

ผลกระทบของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อการแข็งตัวของน้ำแข็งหลอด The Effect of Inlet Temperature on the Solidification of Tubular Ice

ณัฐดนัย พรรณเจริญวงษ์^{1*} รพีพัฒน์ ลาดศรีทา¹ นริศ นราพงษ์²
วีรชน นามโคตร² และ สิทธิพร เรืองประเสริฐกิจ²

¹อาจารย์ ²นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
จังหวัดขอนแก่น 40000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่ทำการทดลอง คือ อุณหภูมิน้ำป้อน ซึ่งมีแนวโน้มค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา โดยที่ค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดจะแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของเวลาตามทฤษฎี โดยจะมีค่าความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้าย ๆ ของการผลิต อัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิน้ำป้อนต่อความหนาของน้ำแข็งมีค่า 0.41 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิน้ำป้อนจะส่งผลต่อค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลทางทฤษฎี โดยค่าความผิดพลาดระหว่างค่าความหนาที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำและการเก็บข้อมูลจริง จะมีค่าประมาณ 342 เปอร์เซ็นต์, 43 เปอร์เซ็นต์ และ 8 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงกระบวนการผลิตเวลา 0-10 นาที, 11-20 นาที, และ 21-36 นาที ตามลำดับ

Abstract

This study was aimed to investigate experimental study of the parameters affecting the amount of tubular ice. Significant studied parameters were inlet water temperature. Thickness tendency was increasingly according to time. The thickness of the tubular ice varies with the square root of time according to the theory. At the beginning of the process thickness increased quite fast and decelerated at the end of the production process. The inlet water temperature affected to thickness of tubular ice as the ratio of inlet water temperature to thickness was 0.41 degrees Celsius per millimeter. Thus, inlet water temperature affected to thickness of tubular ice according to theoretically results with 342%, 43% and 8% error value between ice thickness and production time for 0-10 minutes, 11-20 minutes and 21-36 minutes respectively

คำสำคัญ : อุณหภูมิน้ำป้อน น้ำแข็งหลอด การแข็งตัวของน้ำแข็งหลอด

Keywords : Inlet water Temperature, Tubular Ice, Solidification

*ผู้พิมพ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ nattadon.pa@gmail.com โทร. 0 4323 5403

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุณหภูมิโลกสูงขึ้น ประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบเช่นเดียวกัน จากสภาวะการณ์ดังกล่าวจึงมีความต้องการอุปโภคบริโภคน้ำแข็งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุตสาหกรรมน้ำแข็งมีการแข่งขันเพิ่มมากขึ้นตามมาด้วย ทั้งนี้เนื่องจากน้ำแข็งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปในอุตสาหกรรมต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น แขน้ำแข็งอาหารทะเล เครื่องดื่ม การรักษาทางการแพทย์ และใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นอุตสาหกรรมน้ำแข็งจึงเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ

นอกจากความสำคัญในระดับอุตสาหกรรมแล้ว ความต้องการน้ำแข็งของภาคธุรกิจการค้าในปัจจุบันเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ทำให้มีการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมน้ำแข็งอยู่ใกล้กับแหล่งชุมชนที่อยู่อาศัยและธุรกิจร้านค้าต่างๆ จากการศึกษาในเบื้องต้นกระบวนการผลิตน้ำแข็งในแต่ละครั้งมีการใช้เวลานาน ส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมากในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็ง และมีค่าใช้จ่ายในการซื้อพลังงานไฟฟ้าที่สูงมากเช่นกัน เพื่อให้อุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็งนี้มีกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการผลิตให้สามารถแข่งขันในอุตสาหกรรมน้ำแข็งต่อไปได้

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงพฤติกรรมของการแข็งตัวไม่ว่าจะเป็นการแข็งตัวของสารบริสุทธิ์ และสารละลาย หรือแม้กระทั่งการแข็งตัวของโลหะและการแข็งตัวของน้ำแข็งซึ่งการแข็งตัวของน้ำแข็งนี้จะมุ่งเน้นไปที่การทำนายพฤติกรรมของการแข็งตัวของน้ำแข็ง (น้ำแข็งหลอด+น้ำแข็งซอง) และศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการแข็งตัวของน้ำแข็ง เช่น อุณหภูมิอิมิตตัวของสารทำความเย็น(จิตติน แดงเทียง, 2550) ขนาดของท่อทำน้ำแข็งและลักษณะรูปร่างของท่อ (ท่อเรียบ+ท่อขรุขระ)(จิตติน แดงเทียง, 2549) การติดครีบบ้านนอกท่อทำน้ำแข็ง(จิตติน แดงเทียง, 2548) เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อการแข็งตัวของน้ำแข็ง โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาทางด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (simulations) เป็นส่วนมาก และการศึกษาทางด้านทดลองจริงยังมีน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจการศึกษาทางด้านทดลองจริงเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับการศึกษาทางด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ดังนั้นประเด็นที่สำคัญของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อการแข็งตัวของน้ำแข็งหลอด

2. วิธีการทดลอง

2.1 การหาค่าอัตราความร้อนที่ผ่านท่อน้ำแข็งและอุณหภูมิที่ผิวนอกของท่อน้ำแข็ง ณ ระดับความหนาของชั้นน้ำแข็งและเวลาต่างๆกัน

2.1.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะเดือดบนพื้นผิวเรียบ

โดยในที่นี้ได้เลือกใช้สารทำความเย็นคือ แอมโมเนีย เราจะได้คุณสมบัติของแอมโมเนียที่ทำท่อดังนี้

Stephan and Abdelsalam ได้พัฒนาความแม่นยำของความสัมพันธ์ของการเดือดในช่วงการเกิดฟองขึ้นสำหรับของไหลหลายๆชนิด ซึ่งความสัมพันธ์นี้มาจากคุณสมบัติทางกายภาพของของไหลซึ่งค่อนข้างจะดีกว่าการใช้ความสัมพันธ์จากความดันที่ลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ของของไหลอินทรีย์คือ

$$\frac{\Gamma_{nb} d}{k_L} = 0.0546 \left[\left(\frac{\dots v}{\dots L} \right)^{1/2} \left(\frac{qd}{k_L T_{sat}} \right) \right]^{0.67} \times \left(\frac{\Delta h_v d^2}{a_L^2} \right)^{0.248} \left(\frac{\dots L - \dots v}{\dots L} \right)^{-4.33} \quad (1)$$

เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองที่แยกตัวออกมา d สามารถหาได้จาก

$$d = 0.0146s \left[\frac{2t}{g(\dots_L - \dots_V)} \right]^{1/2} \tag{2}$$

โดยที่ค่า

$$q = r_{nb} \Delta T \tag{3}$$

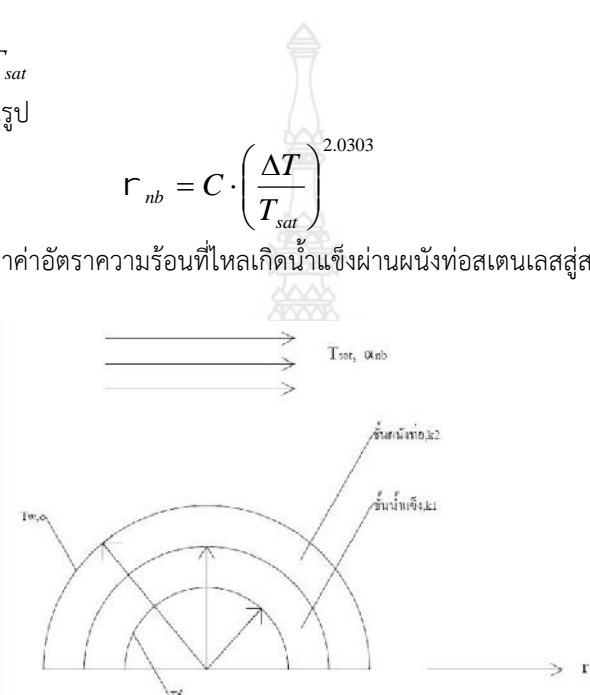
โดย

$$\Delta T = T_{w,o} - T_{sat} \tag{4}$$

จัดสมการที่ (1) ให้อยู่ในรูป

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

2.1.2 การหาค่าอัตราการความร้อนที่ไหลเกิดน้ำแข็งผ่านผนังท่อสแตนเลสสู่สารทำความเย็นที่ระดับความหนาของน้ำแข็งต่างๆ



รูปที่ 1 แสดงการจำลองรูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น

- จากรูปกำหนดให้
- k_1 และ k_2 คือ ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็งและท่อตามลำดับ
 - r_0 , r_1 และ r_2 คือ รัศมีของรูกลวงของน้ำแข็ง, รัศมีภายในและนอกของท่อตามลำดับ
 - T_f คือ อุณหภูมิบนผิวของน้ำแข็งซึ่งเท่ากับ 0 องศาเซลเซียส
 - $T_{w,i}$ คือ อุณหภูมิบนผิวของท่อด้านใน
 - $T_{w,o}$ คือ อุณหภูมิบนผิวของท่อด้านนอก
 - T_{sat} คือ จุดเดือดของสารทำความเย็น
 - r_{nb} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดของสารทำความเย็น

ซึ่งวิธีนี้จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนได้รวดเร็วและยังเป็นวิธีที่ง่ายเนื่องจากผลของข้อมูลที่เทียบกับเวลาหายไปเนื่องจากสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะคงที่ (Steady-state) ซึ่งสามารถหาค่าความต้านทานความร้อน ณ ตำแหน่งต่างๆหาได้ดังนี้

- ที่ชั้นของน้ำแข็ง (R_1) :

$$R_1 = \frac{1}{2fk_1} \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (6)$$

- ที่ชั้นของผนังท่อ (R_2) :

$$R_2 = \frac{1}{2fk_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (7)$$

- ที่พื้นผิวภายนอกของท่อ (R_3) :

$$R_3 = \frac{1}{2fr_2\Gamma_{nb}} \quad (8)$$

ดังนั้นค่าความต้านทานความร้อนรวมของกระบวนการนี้คือ

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

ซึ่งค่าการะความเย็นต่อหน่วยความยาว (W/m) คือ

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

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (9) จะได้

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

จากสมการที่ (5) กำหนดให้

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

จะได้

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

หาสมการสมดุลทางความร้อนที่ผนังท่อภายนอกเพื่อทำการหาค่าของ $T_{w,o}$ จะได้ดังนี้

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

แทนค่าความต้านทานความร้อนจากสมการที่ (6)-(8) แล้วทำการจัดรูปสมการจะได้

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

แทนสมการที่ (5) ลงในสมการ (15) จะได้

$$\left(\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) (T_{w,o} - T_{sat})$$

$$= \frac{1}{r_2 C_s (T_{w,o} - T_{sat})^{2.0303}} (T_f - T_{w,o}) \tag{16}$$

กำหนดให้

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

เราจะได้ว่า

$$C_1 (T_{w,o} - T_{sat}) = \frac{1}{r_2 C_s (T_{w,o} - T_{sat})^{2.0303}} (T_f - T_{w,o}) \tag{18}$$

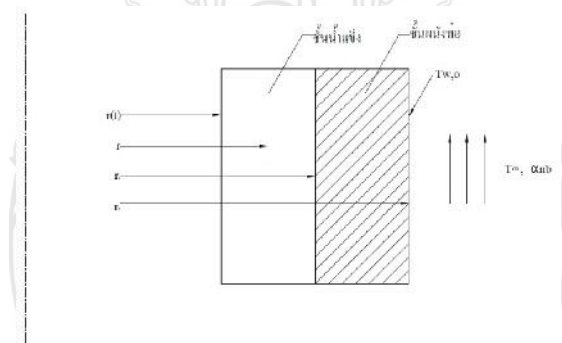
$$(T_{w,o} - T_{sat})^{3.0303} = \frac{1}{r_2 C_s C_1} [(T_f - T_{sat}) - (T_{w,o} - T_{sat})] \tag{19}$$

จากสมการที่ (4) เมื่อทำการจัดรูปของสมการจะได้ว่า

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

เนื่องจากสมการที่ (20) เป็นสมการโพลิโนเมียลซึ่งต้องทำการสร้างโปรแกรมขึ้นมาเพื่อช่วยในการหาค่าของสมการซึ่งก็คือค่าของ ΔT ซึ่งจะนำไปใช้คำนวณหาค่าอัตราการความร้อนและค่าอุณหภูมิผิววนอกของท่อต่อไป

2.2 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของน้ำแข็งกับเวลาสำหรับการผลิตน้ำแข็งหลอด



รูปที่ 2 ปัญหาของการแข็งตัวภายในหลอดทำน้ำแข็งหลอด

ทำสมดุลทางความร้อนที่ตำแหน่ง r ใดๆในชั้นของน้ำแข็ง จะได้ว่า

$$\frac{T_f - T_r}{R_r} = \frac{T_f - T_{\infty}}{R_1 + R_2 + R_3} \tag{21}$$

โดย

- ที่ตำแหน่ง r ใดๆ (R_r) :

$$R_r = \frac{1}{2fk_1} \ln \frac{r}{r(t)} \tag{22}$$

- ที่ชั้นของน้ำแข็ง (R_1) :

$$R_1 = \frac{1}{2fk_1} \ln \frac{r_1}{r(t)} \quad (23)$$

- ที่ชั้นของผนังท่อ (R_2) :

$$R_2 = \frac{1}{2fk_2} \ln \frac{r_2}{r(t)} \quad (24)$$

- ที่พื้นผิวภายนอกของท่อ (R_3) :

$$R_3 = \frac{1}{2fr_2\Gamma_{nb}} \quad (25)$$

จากสมการ (21) จะได้

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

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \dots L \frac{dr(t)}{dt} \quad (27)$$

จากสมการที่ (27) จะละทิ้งการนำความร้อนของน้ำไปจะได้

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

และ (26) จะได้ว่า

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

แทนค่า (28) ลงใน (27)

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

จาก (28) ทำการจัดรูป และให้ $r = r(t)$ จะได้

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

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (30) จะได้

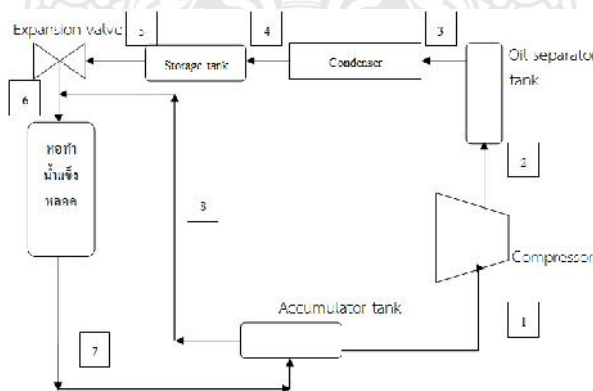
$$\begin{aligned} \frac{(T_\infty - T_f)}{\dots L} t \Big|_0^t &= \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{k_1} \ln \left[\frac{r_1}{r(t)} \right] dr(t) \\ &+ \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{k_2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) dr(t) + \int_{r_1}^{r(t)} \frac{r(t)}{\Gamma_{nb} r_2} dr(t) \end{aligned} \tag{31}$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาพจน์ทางขวามือของสมการที่ (31) แล้วจะพบว่าสมการอินทิเกรตออกได้ด้วยวิธีธรรมดาได้เพียงสองพจน์แรกเท่านั้น ซึ่งพจน์ที่สามนั้นจะทำการหาค่าด้วยวิธีเชิงตัวเลขซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป จากสมการที่ (31) จะได้

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

จากสมการที่ (31) จะเห็นว่าพจน์ที่สามทางขวามือนั้นไม่สามารถหาค่าของอินทิกรัลได้โดยตรง เนื่องจากว่าค่าของ Γ_{nb} เป็นฟังก์ชันของค่า ΔT หรือ $(T_{w,o} - T_f)$ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของ $r(t)$ ดังนั้นจะสามารถหาค่าของพจน์ดังกล่าวได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการหาค่าของอินทิกรัลโดยวิธีของซิมป์สัน และค่า $r(t)$ ที่ได้ในแต่ละเวลานั้นจะแสดงถึงรัศมีของท่อทำน้ำแข็ง ณ เวลานั้นๆที่ได้เปลี่ยนไป ซึ่งเมื่อนำไปลบออกจากคาร์ซีท่อดีเดิมจะสามารถได้ค่าความหนาของน้ำแข็งออกมา

2.3 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอในอุตสาหกรรมผลิตน้ำแข็งหลอด



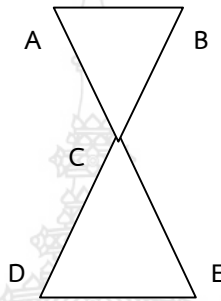
รูปที่ 3 วัฏจักรการทำงาน of โรงน้ำแข็ง

วัฏจักรการทำงาน of โรงงานน้ำแข็งมีรูปภาพซ่อนสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 3 ดังนี้ อุปกรณ์อัดไอ (Compressor) จะทำการอัดไอของแอมโมเนียจากสภาวะที่ 1 ไปสู่สภาวะที่ 2 แล้วจากนั้นไอที่อัดแล้วจะไหลผ่านถังแยกน้ำมัน (Oil Separator tank) แล้วเข้าสู่สภาวะที่ 3 ซึ่งเป็นสภาวะก่อนเข้าอุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) เมื่อผ่านอุปกรณ์ควบแน่นแล้วสารทำความเย็นจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลในสภาวะที่ 4 แล้วไหลเข้าถึงเก็บแอมโมเนียเหลว (Ammonia Liquid Storage Tank) หลังจากนั้นแอมโมเนียเหลวจะไหลออกจากถัง

เก็บแอมโมเนียเหลว (Ammonia Liquid Storage Tank) เป็นสภาวะที่ 5 แล้วไหลเข้าสู่วาล์วลดความดัน (Expansion Valve) แล้วกลายเป็นสภาวะที่ 6 หลังจากนั้นแอมโมเนียที่อยู่ในสภาวะผสมกันระหว่างไอและของเหลว (mixture) จะไหลเข้าสู่ชุดคอยล์เย็น (Evaporator) หรือในที่นี้คือหอทำน้ำแข็งหลอดและออกมาในสภาวะที่ 7 เพื่อไหลเข้าสู่ถังแยกไอและของเหลว (Gas-Liquid Storage Tank) เพื่อแยกส่วนที่เป็นไอไปที่อุปกรณ์อัดไอซึ่งเป็นสภาวะที่ 1 ส่วนที่เป็นของเหลวในสภาวะที่ 8 จะไหลกลับเข้าสู่หอทำน้ำแข็งอีกครั้งหนึ่งรวมกลับของเหลวที่มาจากสภาวะที่ 6

2.4 การใช้ทฤษฎีสามเหลี่ยมคล้ายเพื่อช่วยในการวัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด

การใช้ทฤษฎีสามเหลี่ยมคล้ายเพื่อช่วยในการวัดค่าความหนาของน้ำแข็ง



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของสามเหลี่ยมคล้าย

จากนิยามของสามเหลี่ยมคล้าย

1. ด้านคู่ที่สมนัยกัน คือ ด้านคู่ที่อยู่ตรงข้ามมุมที่เท่ากัน
2. ถ้าสามเหลี่ยมสองรูปคล้ายกัน อัตราส่วนของด้านที่สมนัยกันจะเท่ากัน
3. ถ้าอัตราส่วนของด้าน 3 คู่ของสามเหลี่ยมสองรูปใดๆ มีค่าเท่ากัน แล้วสามเหลี่ยมสองรูปนั้นจะคล้ายกัน

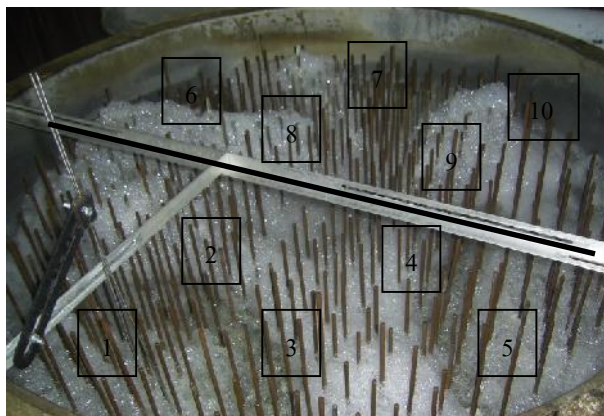
จากรูปที่ 4 สรุปได้ว่า $\triangle ABC \sim \triangle DEC$ และสามารถสรุปได้ว่า ถ้ารูปสามเหลี่ยมสองรูปใดคล้ายกัน อัตราส่วนของความยาวของด้านคู่ที่อยู่ตรงข้ามกับมุมที่มีขนาดเท่ากันจะเท่ากัน ซึ่งจะสรุปได้ว่า

$$\frac{\overline{AB}}{\overline{DE}} = \frac{\overline{BC}}{\overline{EC}} = \frac{\overline{CA}}{\overline{CD}} \quad (33)$$

2.5 การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

1. ติดตั้งเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า เครื่องมือวัดอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ เครื่องมือวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล

2. เลือกหลอดทำน้ำแข็งที่จะทำการวัดจำนวน 10 หลอด โดยที่แต่ละหลอดจะตั้งอยู่ในตำแหน่งต่างๆของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เลือกหลอดทำน้ำแข็ง

3. เริ่มทำการวัดเก็บข้อมูลเมื่อมีการปล่อยน้ำเข้าสู่ท่อทำน้ำแข็งเป็นค่าแรก และอ่านค่าความดันขาเข้าและออกที่เครื่องอัดไอเพื่อใช้ในการหาค่าอุณหภูมิอิ่มตัวของแอมโมเนีย R-717 ในการผลิตนั้นๆ

4. จากนั้นเริ่มทำการเก็บวัดค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดทุกๆ 5 นาที โดยเริ่มจาก หลอดที่ 1 ในนาที่ที่ 5 หลอดที่ 2 ในนาที่ที่ 10 หลอดที่ 3 ในนาที่ที่ 15 ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนครบทั้ง 10 หลอดในนาที่ที่ 35 โดยค่าสุดท้ายในนาที่ที่ 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 และนำมาลบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อคือ 35 มิลลิเมตร แล้วหารค่าที่ได้ด้วย 2 เพื่อจะได้ค่าความหนาของน้ำแข็งหลอด ณ เวลา นั้นๆ ของแต่ละชุดข้อมูล

7. นำค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ได้มาทั้งหมดหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีต่อไป

8. นำค่าอุณหภูมิน้ำป้อน ที่ได้มาวิเคราะห์ผลต่อไป

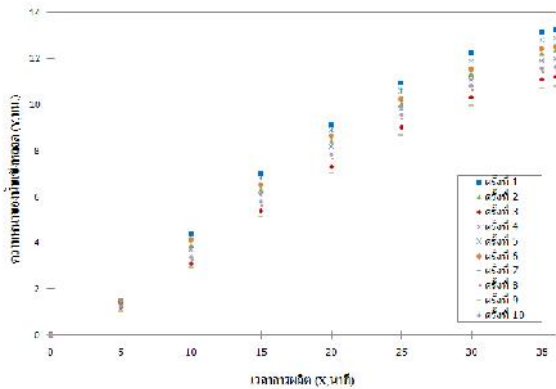
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 การหาความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลาต่างๆ

3.1.1 การหาความหนาของน้ำแข็ง ณ เวลาต่าง ๆ ในการตรวจวัดจริง

จากการเก็บข้อมูลการตรวจวัดจริง จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นการแสดงค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากโรงงาน

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ
การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

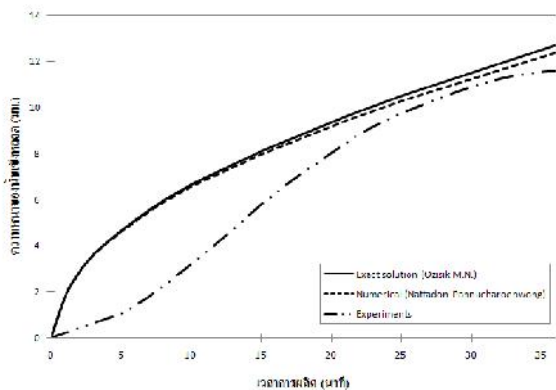


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำแข็งหลุดกับเวลาในการผลิต

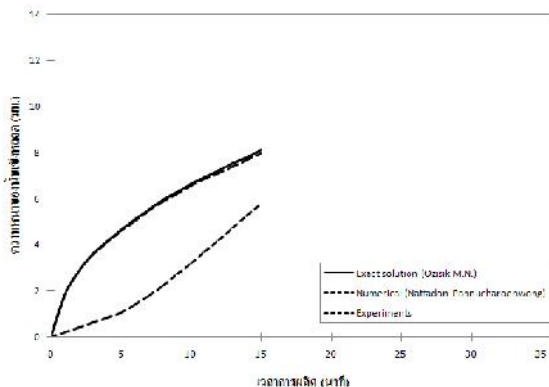
จากรูปที่ 6 นั้นจะเห็นว่าค่าความหนาของน้ำแข็งหลุดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลา โดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้ายๆของการผลิต ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อชั้นของน้ำแข็งเกิดขึ้นภายในท่อทำน้ำแข็ง ตัวของน้ำแข็งจะมีสภาพการนำความร้อนที่ต่ำเท่ากับว่าเป็นตัวต้านทานในการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียซึ่งเป็นสารทำความเย็นอยู่ภายนอกของท่อ ดังนั้นเมื่อน้ำแข็งมีความหนาขึ้นเรื่อยๆก็จะยิ่งถ่ายเทความร้อนได้ยากขึ้น อัตราความร้อนที่ไหลผ่านระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียจะมีค่าต่ำลงเรื่อยๆเป็นผลให้ในช่วงท้ายๆรอบการผลิตน้ำแข็งจะช้าลงนั่นเอง จะหมายถึงว่าภาวะของเครื่องทำความเย็นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วยเช่นกัน

3.1.2 การหาความหนาของน้ำแข็งเมื่อเวลาต่างๆ จากการคำนวณทางทฤษฎี

ในการวิเคราะห์ในส่วนนี้นั้นจะใช้ความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการเดือดบนพื้นผิวเรียบของStephan และ Abdelsalam ดังสมการที่ (1) และ (2) จะได้ผลแสดงได้ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8



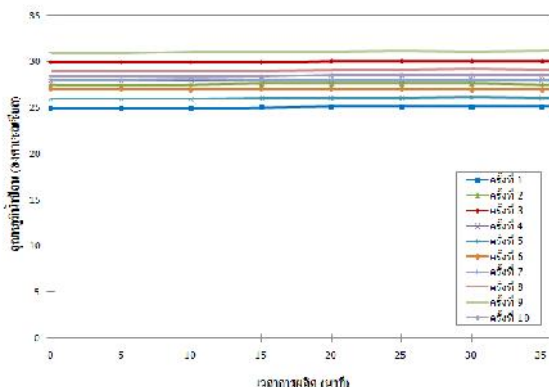
รูปที่ 7 เปรียบเทียบความหนาของน้ำแข็งเทียบกับเวลาในการผลิตจากทางทฤษฎีและข้อมูลจริง



รูปที่ 8 เปรียบเทียบความหนาของน้ำแข็งเทียบกับเวลาในการผลิตจากทางทฤษฎีและข้อมูลจริง

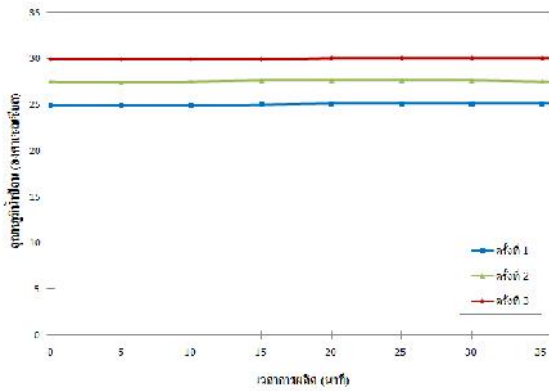
จากรูปที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบค่าความหนาของน้ำแข็งที่เวลาต่างๆซึ่งในทางทฤษฎีแล้วค่าความหนาจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปโดยที่ค่าความหนาจะแปรผันตรงกับรากที่สองของเวลา จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความหนาที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข (ณัฐดนัย พรธณูเจริญวงษ์) จะมีค่าต่ำกว่าค่าความหนาที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำตรงเล็กน้อย โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตั้งแต่เวลาตั้งต้นจนถึงเวลาสิ้นสุดอยู่ที่ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความหนาที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำตรงเปรียบเทียบกับค่าข้อมูลจริง จะเห็นได้ว่าค่าความหนาที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำตรงจะมีความสอดคล้องกันกับการเก็บข้อมูลจริง ซึ่งค่าที่ได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าความผิดพลาดระหว่างค่าความหนาที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำตรงและการเก็บข้อมูลจริง จะมีค่าประมาณ 342 เปอร์เซ็นต์, 43 เปอร์เซ็นต์ และ 8 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงกระบวนการผลิตเวลา 0-10 นาที, 11-20 นาที, และ 21-36 นาที ตามลำดับ ส่วนค่าที่ได้แตกต่างกันนั้นเนื่องจากการกำหนดค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแอมโมเนียให้มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากการทำงานจริงของระบบในการทำน้ำแข็งนั้นระบบจะไม่ได้คงที่เช่นเดียวกับสมมติฐานที่ตั้งขึ้น อีกทั้งการใช้ค่าความดันในฝั่งดูดเข้าเครื่องอัดไอในการประมาณค่าคุณสมบัติของแอมโมเนียในถังทำน้ำแข็งซึ่งเมื่อพิจารณาในช่วงเริ่มของการผลิตนั้นค่าเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำไม่ได้เป็นไปดังค่าเริ่มต้นที่นำมาใช้ในทางทฤษฎีทำให้มีความผิดพลาดสูงในช่วงแรกของการผลิต(รูปที่ 8) แต่เนื่องจากผลที่ได้ยังมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันดังนั้นจะสามารถนำผลที่ได้จากการตรวจวัดข้อมูลจริงไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำตรงได้

3.1.3 อุณหภูมิน้ำป้อนที่มีผลต่อความหนาของน้ำแข็งตลอด ๓ เวลาต่างๆ

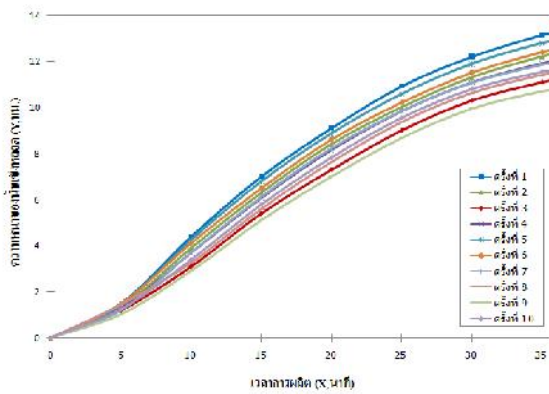


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผลิตกับอุณหภูมิน้ำป้อน

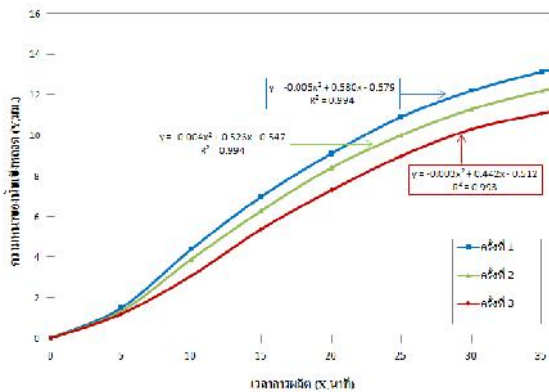
วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ
การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผลิตกับอุณหภูมิน้ำป้อน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผลิตกับความหนาของน้ำแข็งหลอดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำป้อน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผลิตกับความหนาของน้ำแข็งหลอดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำป้อน

จากรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิน้ำป้อน มีแนวโน้มค่าความหนาของน้ำแข็งหลอดไปในทิศทางเดียวกันคือ จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลา โดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้ายๆของการผลิต ซึ่งทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อชั้นของน้ำแข็งเกิดขึ้นภายในท่อทำน้ำแข็ง ตัวของน้ำแข็งจะมีสภาพการนำความร้อนที่ต่ำซึ่งเท่ากับว่าเป็นตัวต้านทานในการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียซึ่งเป็นสารทำความเย็นซึ่งอยู่ภายนอกของท่อ ดังนั้นเมื่อน้ำแข็งมีความหนาขึ้นเรื่อยๆ ก็ยังถ่ายเทความร้อนได้ยากขึ้น ซึ่งอัตราความ

ร้อนที่ไหลผ่านระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียจะมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลให้ในช่วงท้ายๆ รอบการผลิต น้ำแข็งจะช้าลงนั่นเอง ซึ่งก็หมายถึงภาระของเครื่องทำความเย็นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วยเช่นกัน อุณหภูมิน้ำป้อนที่ 25 องศาเซลเซียสค่าความหนาแน่นน้ำแข็งตลอดเท่ากับ 13.25 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำป้อนที่ 27.5 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นน้ำแข็งตลอดเท่ากับ 12.33 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำป้อนที่ 30 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นน้ำแข็งตลอดเท่ากับ 11.20 มิลลิเมตร แสดงว่าอุณหภูมิน้ำป้อนจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นน้ำแข็งตลอด โดยอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิ น้ำป้อนต่อความหนาแน่นน้ำแข็งจะได้ 0.41 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร

4. สรุป

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิน้ำป้อน ซึ่งมีแนวโน้มค่าความหนาแน่นของน้ำแข็งลดลงไปในทิศทางเดียวกันคือ จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลา โดยจะมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงเริ่มแรก และจะช้าลงในช่วงท้ายๆ ของการผลิต ซึ่งทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อชั้นของน้ำแข็งเกิดขึ้นภายในท่อทำน้ำแข็ง ตัวของน้ำแข็งจะมีสภาพการนำความร้อนที่ต่ำซึ่งเท่ากับว่าเป็นตัวต้านทานในการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียซึ่งเป็นสารทำความเย็นซึ่งอยู่ภายนอกของท่อ ดังนั้นเมื่อน้ำแข็งมีความหนาแน่นขึ้นเรื่อยๆ ก็จะทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ยากขึ้น ซึ่งอัตราความร้อนที่ไหลผ่านระหว่างน้ำที่เป็นของเหลวกับแอมโมเนียจะมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลให้ในช่วงท้ายๆ รอบการผลิต น้ำแข็งจะช้าลงนั่นเอง ซึ่งก็หมายถึงภาระของเครื่องทำความเย็นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วยเช่นกัน และอุณหภูมิ น้ำป้อนจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นน้ำแข็งตลอด โดยอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิ น้ำป้อนต่อความหนาแน่นน้ำแข็งจะได้ 0.41 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ น้ำป้อนส่งผลต่อค่าความหนาแน่นน้ำแข็งตลอดและมีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกันกับผลทางทฤษฎี โดยค่าความผิดพลาดระหว่างค่าความหนาแน่นที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำตรงและการเก็บข้อมูลจริง จะมีค่าประมาณ 342 เปอร์เซ็นต์, 43 เปอร์เซ็นต์ และ 8 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงกระบวนการผลิตเวลา 0-10 นาที, 11-20 นาที, และ 21-36 นาที ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

6. เอกสารอ้างอิง

- M. Necati Özisik. 1993. *Heat Conduction*. John-Wiley & Sons. New York. USA: pp. 405-408.
- M. Salcudean and Z. Abdullah. 1988. *On the Numerical Modeling of Heat Transfer During Solidification Processes*. International Journal for Numerical Methods in Engineering: Vol. 25. pp. 445-473.
- ณัฐดนัย พรรณเจริญวงษ์. 2554. การจำลองการแข็งตัวของน้ำแข็งตลอดโดยการเปรียบเทียบระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ในระบบพิกัดฉากและระบบพิกัดเชิงขั้ว. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย: ครั้งที่ 25. อ่าวนาง วิลล่า รีสอร์ท จังหวัดกระบี่.
- ณัฐดนัย พรรณเจริญวงษ์. 2554. การจำลองการแข็งตัวของน้ำแข็งตลอดใน 2 มิติ โดยใช้กริดคงตัว. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย: ครั้งที่ 7. ภูเก็ต รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต.
- Stephan, K., Abdelsalam, M. 1980. *Heat-Transfer correlations for natural convection boiling*. Int. J. Heat Mass transfer: Vol. 23. pp. 73-87.