

การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการแข็งตัวของน้ำแข็งหลอด

ณัฐคนย์ พรรณเจริญวงศ์^{1*} นัทรชัย เบญจปิยะพร¹ รพีพัฒน์ ลาดศรีท่า² และ สุกัญญา ทองโยธี²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่ทำการทดลองได้แก่ อุณหภูมิน้ำป้อน อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศรอบนอก อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็ง และอุณหภูมิเฉลี่ยผิวฟรีซซึ่งเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี จากการศึกษพบว่าค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา โดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้าย ๆ ของการผลิต แต่ค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะมีค่าที่ไม่เท่ากัน ซึ่ง อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศรอบนอก อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็ง และอุณหภูมิเฉลี่ยผิวฟรีซซึ่ง จะส่งผลกระทบต่อค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดน้อย แต่อุณหภูมิน้ำป้อนจะมีผลต่อค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดมาก โดยอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิน้ำป้อนต่อความหนา น้ำแข็งได้ 0.41 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร อุณหภูมิเฉลี่ยผิวฟรีซซึ่งต่อความหนา น้ำแข็งได้ 0.2 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็งต่อความหนา น้ำแข็งได้ 0.16 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตรและ อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศรอบนอกต่อความหนา น้ำแข็งได้ 0.15 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ น้ำป้อนจะส่งผลต่อค่าความหนา น้ำแข็งหลอดและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลทางทฤษฎี โดยมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 8 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : น้ำแข็งหลอด, การเปลี่ยนสถานะ, การแข็งตัว

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: nattadon.pa@gmail.com รับเมื่อ 1 เมษายน 2556 ตอบรับเมื่อ 26 มิถุนายน 2556

The Study of Parameters Effect of Solidification Tubular Ice

Nattadon Phannuchareonwong^{1*}, Chatchai Benchapiyaporn¹, Rapheephath Ladsritha²
and Sukanya Thongyotee²

Abstract

This study was aimed to investigate experimental study of the parameters affecting the amount of tube ice compared with theoretical result. Significant studied parameters were inlet water temperature, average ambient air temperature, average ambient refrigerative machinery room temperature and average temperature of surface freezing. The result showed thickness tendency was increasingly according to time. At the beginning of the process thickness increased quite fast and decelerated at the end of the production process, however thickness value acquired from parameters were not identical as average ambient air temperature, average ambient refrigerative machinery room temperature and average temperature of surface freezing slightly affected thickness comparing to the results of the study shown by the ratios between parameter. Inlet water temperature affected to thickness of tube ice as the ratio of inlet water temperature to thickness was 0.41 degrees celsius per milimeter. The ratio of average temperature of surface freezing to thickness was 0.2 degrees celsius per milimeter. The ratio of average ambient refrigerative machinery room temperature to thickness was 0.16 degrees celsius per milimeter, and the ratio of average ambient air temperature to thickness was 0.15 degrees celsius per milimeter. Thus, inlet water temperature affected to thickness of tube ice according to theoretically results with 8 percent error value between ice thickness and production time.

Keywords : Tubular Ice, Phase Change, Solidification

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University.

² Department of Agricultural Machinery Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khonkaen Campus.

* Corresponding author, E-mail: nattadon.pa@gmail.com Received 1 April 2013, Accepted 26 June 2013

1. บทนำ

น้ำแข็งหลอดเป็นสินค้าบริโภคที่สำคัญชนิดหนึ่ง เนื่องจากประเทศไทยมีสภาพอากาศร้อนเกือบทั้งปี ทำให้ในแต่ละวันมีปริมาณความต้องการน้ำแข็งหลอดจำนวนมาก และมีโรงงานผลิตกระจายอยู่ทั่วประเทศ แต่เนื่องจากการผลิตน้ำแข็งหลอดจะต้องผลิตให้ได้ตามขนาดที่ต้องการในรอบการผลิตหนึ่งๆ ซึ่งหากมีปัญหาจะทำให้ต้องทิ้งน้ำแข็งหลอดในรอบการผลิตนั้นๆ ทั้งหมด ทำให้สิ้นเปลืองค่าน้ำ ค่าไฟฟ้า

ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวและหลอมเหลวของสสารส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ (phase) หรือการเคลื่อนที่ของขอบเขต (moving boundary) ที่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิและการไหลของของไหลระหว่างการแข็งตัวและการละลาย เมื่อเกิดการก่อตัวจากการแข็งตัว (Freezing) ของของเหลว ตรงบริเวณรอยต่อของเฟสของแข็งและของเหลวที่มีความแตกต่างของคุณสมบัติทางกายภาพเกิดการเคลื่อนที่ออกจากกัน [1] ซึ่งการแก้ปัญหาข้างต้นมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากการเคลื่อนที่แยกออกจากกันนั้นมีการรับและคายความร้อนแฝง เป็นเหตุให้ไม่สามารถทราบถึงตำแหน่งตรงบริเวณรอยต่อทั้ง 2 เฟสก่อนที่จะมีการเคลื่อนที่ในสารบริสุทธิ์ การแข็งตัวของสารบริสุทธิ์จะมีลักษณะเช่นเดียวกับน้ำบริสุทธิ์นั่นคือการแข็งตัวจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่ไม่ต่อเนื่อง เฟสของแข็งและของเหลวจะถูกแยกออกจากกันโดยมีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วที่บริเวณรอยต่อ [2-3]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการแข็งตัวของสารบริสุทธิ์โดยใช้วิธีแบบกริดคงตัว (fixed grid) มีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) [4] และเมื่อเปลี่ยนเป็นสารละลายโดยใช้วิธีแบบกริดคงตัว ก็มี

ค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงเช่นกัน [5] โลหะ และการแข็งตัวของน้ำแข็ง ซึ่งการแข็งตัวของน้ำแข็งจะมุ่งเน้นไปที่การทำนายพฤติกรรมของการแข็งตัวของน้ำแข็ง (น้ำแข็งหลอด+น้ำแข็งซอง) และศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการแข็งตัวของน้ำแข็ง เช่น อุณหภูมิอมัต์ของสารทำความเย็นโดยใช้วิธีแบบกริดคงตัว เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิเวลาในการแข็งตัวก็เปลี่ยนไป [6] ขนาดและลักษณะของท่อทำน้ำแข็ง เมื่อเปลี่ยนขนาดของท่อ ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อมาก ก็จะใช้เวลานาน [7] การติดครีbsd้านนอกท่อทำน้ำแข็ง จะไปเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสการถ่ายเทความร้อนจะทำให้ผลิตน้ำแข็งหลอดได้เร็วขึ้น [8] เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อการแข็งตัวของน้ำแข็ง แต่เนื่องด้วยความซับซ้อนของปัญหาการแข็งตัวที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของขอบเขตที่เกิดขึ้นนั้น วิธีการแก้ปัญหาแบบกริดคงตัว ถือเป็นวิธีที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถใช้ได้กับปัญหาที่มีมากกว่าหนึ่งมิติ และมีความแม่นยำสูง จึงเป็นที่นิยมในปัจจุบัน [9]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่ชุดผลิตน้ำแข็งหลอดเพื่อศึกษารามิเตอร์ที่มีผลต่อการแข็งตัวของน้ำแข็งหลอด เพื่อนำไปสู่การออกแบบที่เหมาะสมต่อการใช้งานด้านความเย็นเป็นหลัก โดยอาศัยการทดลองหาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อปริมาณการผลิตน้ำแข็งหลอด คือ ปริมาณน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้ อุณหภูมิบรรยากาศรอบนอก อุณหภูมิบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็ง ความชื้นสัมพัทธ์รอบนอก ความชื้นสัมพัทธ์ห้องเครื่องผลิตน้ำแข็ง อุณหภูมิ น้ำป้อน อัตราการไหลน้ำป้อน ขนาดความหนาของน้ำแข็ง ความดันด้านดูด ความดันด้านอัด สารทำความเย็น เป็นต้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ออกแบบขึ้น และแบบจำลองที่ถูกต้องแม่นยำเพื่อที่จะได้ใช้ประโยชน์ต่อไป

2. การหาค่าอัตราความร้อนที่ผ่านท่อน้ำแข็งและอุณหภูมิที่ผิวของท่อน้ำแข็ง ณ ระดับ ความหนาของชั้นน้ำแข็ง และเวลาต่างๆกัน

2.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะเดือดบนพื้นผิวเรียบ

งานวิจัยนี้ใช้สารทำความเย็นคือ แอมโมเนีย Stephan and Abdelsalam (1980) ได้พัฒนาสมการความสัมพันธ์ของการเดือดในช่วงการเกิดฟองขึ้นสำหรับของไหลหลายๆชนิด ซึ่งความสัมพันธ์นี้มาจากคุณสมบัติทางกายภาพของของไหล

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

กำหนดให้

ρ_V คือ ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

ρ_L คือ ความหนาแน่นของของเหลว

k_L คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของของเหลว

Δh_v คือ ค่าเอนทาลปีเชิงปริมาตร

a_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในบริเวณของเหลว

เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองที่แยกตัวออกมา d หาได้จาก

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

โดยที่ค่า

$$q = \alpha_{nb} \Delta T \quad (3)$$

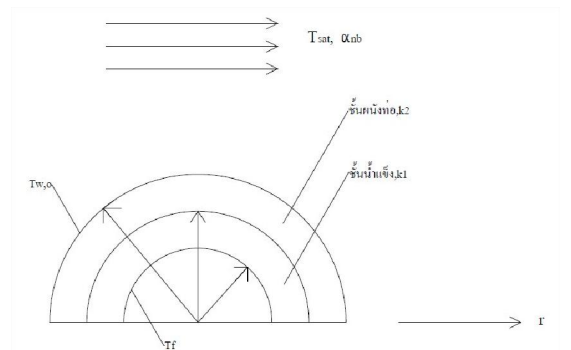
โดยที่

$$\Delta T = T_{w,o} - T_{sat} \quad (4)$$

จัดรูปสมการที่ (1) ใหม่จะได้

$$\alpha_{nb} = C \cdot \left(\frac{\Delta T}{T_{sat}} \right)^{2.0303} \quad (5)$$

2.2 การหาค่าอัตราความร้อนที่ไหลเกิดน้ำแข็งผ่านผนังท่อ สแตนเลสผู้สารทำความเย็นที่ระดับความหนาของน้ำแข็งต่างๆ



รูปที่ 1 แสดงการจำลองรูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 1 กำหนดให้

k_1 และ k_2 คือ ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็งและท่อตามลำดับ

r_0 , r_1 และ r_2 คือ รัศมีของรูกลวงของน้ำแข็ง, รัศมีภายในและนอกของท่อ ตามลำดับ

T_f คือ อุณหภูมิบนผิวของน้ำแข็งซึ่งเท่ากับ 0 องศาเซลเซียส

$T_{w,i}$ คือ อุณหภูมิบนผิวของท่อด้านใน

$T_{w,o}$ คือ อุณหภูมิบนผิวของท่อด้านนอก

T_{sat} คือ จุดเดือดของสารทำความเย็น

α_{nb} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดของสารทำความเย็น

จากการจำลองรูปแบบจะทำให้สามารถคำนวณหาค่าอัตราถ่ายเทความร้อนได้รวดเร็วและยังเป็นวิธีที่ง่าย

เนื่องจากผลของข้อมูลที่เทียบกับเวลาหายไปเนื่องจากสถานะดังกล่าวเป็นสภาวะคงที่ (Steady-state) สามารถหาค่าความต้านทานความร้อน ณ ตำแหน่งต่างๆหาได้ดังนี้

- ที่ชั้นของน้ำแข็ง (R_1) :

$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_1} \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (6)$$

- ที่ชั้นของผนังท่อ (R_2) :

$$R_2 = \frac{1}{2\pi r_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (7)$$

- ที่พื้นผิวภายนอกของท่อ (R_3) :

$$R_3 = \frac{1}{2\pi r_2 \alpha_{nb}} \quad (8)$$

ดังนั้นค่าความต้านทานความร้อนรวมของกระบวนการนี้ คือ

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{k_1} \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) + \frac{1}{k_2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right] + \frac{1}{r_2 \alpha_{nb}} \right\} \quad (9)$$

ซึ่งค่าภาระความร้อนต่อหน่วยความยาว (W/m) คือ

$$Q = \frac{T_f - T_{sat}}{R} \quad (10)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (6-8) ลงในสมการที่ (9) จะได้

$$Q = \frac{2\pi\pi(r_f - T_{sat})}{\left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) + \frac{1}{k_2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{r_2 \alpha_{nb}} \right\}} \quad (11)$$

จากสมการที่ (5) กำหนดให้

$$C_s = \frac{C}{T_{sat}^{2.0303}} \quad (12)$$

ดังนั้นค่า α_{nb} จะได้

$$\alpha_{nb} = C_s \cdot \Delta T^{2.0303} \quad (13)$$

สมการสมดุลทางความร้อนที่ผิวน้ำท่อภายนอกเพื่อหาค่า $T_{W,O}$ คือ

$$\frac{T_{W,O} - T_{sat}}{R_3} = \frac{T_f - T_{W,O}}{R_1 + R_2} \quad (14)$$

แทนค่าความต้านทานความร้อนจากสมการที่ (6), (7) และ (8) ลงในสมการแล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\left(\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) (T_{W,O} - T_{sat}) = \frac{1}{r_2 \alpha_{nb}} (T_f - T_{W,O}) \quad (15)$$

แทนสมการที่ (5) ลงในสมการ (15) จะได้

$$\left(\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) (T_{W,O} - T_{sat}) = \frac{1}{r_2 C_s (T_{W,O} - T_{sat})^{2.0303}} (T_f - T_{W,O}) \quad (16)$$

กำหนดให้

$$C_1 = \left(\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (17)$$

เราจะได้ว่า

$$C_1 (T_{W,O} - T_{sat}) = \frac{1}{r_2 C_s (T_{W,O} - T_{sat})^{2.0303}} (T_f - T_{W,O}) \quad (18)$$

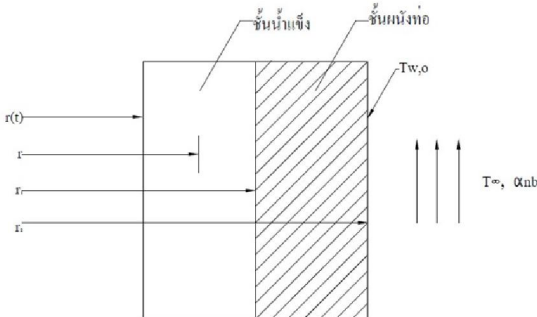
$$(T_{W,O} - T_{sat})^{3.0303} = \frac{1}{r_2 C_s C_1} [(T_f - T_{sat}) - (T_{W,O} - T_{sat})] \quad (19)$$

จากสมการที่ (4) เมื่อทำการจัดรูปของสมการจะได้ว่า

$$\Delta T^{3.0303} + \frac{1}{r_2 C_s C_1} \Delta T - \frac{1}{r_2 C_s C_1} (T_f - T_{sat}) = 0 \quad (20)$$

เนื่องจากสมการที่ (20) เป็นสมการโพลิโนเมียลซึ่งต้องการสร้างโปรแกรมขึ้นมาเพื่อช่วยให้การหาค่าของสมการซึ่งก็คือค่าของ ΔT ซึ่งจะนำไปใช้คำนวณหาค่าอัตราความร้อนและค่าอุณหภูมิที่ผิวนอกของท่อต่อไป

2.3 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของน้ำแข็งกับเวลาสำหรับการผลิตน้ำแข็งหลอด



รูปที่ 2 ปัญหาของการแข็งตัวภายในหลอดทำน้ำแข็งหลอด

จากสมการสมดุลทางความร้อนที่ตำแหน่ง r ใดๆ ในชั้นของน้ำแข็ง จะได้ว่า

$$\frac{T_f - T_r}{R_r} = \frac{T_f - T_{\infty}}{R_{1,r} + R_{2,r} + R_{3,r}} \quad (21)$$

โดย

- ที่ตำแหน่ง r ใดๆ (R_r) :

$$R_r = \frac{1}{2 \pi k_1} \ln \frac{r}{r(t)} \quad (22)$$

- ที่ชั้นของน้ำแข็ง ($R_{1,r}$) :

$$R_{1,r} = \frac{1}{2 \pi k_1} \ln \frac{r_1}{r(t)} \quad (23)$$

- ที่ชั้นของผนังท่อ ($R_{2,r}$) :

$$R_{2,r} = \frac{1}{2 \pi k_2} \ln \frac{r_2}{r(t)} \quad (24)$$

- ที่พื้นผิวภายนอกของท่อ ($R_{3,r}$) :

$$R_{3,r} = \frac{1}{2 \pi r_2 \alpha_{nb}} \quad (25)$$

แทนค่าสมการที่ (22-25) ลงในสมการที่ (21) จะได้

$$\frac{T_f - T_r}{\frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r}{r(t)} \right]} = \frac{T_f - T_{\infty}}{\left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{1}{k_2} \ln \left[\frac{r_2}{r_1} \right] + \frac{1}{\alpha_{nb} r_2} \right\}} \quad (26)$$

โดยที่ $k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \rho L \frac{dr(t)}{dt}$

เมื่อไม่คิดการนำความร้อนจะได้

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \rho L \frac{dr(t)}{dt} \quad (27)$$

$$T_1 = T_r = T_f - \frac{(T_f - T_\infty) \times \frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r}{r(t)} \right]}{\left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{1}{k_2} \ln \left[\frac{r_2}{r_1} \right] + \frac{1}{\alpha_{nb} r_2} \right\}} \quad (28)$$

แทนค่าสมการที่ (28) ลงในสมการที่ (27) จะได้

$$\rho L \frac{dr(t)}{dt} = k_1 \frac{\partial}{\partial r} \left\langle T_f - \frac{(T_f - T_\infty) \times \frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r}{r(t)} \right]}{\left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{1}{k_2} \ln \left[\frac{r_2}{r_1} \right] + \frac{1}{\alpha_{nb} r_2} \right\}} \right\rangle \quad (29)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ และให้ $r = r(t)$ จะได้

$$\frac{(T_\infty - T_f)}{\rho L} dt = \left\langle r(t) \left\{ \frac{1}{k_1} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{1}{k_2} \ln \left[\frac{r_2}{r_1} \right] + \frac{1}{\alpha_{nb} r_2} \right\} \right\rangle dr(t) \quad (30)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (30) จะได้

$$\frac{(T_\infty - T_f)}{\rho L} t \Big|_0^t = \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{k_1} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] dr(t) + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{k_2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) dr(t) + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{\alpha_{nb} r_2} dr(t) \quad (31)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาพจน์ทางขวามือของสมการที่ (31) สามารถอินทิเกรตออกได้ด้วยวิธีผลเฉลยแน่นอนตรงได้เพียงสองพจน์แรกเท่านั้น แต่พจน์ที่สามนั้นจะทำการหาค่าด้วยวิธีเชิงตัวเลข

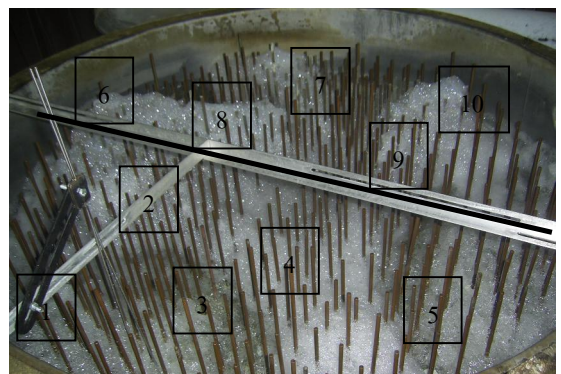
$$\begin{aligned} \frac{(T_\infty - T_f)}{\rho L} t = & \frac{1}{k_1} \left\{ \frac{[r(t)]^2}{2} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] + \frac{[r(t)]^2}{4} - \frac{r_1^2}{4} \right\} + \frac{1}{2k_2} \{ [r(t)]^2 - r_1^2 \} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \\ & + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{\alpha_{nb} r_2} dr(t) \end{aligned} \quad (32)$$

จากสมการที่ (31) จะเห็นว่าพจน์ที่สามทางขวามือนั้นไม่สามารถหาค่าของอินทิเกรตได้โดยตรง เนื่องจากว่าค่าของ α_{nb} เป็นฟังก์ชันของค่า ΔT หรือ $(T_{w,O} - T_f)$ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของ $r(t)$ ดังนั้นจะสามารถหาค่าของพจน์ดังกล่าวได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการหาค่าของอินทิเกรตโดยวิธีของซิมป์สัน และค่า $r(t)$ ที่ได้ในแต่ละเวลานั้นจะแสดงถึงรัศมีของท่อทำน้ำแข็ง ณ เวลานั้นๆ ที่ได้เปลี่ยนไป เมื่อนำไปลบออกจากค่ารัศมีท่อเดิมจะสามารถได้ค่าความหนาจริงของน้ำแข็ง

3. การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

3.1 ติดตั้งเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า เครื่องมือวัดอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ เครื่องมือวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล เครื่องมือวัดอุณหภูมิน้ำป้อน

3.2 เลือกหลอดทำน้ำแข็งที่จะทำการวัดจำนวน 10 หลอด โดยที่แต่ละหลอดจะตั้งอยู่ในตำแหน่งต่างๆของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เลือกหลอดทำน้ำแข็ง

3.3 เริ่มทำการวัดเก็บข้อมูลเมื่อมีการปล่อยน้ำเข้าสู่ท่อทำน้ำแข็งเป็นค่าแรก และอ่านค่าความดันขาเข้าและออกที่เครื่องอัดไอเพื่อใช้ในการหาค่าอุณหภูมิอิ่มตัวของแอมโมเนีย R-717 ในการผลิตนั้นๆ

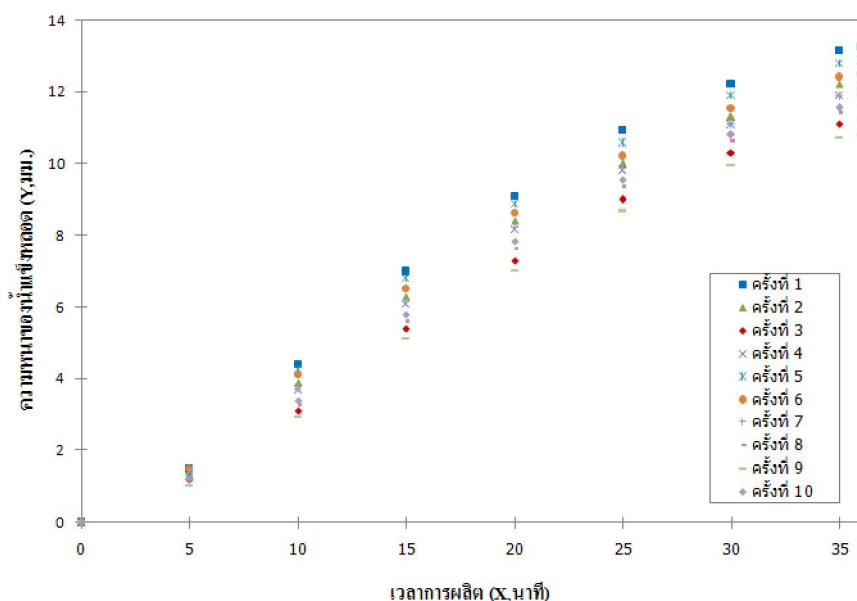
3.4 จากนั้นเริ่มทำการเก็บวัดค่าความหนาของน้ำแข็งทุก ๆ หลอด ดังรูปที่ 3 โดยเริ่มเก็บข้อมูลในนาที่ที่ 5 จนถึงนาที่ที่ 35 โดยเก็บข้อมูลห่างกันทุกๆ 5 นาที โดยค่าสุดท้ายในนาที่ที่ 36 จะเป็นการวัดค่าของน้ำแข็งที่ออกจากเครื่องมาแล้ว ถือเป็นข้อมูล 1 ชุด วัดค่าอุณหภูมิต่างๆ และวัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด

4. ผลการศึกษา

4.1 การหาความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆ

4.1.1 การหาความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆ ในการตรวจวัดจริง

จากการเก็บข้อมูลการตรวจวัดจริงแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากโรงงาน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำแข็งหลอด กับเวลาในการผลิต

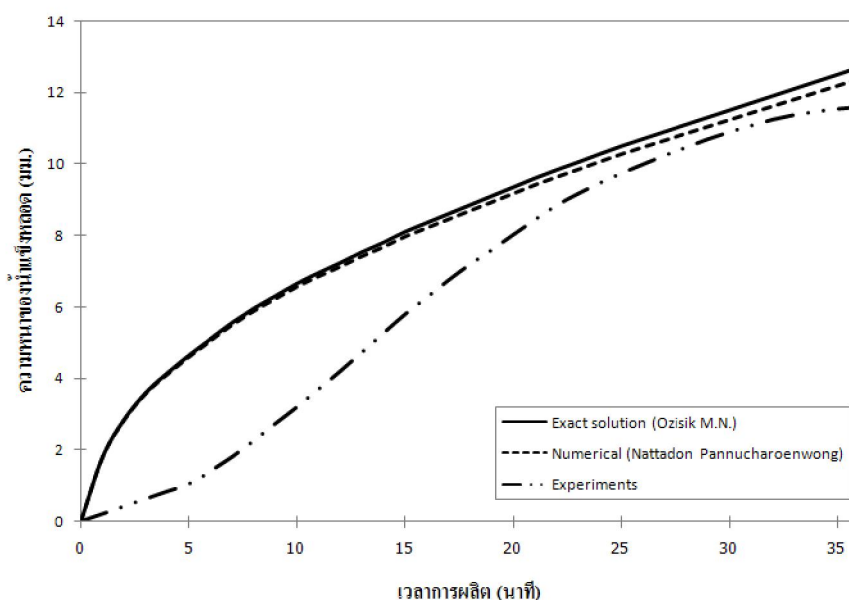
จากรูปที่ 3 เป็นเพราะอุณหภูมิน้ำป้อนต่างกันทำให้มีผลกับความหนาของน้ำแข็ง และจะเห็นว่าค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลา โดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะ

ช้าลงในช่วงท้ายๆของการผลิต ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อชั้นของน้ำแข็งเกิดขึ้นภายในท่อทำน้ำแข็ง ตัวของน้ำแข็งจะมีสภาพการนำความร้อนที่ต่ำเท่ากับว่าเป็นตัวฉนวนทานในการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับ

แอมโมเนียซึ่งเป็นสารทำความเย็นอยู่ภายนอกของท่อ ดังนั้นเมื่อน้ำแข็งมีความหนาขึ้นเรื่อยๆ ก็จะยิ่งถ่ายเทความร้อนได้ยากขึ้น อัตราความร้อนที่ไหลผ่านระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เป็นผลให้ในช่วงท้ายๆ รอบการผลิตน้ำแข็งจะช้าลงนั่นเอง จะหมายถึงว่าภาระของเครื่องทำความเย็นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วยเช่นกัน

4.1.2 การหาความหนาของน้ำแข็งเมื่อเวลาต่างๆ จากการคำนวณทางทฤษฎี

จากสมการความสัมพัทธ์ของการถ่ายเทความร้อนขณะที่มีการเดือดบนพื้นผิวเรียบของ Stephan และ Abdelsalam (1980) ดังสมการที่ (1) และ (2) จะได้ผลแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เปรียบเทียบความหนาของน้ำแข็งเทียบกับเวลาในการผลิตจากทางทฤษฎีและข้อมูลจริง

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาของน้ำแข็งที่เวลาต่างๆซึ่งในทางทฤษฎีแล้วค่าความหนาจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปโดยที่ค่าความหนาจะแปรผันตรงกับรากที่สองของเวลา จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความหนาที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข [7] จะมีค่าต่ำกว่าค่าความหนาที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำเล็กน้อย โดยที่จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตั้งแต่เวลาตั้งต้นจนถึง

เวลาสิ้นสุดอยู่ที่ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความหนาที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำตรงเปรียบเทียบกับการเก็บข้อมูลจริง จะเห็นได้ว่าค่าความหนาที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำจะมีความสอดคล้องกันกับการเก็บข้อมูลจริง ซึ่งค่าที่ได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าความผิดพลาดระหว่างค่าความหนาที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำและการเก็บข้อมูลจริง จะมีค่าประมาณ

52 เปอร์เซ็นต์, 43 เปอร์เซ็นต์ และ 8 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงกระบวนการผลิตเวลา 0-10 นาที, 11-20 นาที และ 21-36 นาที ตามลำดับ ค่าที่ได้แตกต่างกันนั้นเนื่องจากการกำหนดค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแอมโมเนียให้มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากการทำงานจริงของระบบการทำน้ำแข็งนั้นระบบจะไม่ได้คงที่เช่นเดียวกับสมมติฐานที่ตั้งขึ้น อีกทั้งการใช้ค่าความดันในฝั่งดูดเข้าเครื่องอัดไอในการประมาณค่าคุณสมบัติของแอมโมเนียในถังทำน้ำแข็ง ซึ่งเมื่อพิจารณาในช่วงเริ่มของการผลิตนั้นค่าเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำไม่ได้เป็นไปดังค่าเริ่มต้นที่นำมาใช้ในทางทฤษฎีทำให้มีความผิดพลาดสูงในช่วงแรกของการผลิต (รูปที่ 5) แต่เนื่องจากผลที่ได้ยังมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันดังนั้นจะสามารถนำผลที่ได้จากการ

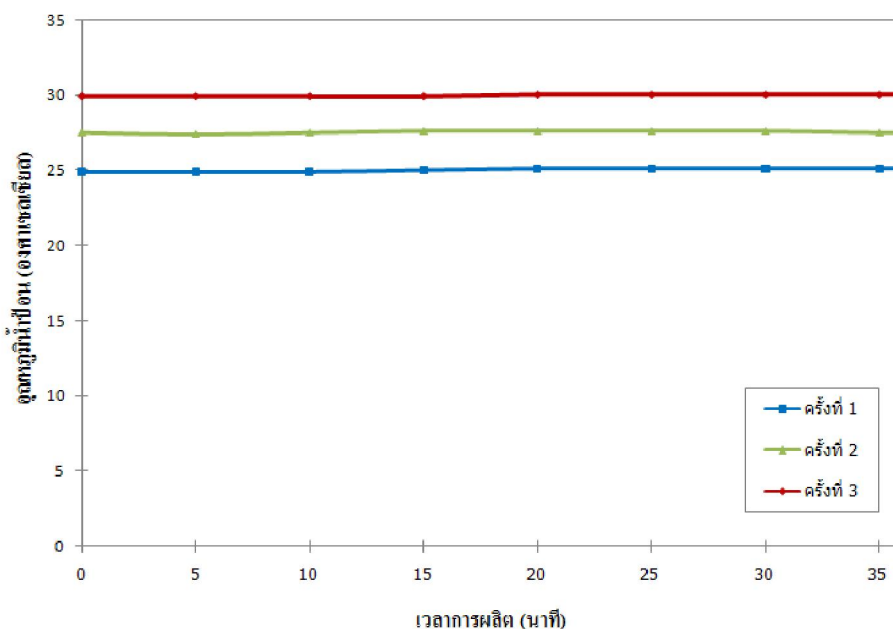
ตรวจวัดข้อมูลจริงไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำได้

4.1.3 การหาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความหนาของน้ำแข็งตลอด ณ เวลาต่างๆ

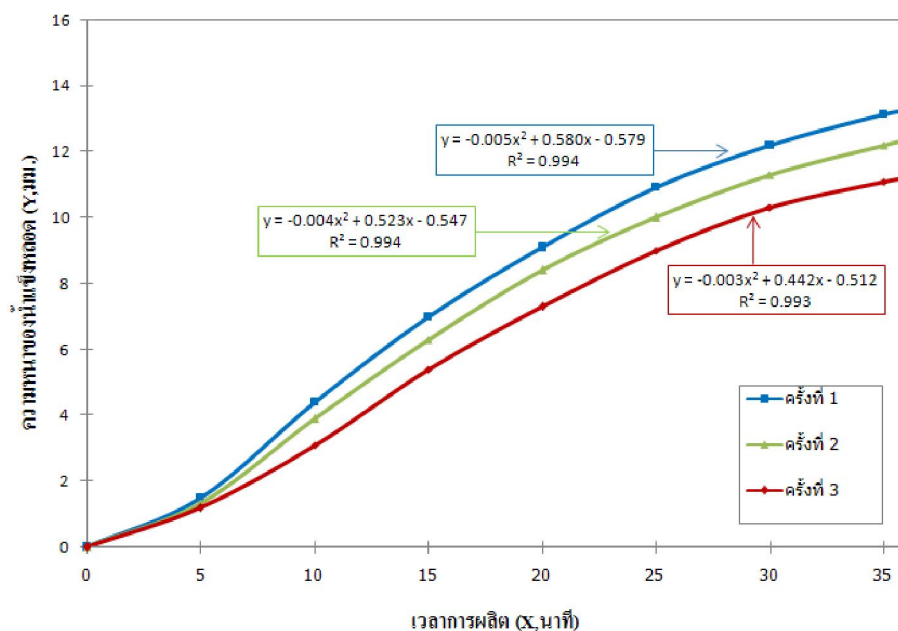
4.1.3.1 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ และศึกษา คือ

- ความหนาของน้ำแข็งตลอด
- อุณหภูมิน้ำป้อน
- อุณหภูมิบรรยากาศรอบนอก
- อุณหภูมิบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็งตลอด
- อุณหภูมิผิวฟรีซชิ่ง

จากการเก็บข้อมูลการตรวจวัดจริงแสดงได้ดังรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 14 จะเป็นการหาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความหนาของน้ำแข็งตลอด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการผลิตกับอุณหภูมิน้ำป้อน



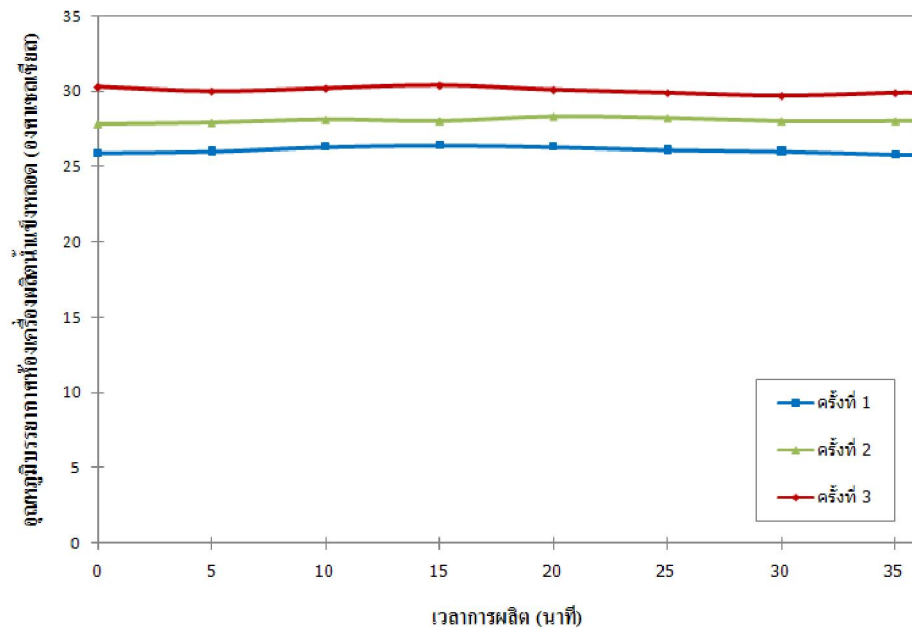
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการผลิตกับความหนาของน้ำแข็งหลอดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำป้อน

จากรูปที่ 6 และรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ น้ำป้อนมีแนวโน้มค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดไปในทิศทางเดียวกันคือ จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา โดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้าย ๆ ของการผลิต

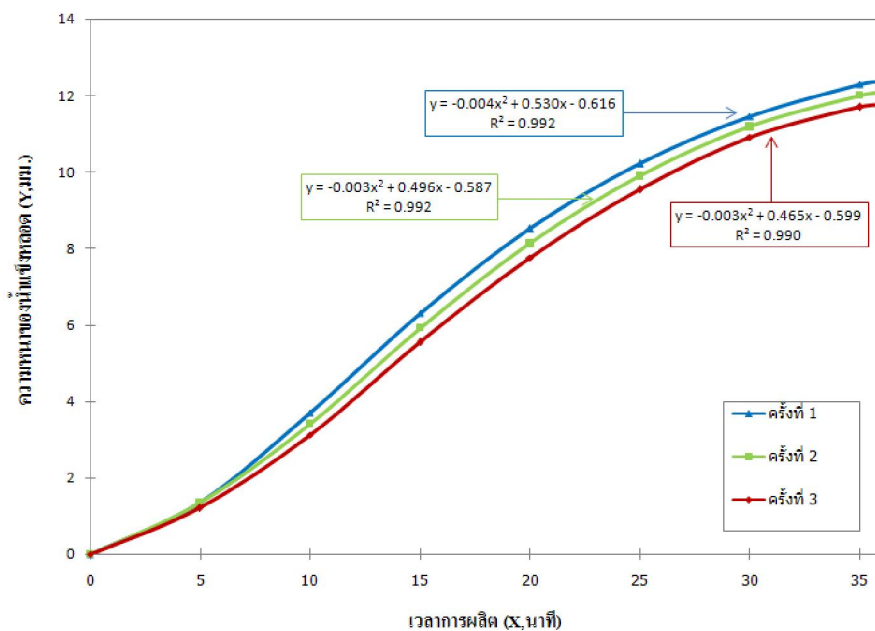
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบอุณหภูมิ น้ำป้อนกับความหนา น้ำแข็งหลอด

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาของน้ำแข็งหลอด(mm)
25	13.25
27.5	12.33
30	11.20

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ น้ำป้อนจะมีผลต่อค่าความหนา น้ำแข็งหลอด โดยที่อัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิ น้ำป้อนต่อความหนา น้ำแข็งจะได้ 0.41 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร ทั้งนี้ในการปฏิบัติจริงไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิ น้ำป้อนได้ ค่าที่ใช้จึงเป็นค่าเฉลี่ยจากการเก็บข้อมูลจริง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการผลิตกับอุณหภูมิบรรยากาศรอบนอก



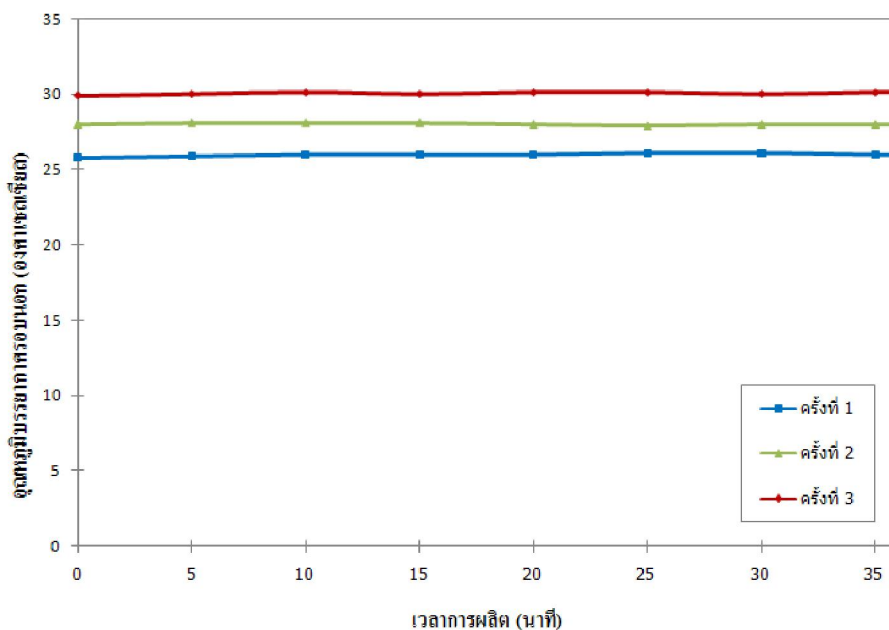
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผลิตกับความหนาของน้ำแข็งหลอดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิบรรยากาศรอบนอก

จากรูปที่ 8 และรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิบรรยากาศรอบนอกจะมีแนวโน้มค่าความหนาของน้ำแข็งลดลงไปในทิศทางเดียวกันคือ จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา โดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้าย ๆ ของการผลิต

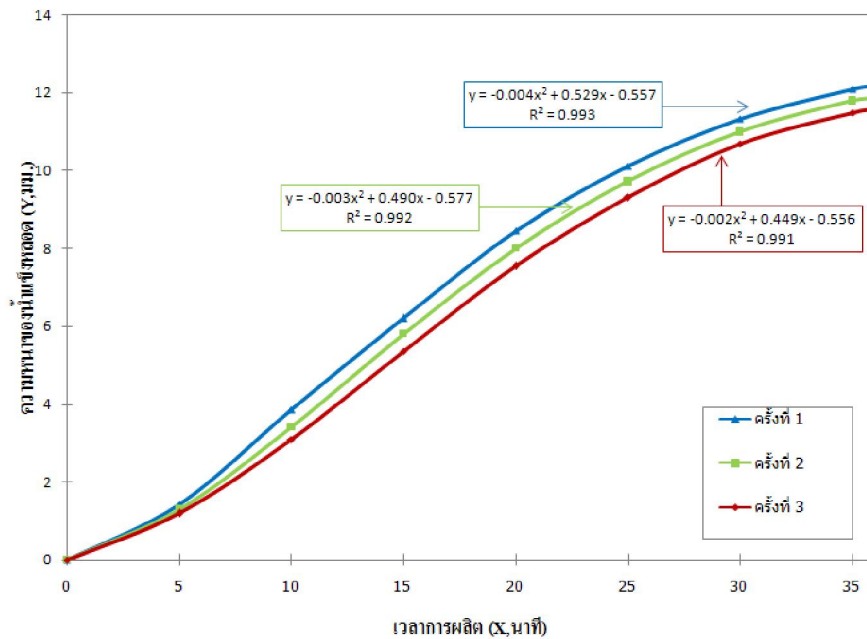
จากตารางที่ 2 จะแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิบรรยากาศรอบนอกจะมีผลต่อค่าความหนาของน้ำแข็งลดลง โดยอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิบรรยากาศรอบนอกต่อความหนาของน้ำแข็งจะได้ 0.15 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบอุณหภูมิบรรยากาศรอบนอกกับความหนาของน้ำแข็ง

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาของน้ำแข็ง (mm)
26	12.40
28	12.10
30	11.79



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการผลิตกับอุณหภูมิบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็ง



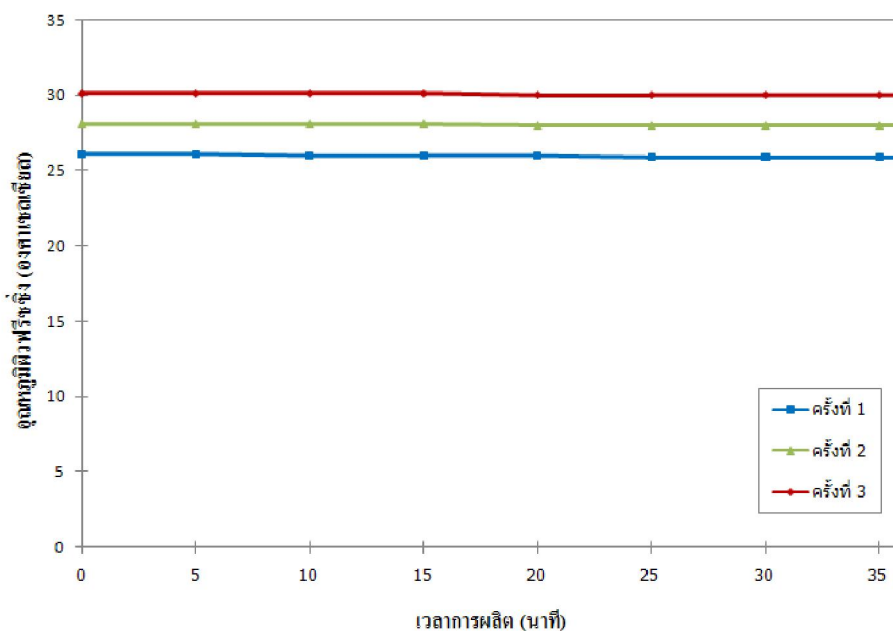
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการผลิตกับความหนาของน้ำแข็งหลอดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิบรรยากาศที่ห้องเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอด

จากรูปที่ 10 และรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอด มีแนวโน้มค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดไปในทิศทางเดียวกันคือ จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา โดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้าย ๆ ของการผลิต เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะจากสถานะของเหลวไปเป็นของแข็งของน้ำแข็งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

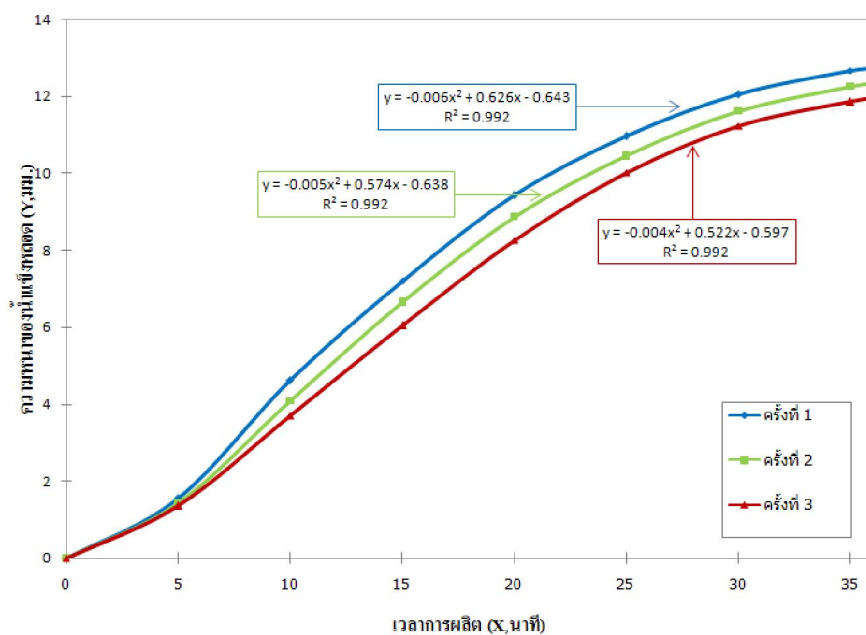
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอุณหภูมิบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดกับความหนาของน้ำแข็งหลอด

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาของน้ำแข็งหลอด(mm)
26	12.18
28	11.85
30	11.56

จากตารางที่ 3 จะแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดจะมีผลต่อค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด โดยที่อัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดต่อความหนาของน้ำแข็งจะได้ 0.16 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการผลิตกับความหนาน้ำแข็งหลอดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยผิวฟริชชีง



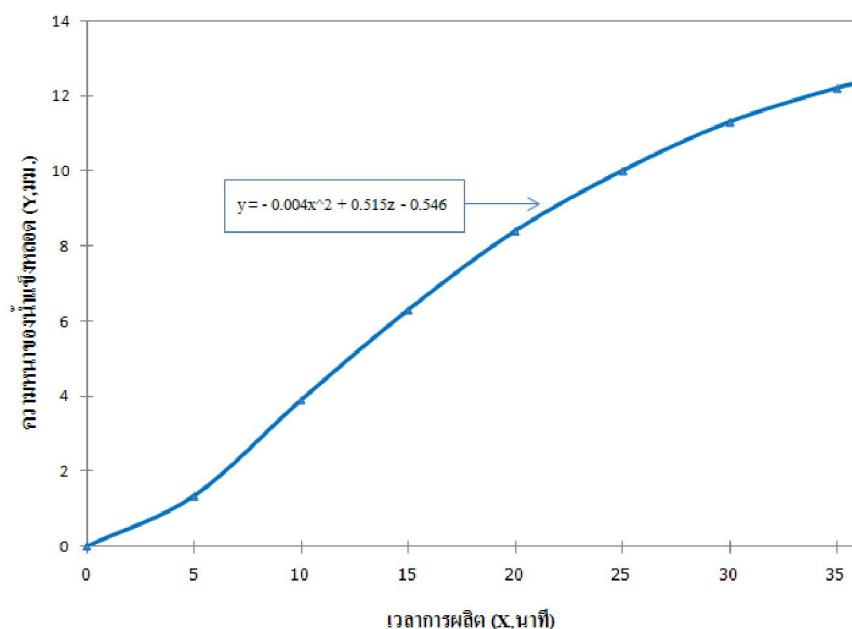
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการผลิตกับความหนาน้ำแข็งหลอดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยผิวฟริชชีง

จากรูปที่ 12 และรูปที่ 13 เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยผิวฟริชซึ่ง พบว่ามีแนวโน้มค่าความหนาของน้ำแข็งลดลงไปในทิศทางเดียวกันคือ จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลา โดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้ายๆ ของการผลิต

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบอุณหภูมิผิวฟริชซึ่งกับความหนาแน่นน้ำแข็งหลุด

อุณหภูมิ (° C)	ความหนาของน้ำแข็งหลุด(mm)
26	12.74
28	12.34
30	11.95

จากตารางที่ 4 จะแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยผิวฟริชซึ่งจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นน้ำแข็งหลุด โดยอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิผิวฟริชซึ่งต่อความหนาแน่นน้ำแข็งจะได้ 0.2 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการผลิตกับความหนาของน้ำแข็งหลุดเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ต่างๆ

จากรูปที่ 14 ใช้การปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม (Polynomial Curve Fitting) เพราะความสัมพันธ์ของการแข็งตัวของน้ำแข็งหลุดเป็นรากที่สองกับเวลาการผลิต

และจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศรอบนอกและอุณหภูมิน้ำป้อนมีค่าคงที่ จะมีแนวโน้มค่าความหนาของน้ำแข็งหลุดไปในทิศทางเดียวกันคือ เพิ่มขึ้น

เรื่อยๆ ตามเวลา โดยที่ค่าความหนาจะแปรผันตรงกับรากที่สองของเวลา โดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้ายๆ ของการผลิต ซึ่งทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อชั้นของน้ำแข็งเกิดขึ้นภายในท่อทำน้ำแข็งตัวของน้ำแข็งจะมีสภาพการนำความร้อนที่ต่ำซึ่งเท่ากับว่าเป็นตัวต้านทานในการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียซึ่งเป็นสารทำความเย็นซึ่งอยู่ภายนอกของท่อ ดังนั้นเมื่อน้ำแข็งมีความหนาขึ้นเรื่อยๆ ก็จะยิ่งถ่ายเทความร้อนได้ยากขึ้น ซึ่งอัตราความร้อนที่ไหลผ่านระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียจะมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ ทำให้ในช่วงท้ายๆ รอบการผลิตน้ำแข็งจะช้าลง หมายถึงภาระของเครื่องทำความเย็นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วยเช่นกัน ที่อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศรอบนอก 28 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิน้ำป้อน (z) ที่ 27.5 องศาเซลเซียส จะได้สมการความสัมพันธ์ความหนา(y) และ เวลาการผลิต (x) คือ

$$y = -0.004x^2 + 0.515z - 0.546 \quad (33)$$

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่ทำการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิน้ำป้อน อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศรอบนอก อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็ง และอุณหภูมิเฉลี่ยผิวฟรีซซึ่ง ซึ่งพารามิเตอร์ทุกค่านี้จะมีแนวโน้มของค่าความหนาของน้ำแข็งลดลงไปในทิศทางเดียวกันคือ จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลา โดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้ายๆ ของการผลิต เพราะเมื่อชั้นของน้ำแข็งเกิดขึ้นภายในท่อทำน้ำแข็งตัวของน้ำแข็งจะมีสภาพการ

นำความร้อนที่ต่ำซึ่งเท่ากับว่าเป็นตัวต้านทานในการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียซึ่งเป็นสารทำความเย็นซึ่งอยู่ภายนอกของท่อ เมื่อน้ำแข็งมีความหนาขึ้นเรื่อยๆ ก็จะยิ่งถ่ายเทความร้อนได้ยากขึ้น ซึ่งอัตราความร้อนที่ไหลผ่านระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียจะมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลให้ในช่วงท้ายๆ รอบการผลิตน้ำแข็งจะช้าลง ดังนั้นภาระของเครื่องทำความเย็นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วย แต่ค่าความหนาของน้ำแข็งตลอดที่ได้จากพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะมีค่าที่ไม่เท่ากัน จะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศรอบนอก อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็ง และอุณหภูมิเฉลี่ยผิวฟรีซซึ่ง ส่งผลกระทบกับค่าความหนาของน้ำแข็งตลอดน้อย ส่วนอุณหภูมิน้ำป้อนจะมีผลต่อค่าความหนาของน้ำแข็งตลอด โดยอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิน้ำป้อนต่อความหนาของน้ำแข็งจะได้ 0.41 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร อุณหภูมิเฉลี่ยผิวฟรีซซึ่งต่อความหนาของน้ำแข็งจะได้ 0.2 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็งต่อความหนาของน้ำแข็งจะได้ 0.16 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร และอุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศรอบนอกต่อความหนาของน้ำแข็งจะได้ 0.15 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร ซึ่งเห็นได้ว่าอุณหภูมิ น้ำป้อนส่งผลต่อค่าความหนาของน้ำแข็งตลอดและมีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกันกับผลทางทฤษฎี โดยค่าความผิดพลาดระหว่างความหนาของน้ำแข็งกับเวลาในการผลิต ค่าทางทฤษฎีและค่าที่วัดได้จะมีค่าประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Giorgi, F. Stella and T.A. Kowalewski, "Phase Change Problems with Free Convection: Fixed Grid Numerical Simulation", *Computing and Visualization in Science* 2, 1999, pp.123-130.
- [2] A. Kaceniauska, "Infrared Capturing Techniques for Moving Interface Flows", Vilnius Gediminas Technical University, 2002.
- [3] M. Salcudean and Z. Abdullah, On the Numerical Modeling of Heat Transfer During Solidification Processes, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 25, 1988, pp. 445-473.
- [4] V. R. Voller and C.R. Swaminathan, "Fixed Grid Techniques for Phase Change Problems: A Review", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30, 1990, pp. 875-898.
- [5] F.P. Incropera and D.P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John-Wiley & Sons, New York, USA, 2002, pp. 905-916.
- [6] N. Pannucharoenwong, "A simulation of tubular-ice solidification with comparing numerical method in cartesian and polar coordinates." The 25th conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 19-21 October 2011, Ao Nang Villa Resort, Krabi.
- [7] N. Pannucharoenwong, "The solidification of tubular-ice 2-D by fixed grid method." The 7th conference on Energy Network of Thailand, 3-5 May 2011, Phuket Resort and Spa, Phuket.
- [8] P. Ghabkham. "A study to improve the tubular-ice production efficiency. The 1st Conference on Energy Network of Thailand, 11-13 May 2005, Ambassador City Jomtien Hotel, Chonburi.
- [9] M.N. Özisik, *Heat Conduction*, John-Wiley & Sons, New York, USA, 1993, pp. 405-408.