

2. การวิเคราะห์ทางทฤษฎีและรูปแบบปัญหา

ในงานวิจัยชิ้นนี้การวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อช่วยให้มีความสะดวกในการคำนวณมากขึ้น ดังนี้

- (1) กระบวนการนี้ทำงานบนสภาวะ Quasi-steady
- (2) เป็นการนำความร้อนใน 1 มิติ
- (3) ความหนาของน้ำแข็งเป็นฟังก์ชันของเวลา
- (4) คุณสมบัติของสารทำความเย็นและท่อมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

2.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะเดือดบนพื้นผิวเรียบ

การหาค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดของแอมโมเนียเพื่อที่จะได้นำมาสู่การหาค่าของภาวะความเย็น ซึ่ง

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ Stephan และ Abdelsalam [1] ดังนี้

$$\frac{\alpha_{nb} d}{k_L} = 0.0546 \left[\left(\frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{1/2} \left(\frac{q d}{k_L T_{sat}} \right) \right]^{0.67} \left(\frac{\Delta h_v d^2}{a_L^2} \right)^{0.248} \left(\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_L} \right)^{-4.33} \quad (1)$$

และ

$$d = 0.0146 \beta \left[\frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะเดือดบนพื้นผิวขรุขระ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดลองใช้ความสัมพันธ์ทางทฤษฎี 2 ความสัมพันธ์ดังนี้

- Nishikawa และ Ito [2] ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองกับสารทำความเย็น R-11, R-113 และ Benzene ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{q \delta_p}{k_m (T_w - T_{sat})} = 0.639 \left(\frac{\sigma^2 \Delta h_v}{q^2 \delta_p^2} \right)^{0.658} \left(\frac{\delta_p}{d_p} \right)^{0.626} \left(\frac{q d_p}{\varepsilon \Delta h_v \mu_v} \right)^{0.665} \left(\frac{k_m}{k_L} \right)^{-0.692} \left(\frac{\rho_L}{\rho_v} \right)^{0.904} \quad (3)$$

เมื่อค่าสภาพนำความร้อนของชั้นผิวขรุขระ คือ

$$k_m = \varepsilon k_L + (1 - \varepsilon) k_p \quad (4)$$

โดยมีข้อจำกัดในการใช้งานดังนี้

$$0.1 \leq d_p \leq 1.0 \quad (\text{in mm})$$

$$1.6 < \delta_p / d_p < 20$$

$$0.38 < \varepsilon < 0.71$$

$$61 < k_p < 372 \quad \left(\text{in } \frac{W}{mK} \right)$$

จากความสัมพันธ์นี้เมื่อนำมาทดลองคำนวณทางทฤษฎีกับแอมโมเนียพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้นั้นไม่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ดังนั้นจึงได้ทดลองหาความสัมพันธ์ใหม่เพื่อใช้กับกรณีนี้

- Rudemiller และ Lindsay [3] ซึ่งได้สร้างความสัมพันธ์นี้จากทดลองใช้กับการทำพื้นผิวให้ขรุขระโดยกรรมวิธีพ่นพลาสติกและเปลวไฟ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Ja = 0.137 [Re]^{0.292} [\lambda]^{-0.190} [N_{cf}]^{0.065} \quad (5)$$

โดยที่

$$Re = \frac{q \eta}{\Delta h_v \mu_L \varepsilon} \quad (6)$$

$$Ja = \frac{C_{pL} \Delta T}{\Delta h_v} \quad (7)$$

$$N_{cf} = \frac{\mu_L^2}{\eta \rho_L \sigma} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\eta}{\delta} \quad (9)$$

โดยเมื่อแทนสมการที่ (6)-(9) ลงในสมการที่ (5) จะได้เป็น

$$\frac{C_{pt}\Delta T}{\Delta h_v} = 0.137 \left[\frac{q\eta}{\Delta h_v \mu_L \varepsilon} \right]^{0.292} \left[\frac{\eta}{\delta} \right]^{-0.190} \left[\frac{\mu_L^2}{\eta \rho_L \sigma} \right]^{0.065} \quad (10)$$

ซึ่งมีข้อจำกัดในการใช้งานดังนี้

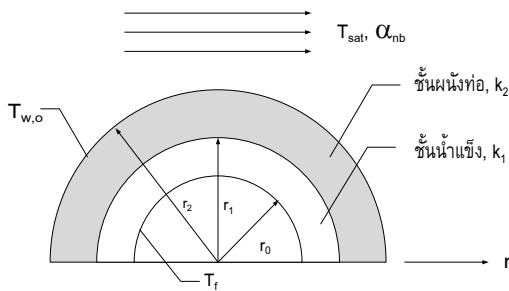
$$6.909 \times 10^{-5} \leq Re \leq 1.899 \times 10^{-1}$$

$$6.667 \times 10^{-3} \leq \lambda \leq 1.667 \times 10^{-1}$$

$$7.773 \times 10^{-4} \leq N_{cr} \leq 4.787 \times 10^{-3}$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดของแอมโมเนียที่ได้จากความสัมพันธ์นี้เมื่อใช้กับกรณีของงานวิจัยนี้ได้ค่าออกมาอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และมีความเป็นไปได้จึงจะใช้ความสัมพันธ์นี้ในการคำนวณต่อไป

2.3 การหาค่าการะความเย็นของระบบ



รูปที่ 1 แสดงการจำลองรูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 1 โดยสมมติฐานว่าระบบอยู่ในสภาวะ Quasi-steady ความต้านทานความร้อนรวมดังนี้

$$R = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{k_1} \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) + \frac{1}{k_2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{r_2 \alpha_{nb}} \right] \quad (11)$$

ซึ่งค่าการะความเย็นต่อหน่วยความยาวของท่อ (W/m) คือ

$$\dot{Q} = \frac{2\pi(T_f - T_{sat})}{\left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) + \frac{1}{k_2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{r_2 \alpha_{nb}} \right\}} \quad (12)$$

ซึ่งจากสมการที่ (3) และ (10) จะสามารถที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดโดยการแทนค่าคุณสมบัติของสารทำความเย็นลงไป แล้วจัดอยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

จาก

$$q = \alpha_{nb} \Delta T \quad (13)$$

$$\Delta T = T_{w,o} - T_{sat} \quad (14)$$

- สำหรับท่อผิวเรียบจะได้จากสมการที่ (3) เป็นดังนี้

$$\alpha_{nb} = C \cdot \left(\frac{\Delta T}{T_{sat}} \right)^{2.0303} \quad (15)$$

หรือ

$$\alpha_{nb} = C_s \cdot \Delta T^{2.0303} \quad (16)$$

โดย C และ Cs = เป็นค่าคงที่

- สำหรับท่อผิวขรุขระจะได้จากสมการที่ ((10) เป็นดังนี้

$$\alpha_{nb} = C_r \cdot \Delta T^{2.42457} \quad (17)$$

โดย Cr = ค่าคงที่

ซึ่งเมื่อคิดสมมูลทางความร้อนที่ผนังท่อภายนอกเพื่อทำการหาค่าของ Tw,o จะได้ดังนี้

$$\left(\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) (T_{w,o} - T_{sat}) = \frac{1}{r_2 \alpha_{nb}} (T_f - T_{w,o}) \quad (18)$$

เมื่อทำการแทนค่าจากสมการที่ (16) และ (17) ลงในสมการที่ (18)

และทำการจัดรูปจะได้

$$\Delta T^{3.0303} + \frac{1}{r_2 C_s C_1} \Delta T - \frac{1}{r_2 C_s C_1} (T_f - T_{sat}) = 0 \quad (19)$$

และ

$$\Delta T^{3.42457} + \frac{1}{r_2 C_r C_1} \Delta T - \frac{1}{r_2 C_r C_1} (T_f - T_{sat}) = 0 \quad (20)$$

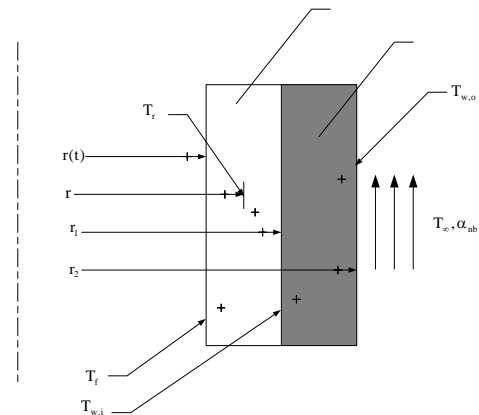
สำหรับท่อผิวเรียบและท่อผิวขรุขระตามลำดับ โดยที่

$$C_1 = \left(\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (21)$$

โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่า $\varepsilon = 0.5$, $\eta = 10 \mu\text{m}$ และ $\delta = 100 \mu\text{m}$ ในการคำนวณทางทฤษฎี [4]

2.4 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของน้ำแข็งกับเวลาสำหรับการผลิตน้ำแข็งหลอด

จากรูปที่ 2 เมื่อทำสมมูลพลังงานที่ตำแหน่ง r ใดๆในชั้นของน้ำแข็ง จะได้ว่า



รูปที่ 2 ปัญหาของการแข็งตัวภายในหลอดทำน้ำแข็งหลอด

$$\frac{T_f - T_r}{\frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r}{r(t)} \right]} = \frac{T_f - T_\infty}{\left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{1}{k_2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{\alpha_{nb} r_2} \right\}} \quad (22)$$

จากสมการอนุรักษ์พลังงานที่บริเวณขอบเขตระหว่างน้ำกับน้ำแข็ง โดยที่ละทิ้งการนำความร้อนของน้ำ [5] จะได้ดังนี้

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \rho L \frac{dr(t)}{dt} \quad (23)$$

จากสมการที่ (22)

$$T_1 = T_r = T_f - \frac{(T_f - T_\infty) \times \frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r}{r(t)} \right]}{\left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{1}{k_2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{\alpha_{nb} r_2} \right\}} \quad (24)$$

แทนค่าสมการที่ (24) ลงในสมการที่ (23) แล้วทำการจัดรูปและให้ r มีค่าเท่ากับ r(t) จะได้

$$\frac{(T_\infty - T_f) dt}{\rho L} = \left\langle r(t) \left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{1}{k_2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{\alpha_{nb} r_2} \right\} \right\rangle dr(t) \quad (25)$$

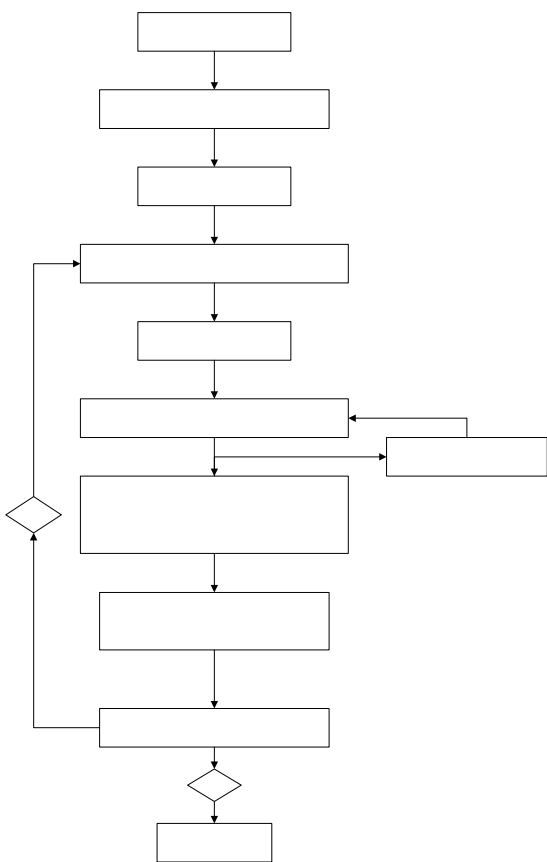
แล้วทำการอินทิเกรตสมการที่ (25) จะได้เป็น

$$\frac{(T_\infty - T_f)}{\rho L} \int_0^t dt = \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{k_1} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] dr(t) + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{k_2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) dr(t) + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{\alpha_{nb} r_2} dr(t) \quad (26)$$

ซึ่งจะมีค่าเป็น

$$\frac{(T_\infty - T_f)}{\rho L} t = \frac{1}{k_1} \left\{ \frac{[r(t)]^2}{2} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{[r(t)]^2}{4} - \frac{r_1^2}{4} \right\} + \frac{1}{2k_2} \left\{ [r(t)]^2 - r_1^2 \right\} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{\alpha_{nb} r_2} dr(t) \quad (27)$$

จากสมการที่ (27) จะเห็นว่าพจน์ทางขวามือพจน์ที่สามนั้นไม่สามารถหาค่าของอินทิกรัลได้โดยตรง เนื่องจากว่าค่าของ α_{nb} เป็นฟังก์ชันของค่า ΔT หรือ $(T_{w,o} - T_f)$ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของ $r(t)$ ดังนั้นจะสามารถหาค่าของพจน์ดังกล่าวได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการหาค่าของอินทิกรัลโดยวิธีของซิมป์สัน และค่า $r(t)$ ที่ได้ในแต่ละเวลานั้นจะแสดงถึงรัศมีของท่อทำน้ำแข็ง ณ เวลานั้นๆ ที่ได้เปลี่ยนไป ซึ่งเมื่อนำไปลบออกจากค่ารัศมีท่อเดิมจะสามารถหาค่าความหนาของน้ำแข็งออกมา



รูปที่ 3 ผังงานแบบง่าย (Simple flow chart)

และในสมการที่ (19) และ (20) นั้นเป็นสมการโพลิโนเมียลซึ่งจะใช้วิธีเชิงตัวเลขในการแก้สมการโดยได้เลือกวิธี นิวตัน-ราฟสันเพื่อช่วยในการแก้ปัญหา ซึ่งวิธีการคำนวณทั้งหมดจะแสดงไว้ในรูปที่ 3

2.5 การหาค่าอัตราการผลิตของน้ำแข็งหลอด

จะสามารถหาค่าอัตราการผลิตได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$V(t) = \pi \{ r_1^2 - [r(t)]^2 \} \quad (28)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = -2\pi r(t) \frac{dr(t)}{dt} \quad (29)$$

ซึ่งในการหาค่าอนุพันธ์ในสมการที่ (29) นี้จะมีการใช้วิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยหาค่าของผลลัพธ์นี้ด้วยเช่นกัน โดยที่ l คือค่าความยาวของท่อทำน้ำแข็งซึ่งเท่ากับ 3 เมตร

3. การเก็บข้อมูลภาคสนาม

ในการเก็บข้อมูลภาคสนามจากโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอดนี้จะทำการวัดค่าของเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อทำน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆ ในรอบการผลิตซึ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อทำน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ 35 มิลลิเมตร ซึ่งแต่ละรอบการผลิตจะมีเวลาประมาณ 28 นาทีในแต่ละรอบ โดยใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดดังรูปที่ 4 และได้ผลการเก็บข้อมูลเมื่อแปลงเป็นค่าความหนาของน้ำแข็งที่เวลาต่างๆ โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 5 นาที



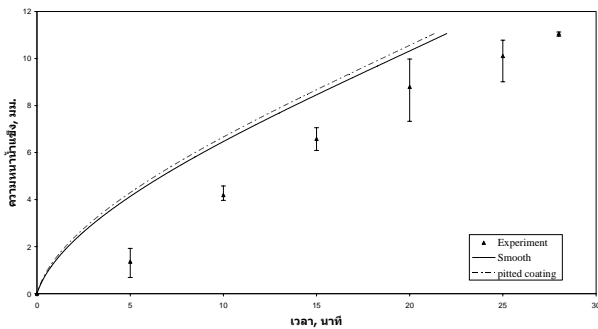
รูปที่ 4 อุปกรณ์เครื่องมือวัด

โดยที่กระบวนการผลิตนี้มีความดันที่ชุดเครื่องทำน้ำแข็ง(ชุดคอยล์เย็น) เท่ากับประมาณ 320 kPa โดยมีค่าอุณหภูมิมีอิมตัวของแอมโมเนียที่ -7.5°C

4. การวิเคราะห์ผล

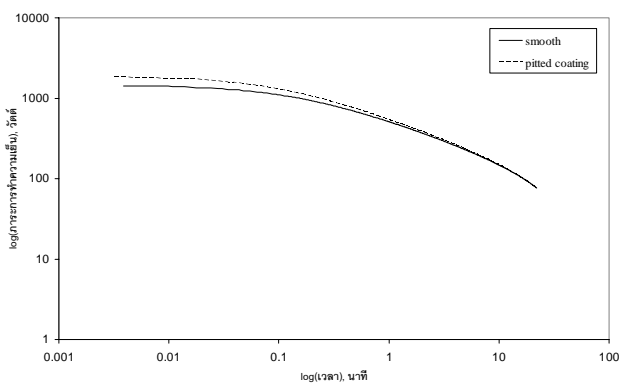
ผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนาม การคำนวณทางทฤษฎีสำหรับท่อผิวเรียบจะนำมาใช้เปรียบเทียบกันเพื่อดูความสอดคล้องของข้อมูล สำหรับการคำนวณสำหรับท่อผิวขรุขระนั้นจะใช้เปรียบเทียบเพื่อดูผลกระทบที่มีต่ออัตราการผลิตน้ำแข็งในทางทฤษฎี ซึ่งผลจากการวิเคราะห์มีดังนี้

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าค่าความหนาของน้ำแข็งที่ได้จากการผลิตบนท่อผิวเรียบทั้งจากข้อมูลภาคสนามและการคำนวณนั้นมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน โดยที่ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าทางทฤษฎีและค่าที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าประมาณ 200 เปอร์เซ็นต์ในช่วงแรกของการแข็งตัว และค่าความผิดพลาดจะลดลงอยู่ที่ประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที ดังนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณนี้จะสามารถทำนายการเกิดน้ำแข็ง ณ ช่วงเวลาต่างๆ ได้ดีในระดับหนึ่ง เมื่อเป็นเช่นนี้จึงสามารถที่จะนำผลจากการคำนวณทางทฤษฎีมาทอผิวเรียบไปเปรียบกับผลจากการใช้ท่อในชนิดอื่นๆ ซึ่งจากรูปที่ 5 นี้จะเห็นว่าค่าความหนาที่ได้ทอผิวขรุขระนั้นที่เวลาเดียวกันจะมีค่าสูงกว่าทอผิวเรียบโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์



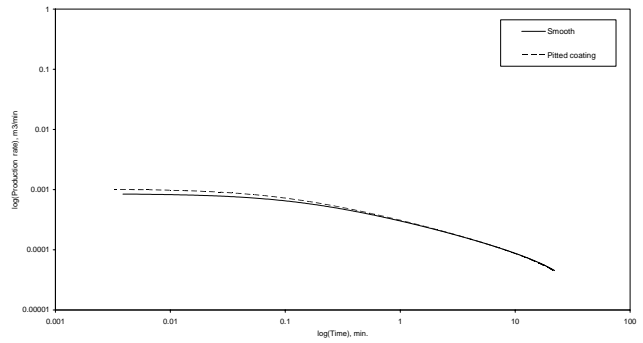
รูปที่ 5 ความหนาของน้ำแข็งเทียบกับเวลาในการผลิตในกรณีต่างๆ

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าค่าของภาวะความเย็นที่ได้จากท่อที่มีผิวขรุขระจะมีค่ามากกว่าภาวะความเย็นที่ได้จากท่อผิวเรียบโดยเฉพาะในช่วงเริ่มการผลิตจะมีค่าสูงกว่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์แต่ในช่วงท้ายๆ ของการผลิตจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยประมาณ 1.4 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6 ภาวะความเย็นเทียบกับเวลาในการผลิตในกรณีต่างๆ

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นอัตราการผลิตน้ำแข็งที่เป็นฟังก์ชันของเวลา เมื่อเปรียบเทียบกรณีท่อเป็นท่อผิวขรุขระกับท่อเรียบ ลักษณะของกราฟมีความคล้ายคลึงกับกราฟของค่าภาวะความเย็นที่กล่าวมาข้างต้นโดยโดยค่าอัตราการผลิตจากท่อที่มีผิวขรุขระจะสูงกว่าอยู่เล็กน้อยโดยเฉลี่ยตลอดการผลิตประมาณ 4.3 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 7 อัตราการผลิตเทียบกับเวลาในการผลิตในกรณีต่างๆ

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานศึกษาวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาภาวะความเย็นและอัตราการผลิตของท่อทำน้ำแข็งที่เป็นท่อเรียบกับท่อผิวขรุขระ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงอัตราการผลิตน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นในระบบทำความเย็นจะส่งผลให้การใช้พลังงานของระบบทำความเย็นเพิ่มขึ้นเช่นกัน หากแต่ถ้าว่าผลผลิตที่ได้ก็เพิ่มมากขึ้น ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตคือการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้และภาวะความเย็นของกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด ซึ่งจะสามารถคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดต่อไป

ตัวย่อและสัญลักษณ์

a_L = ค่าการแพร่กระจายความร้อนของของเหลว, (m²/s)

C_{pL} = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของเหลว, (J/kg-K)

d = Bubble departure, (m)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, (m/s²)

Ja = Jakob number

k = ค่าสภาพการนำความร้อน, (W/m-K)

k_1 = ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็ง, (W/m-K)

k_2 = ค่าสภาพนำความร้อนของท่อ, (W/m-K)

N_{cf} = Constant heat flux number

L = ค่าความร้อนแฝง, (J/kg)

q = ฟลักซ์ความร้อน, (W/m²)

$r(t)$ = รัศมีของรูกลวงของน้ำแข็งที่เวลาใด ๆ, (m)

r_0 = รัศมีของรูกลวงของน้ำแข็ง, (m)

r_1 = รัศมีภายในของท่อ, (m)

r_2 = รัศมีภายนอกของท่อ, (m)

R = ค่าการต้านทานความร้อนรวม, (K-m/W)

Re = Reynolds number

t = เวลา, (s)

T = อุณหภูมิ, (K)

T_f = อุณหภูมิของรอยต่อระหว่างของเหลวและของแข็ง, (K)

$V(t)$ = ปริมาตรของน้ำแข็งที่เวลาต่าง ๆ, (m³)

Δh_v = ค่าความร้อนแฝงจำเพาะของการระเหยของแอมโมเนีย, (J/kg)

ΔT = Wall superheat, (K)

- α_{nb} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแอมโมเนียขณะมีการเดือด, (W/m^2-K)
- β = Contact angle (35°)
- δ = ความหนาของชั้นผิวขรุขระ,(m)
- ϵ = ค่าความขรุขระ
- η = ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนผิวขรุขระ,(m)
- λ = Geometric scale factor
- μ_L = ค่าความหนืดพลศาสตร์ของเหลว,($N-s/m^2$)
- μ_v = ค่าความหนืดพลศาสตร์ของไอ,($N-s/m^2$)
- ρ = ความหนาแน่นของน้ำแข็ง,(kg/m^3)
- σ = แรงตึงผิว,(N/m)

ตัวห้อยสัญลักษณ์

- f = รอยต่อระหว่างของเหลวและของแข็ง
- i = ด้านใน
- l = ของเหลว
- m = ชั้นผิวขรุขระ
- o = ด้านนอก
- p = อนุภาคของโลหะ
- r = รัศมีที่ตำแหน่งใดๆของท่อ
- sat = จุดเดือดหรือจุดอิ่มตัวของสาร
- v = ไอ
- w = ผนึ่งท่อ
- ∞ = สารทำความเย็น

เอกสารอ้างอิง

1. Stephan, K., and Abdelsalam, M. "Heat-transfer correlations for natural convection boiling," International Journal of Heat&Mass Transfer., Vol. 23, pp. 73-87, 1980.
2. Nishikawa, K., and T. Ito, "Augmentation of nucleate boiling heat transfer by prepared surfaces," in T. Mizushima and W. J. Yang, Heat transfer in energy problem., pp. 111-18, 1982.
3. Rudemiller, G. R., and Linsay, J. D., "An investigation of boiling heat transfer in fibrous media," Heat Transfer 1990. Proceedings of the Ninth International Heat Transfer Conference., Vol. 5, pp. 159-164, 1990.
4. Shou-Shing, H., and Chun-Jen, W. "Nucleate pool boiling from coated surfaced in saturated R-134a and R-407c," International Journal of Heat&Mass Transfer., Vol. 40, pp. 519-532, 1997.
5. Carslow, and Jaeger. Conduction of heat in solids., 2nded., Oxford University Press, pp. 295-296, 1959.