

แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการทำความเย็นในการผลิตน้ำแข็งหลอด

Thermodynamic model of a freezing process in tube ice production

กมลวิสิทธิ์ พันวอ^{1*} และ ธีระชาติ พรพิบูลย์²
Kamonwisit Phanwor^{1*} and Teerachart Pornpibul²

Received: 10 January 2023; Revised: 16 March 2023; Accepted: 4 April 2023

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการทำความเย็นในเครื่องทำน้ำแข็งหลอด เพื่อหาระยะเวลาที่ใช้และภาระการทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต เนื่องจากปัจจุบันการผลิตน้ำแข็งหลอดให้มีความหนาตามต้องการ เครื่องทำน้ำแข็งหลอดถูกตั้งเวลาของกระบวนการทำความเย็นไว้คงที่ทุกรอบการผลิตภายใต้อุณหภูมิน้ำป้อนค่าหนึ่ง แต่ความเป็นจริงความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้ไม่เป็นไปตามต้องการจากอุณหภูมิน้ำป้อนที่เปลี่ยนแปลง 2 ปัจจัยคือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและการลดอุณหภูมิน้ำป้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำเย็นทั้งจากการละลายน้ำแข็งในรอบผลิตก่อนเพื่อประหยัดพลังงาน ยิ่งไปกว่านั้นการทำนายภาระการทำความเย็นจากแบบจำลองที่มีการศึกษาวิจัยในอดีตขาดการพิจารณาช่วงการลดอุณหภูมิน้ำซึ่งมีแนวโน้มเกิดภาระการทำความเย็นสูงสุดขึ้น ผลการศึกษานี้พบว่า สามารถทำนายระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นได้แม่นยำขึ้น 15.18% เมื่อเทียบกับงานวิจัยในอดีต ภาระการทำความเย็นสูงสุดเกิดในช่วงลดอุณหภูมิน้ำและลดลงต่อเนื่องจนสิ้นสุดช่วงก่อตัวของน้ำแข็งหลอด เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำกับสารทำความเย็นและความต้านทานความร้อนของน้ำแข็งหลอดที่เพิ่มความหนา ภาระการทำความเย็นในช่วงเวลาต่างๆ นำไปสู่อัตราการระเหยสารทำความเย็นซึ่งเป็นผลลัพธ์สำคัญในการกำหนดอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอที่เหมาะสมกับเครื่องทำน้ำแข็งหลอด

คำสำคัญ: แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์, อุณหภูมิน้ำป้อน, ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น, ความหนาของน้ำแข็งหลอด, ภาระการทำความเย็น

Abstract

This research article proposes a thermodynamic model of a freezing process in a tube ice-making machine to determine process time and cooling load throughout the freezing process. Nowadays, for production of tube ice to the required thickness, a tube ice-making machine will set the freezing process time to be constant in every production cycle under only one feed water temperature. However, our experiments found that the actual thickness of the tube ice produced was not as required because the feed water temperature deviated in response to two factors. - (1) the ambient temperature and (2) the reduction in the feed water temperature at the heat exchanger using the chilled water from the defrost process of production cycle ago for energy saving. Moreover, the prediction of cooling load from earlier research models lacked consideration of the water temperature decrease period, which tends to be the maximum cooling load. The results of this research revealed that simulation predicts the process's time of the freezing process with 15.18% accuracy compared to past research. The maximum cooling load occurred during the water temperature

¹ นิสิตปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² อาจารย์, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

* ติดต่อผู้พิมพ์: กมลวิสิทธิ์ พันวอ อีเมล: M6401641@g.sut.ac.th

¹ Master degree student, School of mechanical engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

² Lecturer, School of mechanical engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* Corresponding author: Kamonwisit Phanwor, Email: M6401641@g.sut.ac.th

decrease period, then kept decreasing until the end of the tube ice-making period due to the temperature difference between the water and the refrigerant and the thermal resistance of tube ice from increasing thickness. This cooling load has a known evaporation rate of the refrigerant throughout the freezing process, which is the main result that guides the determination of the refrigerant suction rate of a compressor suitable for the tube ice-making machine.

Keywords: Thermodynamic model, feed water temperature, freezing process time, tube ice thickness, cooling load

บทนำ

กระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดมี 4 กระบวนการใน 1 รอบการผลิต ได้แก่ กระบวนการป้อนน้ำคือการป้อนน้ำสะอาดเข้าสู่หอทำน้ำแข็งหลอด กระบวนการทำความเย็นคือการทำความเย็นน้ำภายในหอทำน้ำแข็งหลอดที่ความดันบรรยากาศด้วยสารทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิน้ำจนกระทั่งน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งหลอดที่มีความหนาเป็นไปตามต้องการ กระบวนการละลายน้ำแข็งคือการละลายน้ำแข็งที่เกาะกับผิวท่อทำน้ำแข็งหลอดจนน้ำแข็งหลอด้งกล่าวร่วงหล่นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และกระบวนการตัดน้ำแข็งคือการตัดน้ำแข็งหลอดที่ร่วงหล่นจากท่อทำน้ำแข็งหลอดให้ได้ความยาวตามต้องการ

ปัจจุบันกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดให้มีความหนาตามต้องการเครื่องทำน้ำแข็งหลอดจะถูกตั้งเวลาของกระบวนการทำความเย็นไว้คงที่ทุกรอบการผลิตภายใต้อุณหภูมิน้ำป้อนค่าหนึ่ง แต่ความเป็นจริงความหนาน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้ไม่เป็นไปตามต้องการจากอุณหภูมิน้ำป้อนที่เบี่ยงเบนด้วย 2 ปัจจัยคือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและการลดอุณหภูมิน้ำป้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำเย็นทิ้งของกระบวนการละลายน้ำแข็งรอบการผลิตก่อนหน้าเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยมีการศึกษาวิจัยในอดีตเกี่ยวกับการลดอุณหภูมิน้ำป้อนจากน้ำเย็นทิ้งในกระบวนการละลายน้ำแข็งมาลดอุณหภูมิน้ำป้อนในรอบการผลิตถัดไป (ณัฐนัยพรรณเจริญวงศ์ และคณะ, 2556; Pannucharoenwong *et al.*, 2016) ทำการศึกษาเชิงการทดลองและ (Thongdee & Chinsuwan, 2019) ทำการวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบลดอุณหภูมิน้ำป้อนล่วงหน้าสำหรับการผลิตน้ำแข็งหลอด ทั้ง 3 การศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิน้ำป้อนทั้งในด้านการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตและการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดที่ส่งผลไปยังระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งหลอดภายใต้ความหนาน้ำแข็งหลอดที่ต้องการ

การทำนายความหนาของน้ำแข็งหลอดและการทำนายภาระการทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็น (ภูวนาท กาบคำ, 2547; Tangthieng, 2011) หาอัตราการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดด้วยวิธีการสมดุลความร้อนกับวิธีเชิงตัวเลขคือวิธีการซิมป์สันและวิธีผลต่างจำกัด และได้

ทำนายภาระการทำความเย็นด้วยแบบจำลองจากกฎการทำความเย็นของนิวตันโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมที่พิจารณาความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนผ่านน้ำแข็งผ่านท่อและการพาความร้อนขณะเดือดของสารทำความเย็น ทั้ง 2 งานวิจัยได้นำผลลัพธ์ความหนาน้ำแข็งหลอดช่วงเวลาต่างๆ เทียบกับผลการตรวจวัด พบว่าภาระการทำความเย็นสูงสุดเกิดช่วงแรกและลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น ความหนาน้ำแข็งหลอดมีความสอดคล้องเชิงคุณภาพแต่มีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากวิเคราะห์ระบบ 1 มิติและแบบจำลองดังกล่าวพิจารณาเพียงช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดทำให้ทำนายภาระการทำความเย็นได้เฉพาะช่วงดังกล่าว ซึ่งไม่สามารถทำนายภาระการทำความเย็นในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำได้ เนื่องจากลักษณะการถ่ายโอนความร้อนที่แตกต่างกันของทั้ง 2 ช่วง ทำให้ไม่สามารถนำผลอัตราการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดของแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในการทำนายระยะเวลาที่ใช้ในการทำความเย็นและไม่สามารถใช้ผลลัพธ์ภาระการทำความเย็นดังกล่าวไปกำหนดขนาดของเครื่องอัดไอได้ เนื่องจากภาระการทำความเย็นสูงสุดมีแนวโน้มเกิดในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำและสารทำความเย็น ในการศึกษาวิจัยนี้จึงนำแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์จากวิธีสมดุลมวลและสมดุลพลังงานมาทำนายภาระการทำความเย็นและความหนาของน้ำแข็งหลอดตลอดช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดนำไปสู่การทำนายระยะเวลาที่ใช้ของกระบวนการทำความเย็นที่แม่นยำมากยิ่งขึ้นภายใต้ความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต

ดังนั้น บทความวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด เพื่อหาระยะเวลาที่ใช้และภาระการทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต ภาระการทำความเย็นในช่วงเวลาต่างๆ ของกระบวนการทำความเย็นนำไปสู่อัตราการระเหยของสารทำความเย็นซึ่งเป็นผลลัพธ์สำคัญในการกำหนดอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอที่เหมาะสมกับเครื่องทำน้ำแข็งหลอดต่อไปในอนาคต

วิธีการศึกษา

1. กระบวนการทำความเข้าใจในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด

เมื่อน้ำป้อนเข้าสู่หอทำน้ำแข็งหลอดและไหลลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอดในขณะเดียวกันน้ำจะถ่ายโอนความร้อนผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอดไปยังสารทำความเย็นเหลวอัดตัวภายใต้ความดันและอุณหภูมิต่ำ ทำให้น้ำถูกลดอุณหภูมิและต่อมาเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งเกาะที่ผิวท่อทำน้ำแข็งหลอดจนน้ำแข็งหลอดมีความหนาเป็นไปตามความต้องการผลิต จึงแบ่งกระบวนการทำความเข้าใจเป็น 2 ช่วงตามหลักการถ่ายโอนความร้อนที่แตกต่างกัน ดังนี้

1.1 ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ คือ น้ำป้อนที่เข้าสู่หอทำน้ำแข็งหลอดและไหลเวียนผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอดที่มีสารทำความเย็นเหลวอัดตัวล้อมรอบจะถูกทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิไปสู่ 0 องศาเซลเซียส

1.2 ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด คือ น้ำภายในหอทำน้ำแข็งหลอดที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสถูกทำความเย็นต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิน้ำคงที่ ในขณะเดียวกันทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งเกาะที่ผิวท่อทำน้ำแข็งหลอดเพิ่มความหนาขึ้นต่อเนื่องจนได้ความหนาน้ำแข็งหลอดตามความต้องการผลิต

ในบทความนี้ได้ประยุกต์การสร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ด้วยวิธีการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน (ธีรวัฒน์ คลับคล้าย และธีระชาติ พรพิบูลย์, 2556) ที่สร้างแบบจำลองดังกล่าวของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำย่อยแบบหลายขั้นตอนที่กระบวนการอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) มาใช้กับกระบวนการที่อยู่ในสภาวะไม่คงตัว (unsteady state) รวมทั้งการจำลองระบบทางความร้อนด้วยวิธีแทนค่าลำดับเพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความเย็นตลอดจนภาระการทำความเย็นและอัตราการระเหยของสารทำความเย็นที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาของกระบวนการดังกล่าว

2. แบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของกระบวนการทำความเย็น

2.1 แบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของหอทำน้ำแข็งหลอด

สร้างระบบควบคุมมวล ซึ่งเป็นระบบมวลคงที่ (fixed mass) สำหรับหอทำน้ำแข็งหลอด แสดงดัง Figure 1

2.1.1 ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ ทำการสร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาอุณหภูมิของน้ำภายในหอทำน้ำแข็งหลอดที่เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิน้ำป้อนสู่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาของช่วงการลดอุณหภูมิ

จาก Figure 1 แสดงหอทำน้ำแข็งหลอดโดยพิจารณาเป็นระบบและมีมวลน้ำคงที่

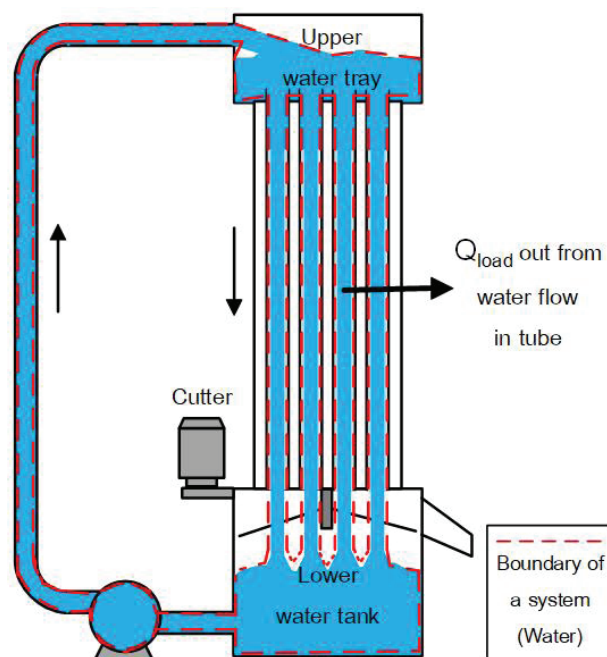


Figure 1 Control mass of water in freezer tower.

1) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ พิจารณาให้

$$E_{in} = 0$$

$$E_{out} = \dot{Q}_{Load}$$

$$\Delta E_{sys} = \frac{1}{\Delta t} (U_{w,t+\Delta t} - U_{w,t})_{sys}$$

จัดรูปสมการ แสดงดังสมการที่ (1)

$$-\dot{Q}_{Load} = \frac{1}{\Delta t} (U_{w,t+\Delta t} - U_{w,t}) \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) ภาระการทำความเย็นรวมจากท่อทำน้ำแข็งหลอดทุกท่อน ($\dot{Q}_{Load}$) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของน้ำ จึงพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในดังกล่าวในรูปอุณหภูมิ เพื่อหาอุณหภูมิน้ำทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงไปที่เกิดจากภาระการทำความเย็นดังกล่าว จัดรูปสมการที่ (1) ได้

$$T_{w,t+\Delta t} = T_{w,t} - \left(\frac{\dot{Q}_{Load} \Delta t}{m_{w,sys} c_{p,w}} \right) \quad (2)$$

2.1.2 ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ทำการสร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาภาระการ

ความเย็นที่เกิดขึ้นตลอดช่วงเวลาที่ใช้ในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดภายใต้ความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต

จาก Figure 1 แสดงการทำน้ำแข็งหลอดโดยพิจารณา น้ำและน้ำแข็งหลอดเป็นระบบ

1) สมดุลมวลจากปริมาตรควบคุม พิจารณาให้

- ไม่มีมวลน้ำที่เข้าและออกจากระบบ ทำให้มวลน้ำที่ลดลงเท่ากับมวลน้ำแข็งหลอดที่เกิดขึ้นในระบบ คือ มวลน้ำที่ลดลงในระบบเท่ากับมวลน้ำแข็งหลอดที่เกิดขึ้นในส่วนย่อย (Δm_i^j) รวมทุกท่อน เมื่อ j แทนท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อยและ n แทนจำนวนท่อส่วนย่อย

$$(m_{w,t} - m_{w,t+\Delta t}) = (m_{i,t+\Delta t} - m_{i,t}) = \sum_{j=1}^n \Delta m_i^j \quad (3)$$

2) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ พิจารณาให้

$$E_{in} = 0$$

$$E_{out} = \dot{Q}_{Load}$$

$$\Delta E_{sys} = \frac{1}{\Delta t} [(u_{w,t+\Delta t} - u_{w,t}) + (u_{i,t+\Delta t} - u_{i,t})]_{sys}$$

จัดรูปสมการ แสดงดังสมการที่ (4)

$$-\dot{Q}_{Load} = \frac{1}{\Delta t} [(u_{w,t+\Delta t} - u_{w,t}) + (u_{i,t+\Delta t} - u_{i,t})] \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) ภาระการทำความเย็นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของน้ำและน้ำแข็งหลอด จึงพิจารณาในรูปพลังงานภายในจำเพาะและมวลน้ำแข็งหลอดที่เกิดขึ้นในส่วนย่อย (Δm_i^j) รวมทุกท่อน เพื่อหาภาระการทำความเย็นรวมที่เกิดจากมวลน้ำแข็งหลอดดังกล่าว ($\dot{Q}_{Load}$) พลังงานภายในจำเพาะของน้ำและน้ำแข็งหลอดมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการ เนื่องจากภายในหอทำน้ำแข็งหลอดอยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศ จัดรูปสมการที่ (3) และ (4) ได้

$$\dot{Q}_{Load} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta m_i^j}{\Delta t} (u_w - u_i) \quad (5)$$

2.1.3 การระเหยของสารทำความเย็น

ทำการสร้างปริมาตรควบคุม สำหรับหอทำน้ำแข็งหลอด เมื่อระบบคือ สารทำความเย็นเหลวอิ่มตัวภายในหอทำน้ำแข็งหลอด แสดงดัง Figure 2

ตลอดกระบวนการทำความเย็น สมมุติฐานให้สารทำความเย็นเหลวอิ่มตัวรับความร้อนจากการทำความเย็นจนเกิดการระเหยภายใต้ความดันอิ่มตัวคงที่ จึงสร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาอัตราการระเหยของสารทำความเย็นตลอดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความเย็น

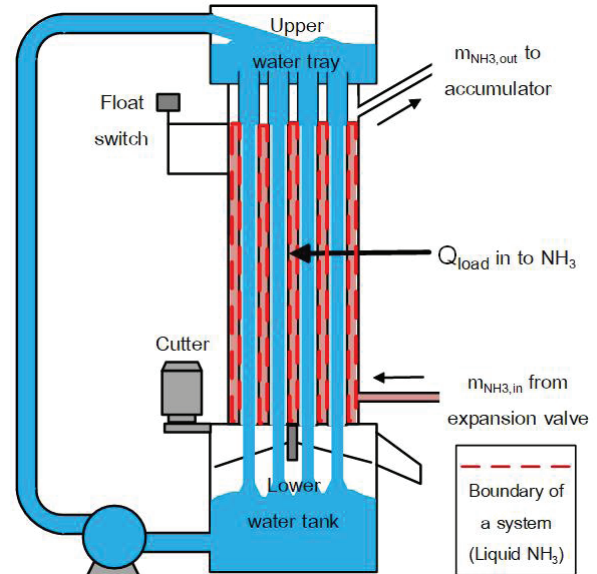


Figure 2 Control volume of saturated liquid refrigerant in a freezer tower.

1) สมดุลมวล พิจารณาให้

- สารทำความเย็นเหลวอิ่มตัวมีระดับคงที่ตลอดกระบวนการ มวลสารทำความเย็นในระบบจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

$$\dot{m}_{NH_3,in} = \dot{m}_{NH_3,out} \quad (6)$$

2) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ พิจารณาให้

$$E_{in} = (\dot{m}_{NH_3} h_{NH_3})_{in}$$

$$E_{out} = (\dot{m}_{NH_3} h_{NH_3})_{out} + \dot{Q}_{Load}$$

$$\Delta E_{sys} = 0$$

จัดรูปสมการ เพื่อหาอัตราการระเหยของสารทำความเย็น ($\dot{m}_{NH_3}$) แสดงดังสมการที่ (7)

$$\dot{m}_{NH_3} = \frac{\dot{Q}_{Load}}{(h_{NH_3,out} - h_{NH_3,in})} \quad (7)$$

2.2 แบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของท่อทำน้ำแข็งหลอด

ทำการสร้างปริมาตรควบคุมของระบบ สำหรับท่อทำน้ำแข็งหลอดที่ถูกแบ่งเป็นส่วนย่อยแต่ละท่อนแทนด้วย j และจำนวนท่อนส่วนย่อยทั้งหมดแทนด้วย n ปริมาตรควบคุมของระบบแสดงดัง Figure 3

2.2.1 ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ ทำการสร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาภาระการทำความเย็นที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาที่ใช้ในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด จากอุณหภูมิน้ำป้อนเปลี่ยนแปลงไปสู่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

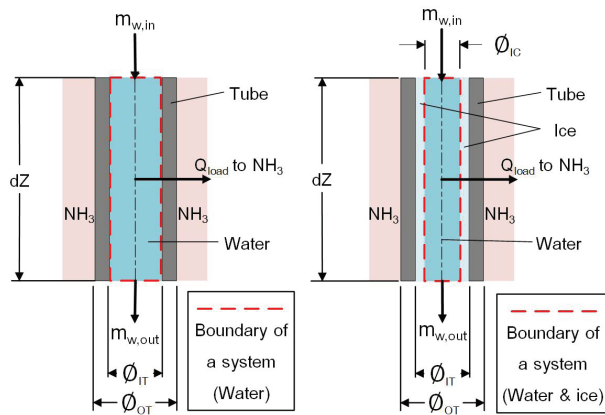


Figure 3 Control volume of a water tube (left) and ice tube (right).

จาก Figure 3 (ซ้าย) ปริมาตรควบคุมของระบบภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด เมื่อระบบคือน้ำภายในท่อนส่วนย่อยพิจารณาให้เป็นระบบเปิด เนื่องจากการถ่ายโอนมวลน้ำเข้าและออกจากระบบ

1) สมดุลมวลจากปริมาตรควบคุม พิจารณาให้ - การไหลคงตัว (steady flow) คือ มวลน้ำเข้าระบบเท่ากับออกจากระบบ ซึ่งแทนด้วย $\dot{m}_w^j$ คือ อัตราการไหลมวลน้ำของท่อนส่วนย่อย

$$\dot{m}_{w,in}^j = \dot{m}_{w,out}^j = \dot{m}_w^j \quad (8)$$

2) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ พิจารณาให้

$$\begin{aligned} E_{in} &= \dot{m}_{w,in}^j \left[h_w^j + \frac{1}{2} (v_w^j)^2 + gz_w^j \right]_{in} \\ E_{out} &= \dot{m}_{w,out}^j \left[h_w^j + \frac{1}{2} (v_w^j)^2 + gz_w^j \right]_{out} + \dot{Q}_{Load}^j \\ \Delta E_{sys} &= 0 \end{aligned}$$

จัดรูปสมการ เพื่อหาภาระการทำความเย็นของท่อนส่วนย่อย ($\dot{Q}_{Load}^j$) แสดงดังสมการที่ (9)

$$\dot{Q}_{Load}^j = \dot{m}_w^j \left[c_{p,w} (T_{w,in}^j - T_{w,out}^j) + (K P^j) \right] \quad (9)$$

2.2.2 ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ทำการสร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหามวลและความหนาของน้ำแข็งหลอดที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาที่ใช้ในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด

จาก Figure 3 (ขวา) ปริมาตรควบคุมของระบบภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด เมื่อระบบคือน้ำและน้ำแข็งหลอดภายในท่อนส่วนย่อย พิจารณาให้เป็นระบบเปิด เนื่องจากการถ่ายโอนมวลน้ำเข้าและออกจากระบบ

1) สมดุลมวลจากปริมาตรควบคุม พิจารณาให้ - การไหลไม่คงตัว (unsteady flow) คือ มวลในระบบเปลี่ยนแปลงจากผลต่างมวลน้ำเข้าและออกจากระบบ

$$\dot{m}_{w,in}^j - \dot{m}_{w,out}^j = \frac{1}{\Delta t} (m_{i,t+\Delta t}^j - m_{i,t}^j) \quad (10)$$

จัดรูปสมการที่ (10) เพื่อพิจารณารัศมีภายในของน้ำแข็งหลอด

$$r_{iC,t+\Delta t} = \sqrt{r_{iC,t}^2 - \frac{\Delta m_i^j}{\rho_i \pi dz}} \quad (11)(11)$$

จากสมการที่ (11) พิจารณาความหนาของน้ำแข็งหลอดที่เกิดขึ้นจากรัศมีพื้นผิวภายในของท่อและน้ำแข็งหลอดได้

$$\Delta r_{i,t+\Delta t} = r_{iT} - r_{iC,t+\Delta t} \quad (12)$$

2) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ พิจารณาให้

$$\begin{aligned} E_{in} &= \dot{m}_{w,in}^j \left[h_w^j + \frac{1}{2} (v_w^j)^2 + gz_w^j \right]_{in} \\ E_{out} &= \dot{m}_{w,out}^j \left[h_w^j + \frac{1}{2} (v_w^j)^2 + gz_w^j \right]_{out} + \dot{Q}_{Load}^j \\ \Delta E_{sys} &= \frac{1}{\Delta t} (U_{i,t+\Delta t}^j - U_{i,t}^j)_{sys} \end{aligned}$$

จัดรูปสมการ เพื่อหาภาระการทำความเย็นของ
ท่อบางย่อย ($\dot{Q}_{Load}^j$) แสดงดังสมการที่ (13)

$$\dot{Q}_{Load}^j = \frac{\Delta m_i^j}{\Delta t} \left[(u_w - u_i) + \frac{(v_{w,out}^j)^2}{2} \right] + \dot{m}_{w,in}^j [K P^j] \quad (13)$$

2.3 การถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำกับสาร
ทำความเย็น

การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นนี้มีพฤติกรรมเหมือน
การถ่ายโอนความร้อนในเครื่องระเหย (evaporator) (Stoecker
& Jones, 1982) คือ การถ่ายโอนความร้อนจากของไหลด้าน
ร้อนไปสู่ของไหลด้านเย็นที่มีอุณหภูมิคงที่ (constant cold fluid
temperature) ดังนั้นการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถ
พิจารณาได้จากกฎการทำความเย็นของนิวตัน (Newton's law
of cooling) โดยการใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม
(overall heat transfer coefficients) (Ozisik, 1985)

2.3.1 ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ จากกฎการ
ทำความเย็นของนิวตัน พิจารณาภาระการทำความเย็นที่เกิด
ขึ้นในท่อบางย่อย ($\dot{Q}_{Load}^j$) ได้ดังสมการที่ 14

$$\dot{Q}_{Load}^j = U d A (T_{w,avg}^j - T_{NH_3}) \quad (14)$$

จากสมการที่ (14) เมื่อความยาวท่อบางย่อยมี
ค่าน้อย (dz^j) จึงสามารถพิจารณาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ย
ของน้ำในท่อบางย่อย ($T_{w,avg}^j$) ได้

$$T_{w,avg}^j = \frac{T_{w,in}^j + T_{w,out}^j}{2} \quad (15)$$

จากภาระการทำความเย็นที่เกิดขึ้นในท่อบาง
ย่อย ($\dot{Q}_{Load}^j$) ให้สมการที่ (9) เท่ากับ (14) และแทน (15) ลงใน
สมการดังกล่าว จากนั้นจัดรูปสมการเพื่อหาอุณหภูมิน้ำที่
ออกจากท่อบางย่อย ($T_{w,out}^j$) ได้

$$T_{w,out}^j = \left[\frac{U d A}{2} \right]^{-1} \left[\dot{m}_w^j \left(C_{p,w} T_{w,in}^j + K P^j \right) - U d A \left(\frac{T_{w,in}^j}{2} - T_{NH_3} \right) \right] \quad (16)$$

จาก Figure 3 (ซ้าย) พิจารณาสัมประสิทธิ์การ
ถ่ายโอนความร้อนรวมกับพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนของน้ำที่
ถ่ายโอนความร้อนผ่านท่อไปยังสารทำความเย็น โดยพิจารณา

ความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนของน้ำ การนำ
ความร้อนของท่อทำน้ำแข็งหลอดและการพาความร้อนขณะ
เดือด (Stephan & Abdelsalam, 1980) ของสารทำความเย็น

$$U d A = \frac{1}{(R_w + R_{Tube} + R_{NH_3})} \quad (17)$$

2.3.2 ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด น้ำ
อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสจะถูกทำความเย็นต่อเนื่องภายใต้
อุณหภูมิน้ำคงที่ จึงสามารถพิจารณาค่าความแตกต่างระหว่าง
อุณหภูมิน้ำกับสารทำความเย็นอิมตัวมีค่าคงที่ตลอดช่วง
การก่อตัวของน้ำแข็งหลอด จากกฎการทำความเย็นของ
นิวตัน พิจารณาภาระการทำความเย็นของท่อทำน้ำแข็งหลอด
ส่วนย่อย ($\dot{Q}_{Load}^j$) ได้

$$\dot{Q}_{Load}^j = U d A (T_w - T_{NH_3}) \quad (18)$$

จากภาระการทำความเย็นที่เกิดขึ้นของท่อบาง
ย่อย ($\dot{Q}_{Load}^j$) ให้สมการที่ (18) เท่ากับ (13) จากนั้นจัดรูปสมการ
เพื่อหามวลน้ำแข็งหลอดที่เกิดขึ้นในท่อบางย่อย (Δm_i^j) แสดง
ดังสมการที่ (19)

$$\Delta m_i^j = \Delta t \left\{ \frac{\left[U d A (T_w - T_{NH_3}) \right] - \dot{m}_{w,in}^j (K P^j)}{\left[(u_w - u_i) + \left(\frac{(v_{w,out}^j)^2}{2} \right) \right]} \right\} \quad (19)$$

จาก Figure 3 (ขวา) พิจารณาสัมประสิทธิ์การ
ถ่ายโอนความร้อนรวมกับพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนจากน้ำ
ไปยังสารทำความเย็น พิจารณาเพียงความต้านทานความร้อน
จากการนำความร้อนผ่านน้ำแข็งหลอดและผ่านท่อ และการพา
ความร้อนขณะเดือดของสารทำความเย็น เนื่องจากความ
ต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนของน้ำที่ไหลเวียน
ไม่เกิดความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างน้ำและพื้นผิวภายใน
น้ำแข็งหลอด

$$U d A = \frac{1}{(R_i + R_{Tube} + R_{NH_3})} \quad (20)$$

โดยที่

$\dot{Q}_{Load}$ แทน ภาระการทำความเย็นรวม (kW)
 $\dot{Q}_{Load}^j$ แทน ภาระการทำความเย็นท่อบาง
ย่อย (kW)

Δt	แทน ช่วงเวลาที่พิจารณา (s)	$\dot{m}_{\text{NH}_3, \text{out}}$	แทน อัตราการไหลแอมโมเนียออกจากระบบ (kg/s)
$U_{w,t+\Delta t}$	แทน พลังงานภายในน้ำที่เวลาเปลี่ยนไป (kJ)	$h_{w, \text{in}}^j$	แทน เอนทาลปีน้ำเข้าสู่ท่อส่วนย่อย (kJ/kg)
$U_{w,t}$	แทน พลังงานภายในน้ำที่เวลาเริ่มต้น (kJ)	$h_{w, \text{out}}^j$	แทน เอนทาลปีน้ำออกจากท่อส่วนย่อย (kJ/kg)
$U_{i,t+\Delta t}$	แทน พลังงานภายในน้ำแข็งที่เวลาเปลี่ยนไป (kJ)	$h_{\text{NH}_3, \text{in}}$	แทน เอนทาลปีแอมโมเนียเข้าระบบ (kJ/kg)
$U_{i,t+\Delta t}^j$	แทน พลังงานภายในน้ำแข็งในท่อส่วนย่อยที่เวลาเปลี่ยนไป (kJ)	$h_{\text{NH}_3, \text{out}}$	แทน เอนทาลปีแอมโมเนียออกจากระบบ (kJ/kg)
$U_{i,t}$	แทน พลังงานภายในน้ำแข็งที่เวลาเริ่มต้น (kJ)	KP^j	แทน ผลรวมพลังงานจลน์และพลังงานศักย์จำเพาะของท่อส่วนย่อย (kJ/kg)
$U_{i,t}^j$	แทน พลังงานภายในน้ำแข็งในท่อส่วนย่อยที่เวลาเริ่มต้น (kJ)	$KP^j = \left(\frac{v_{w, \text{in}}^2 - v_{w, \text{out}}^2}{2} \right)^j + (gz)^j \quad (21)$	
u_w	แทน พลังงานภายในจำเพาะน้ำ (kJ/kg)		
u_i	แทน พลังงานภายในจำเพาะน้ำแข็ง (kJ/kg)	$v_{w, \text{in}}^j$	แทน ความเร็วน้ำเข้าสู่ท่อส่วนย่อย (m/s)
$u_{i,t+\Delta t}$	แทน พลังงานภายในจำเพาะน้ำแข็งที่เวลาเปลี่ยนไป (kJ/kg)	$v_{w, \text{out}}^j$	แทน ความเร็วน้ำออกจากท่อส่วนย่อย (m/s)
$u_{i,t}$	แทน พลังงานภายในจำเพาะน้ำแข็งที่เวลาเริ่มต้น (kJ/kg)	$z_{w, \text{in}}^j$	แทน ความสูงตำแหน่งเข้าสู่ท่อส่วนย่อยจากจุดอ้างอิง (m)
$C_{p,w}$	แทน ค่าความร้อนจำเพาะน้ำที่ความดันคงที่ (kJ/kg $\cdot$ °C)	$z_{w, \text{out}}^j$	แทน ความสูงตำแหน่งออกจากท่อส่วนย่อยจากจุดอ้างอิง (m)
$m_{w, \text{sys}}$	แทน มวลน้ำภายในระบบ (kg)	g	แทน แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s ²)
$\dot{m}_w$	แทน อัตราการไหลมวลน้ำ (kg/s)	j	แทน ท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อยที่พิจารณา
$\dot{m}_{w, \text{in}}^j$	แทน อัตราการไหลมวลน้ำเข้าสู่ท่อส่วนย่อย (kg/s)	n	แทน จำนวนท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อย
$\dot{m}_{w, \text{out}}^j$	แทน อัตราการไหลมวลน้ำออกจากท่อส่วนย่อย (kg/s)	U	แทน สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (kW/m ² ·°C)
$m_{i,t+\Delta t}$	แทน มวลน้ำแข็งที่เวลาเปลี่ยนไป (kg)	dA	แทน พื้นที่ถ่ายโอนความร้อนขนาดเล็ก (m ²)
$m_{i,t+\Delta t}^j$	แทน มวลน้ำแข็งที่เวลาเปลี่ยนไปในท่อส่วนย่อย (kg)	$T_{w,t+\Delta t}$	แทน อุณหภูมิน้ำที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป (°C)
$m_{i,t}$	แทน มวลน้ำแข็งที่เวลาเริ่มต้น (kg)	$T_{w,t}$	แทน อุณหภูมิน้ำที่เวลาเริ่มต้น (°C)
$m_{i,t}^j$	แทน มวลน้ำแข็งที่เวลาเริ่มต้นในท่อส่วนย่อย (kg)	$T_{w, \text{in}}^j$	แทน อุณหภูมิน้ำเข้าสู่ท่อส่วนย่อย (°C)
Δm_i^j	แทน มวลน้ำแข็งในท่อส่วนย่อย (kg)	$T_{w, \text{out}}^j$	แทน อุณหภูมิน้ำออกจากท่อส่วนย่อย (°C)
$\dot{m}_{\text{NH}_3}$	แทน อัตราการไหลแอมโมเนีย (kg/s)		
$\dot{m}_{\text{NH}_3, \text{in}}$	แทน อัตราการไหลแอมโมเนียเข้าระบบ (kg/s)		

$T_{w,avg}^j$	แทน อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยของท่อส่วนย่อย (°C)
T_w	แทน อุณหภูมิน้ำ (°C)
T_{NH_3}	แทน อุณหภูมิแอมโมเนีย (°C)
$\Delta r_{i,t+\Delta t}$	แทน ความหนาแน่นที่เวลาเปลี่ยนไป (m)
$r_{i,t+\Delta t}$	แทน รัศมีผิวภายในน้ำแข็งที่เวลาเปลี่ยนไป (m)
$r_{i,t}$	แทน รัศมีผิวภายในน้ำแข็งที่เวลาเริ่มต้น (m)
r_{IT}	แทน รัศมีผิวภายในท่อทำน้ำแข็ง (m)
r_{OT}	แทน รัศมีผิวนอกท่อทำน้ำแข็ง (m)
dz^j	แทน ความยาวท่อส่วนย่อย (m)
r_i	แทน ความหนาแน่นของน้ำแข็ง (kg/m ³)
R_w	แทน ความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนของน้ำ (°C/kW)

$$R_w = \frac{1}{2\pi r_{IT} dz \alpha_w} \quad (22)$$

R	แทน ความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนของน้ำแข็ง (°C/kW)
-----	---

$$R_i = \frac{\ln(r_{IT}/r_{i,t})}{2\pi dz k_i} \quad (23)$$

R_{Tube}	แทน ความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนของท่อทำน้ำแข็ง (°C/kW)
------------	--

$$R_{Tube} = \frac{\ln(r_{OT}/r_{IT})}{2\pi dz k_{Tube}} \quad (24)$$

R_{NH_3}	แทน ความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนระเหิดของแอมโมเนีย (°C/kW)
------------	---

$$R_{NH_3} = \frac{1}{2\pi r_{OT} dz \alpha_{NH_3}} \quad (25)$$

a_w	แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำ (kW/m ² °C)
a_{NH_3}	แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนขณะเดือดในช่วงการเกิดฟองของแอมโมเนีย (kW/m ² °C)
k_{Tube}	แทน ค่าการนำความร้อนของท่อ (kW/m °C)
k_i	แทน ค่าการนำความร้อนของน้ำแข็ง (kW/m °C)

3. การจำลองระบบทางความร้อน

3.1 การจำแนกตัวแปรในการวิเคราะห์ระบบของกระบวนการทำความเย็น

จากแบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อน ได้แก่ หอทำน้ำแข็งหลอดและท่อทำน้ำแข็งหลอด พิจารณาในช่วงการลดอุณหภูมิของน้ำและการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด จึงจำแนกตัวแปรออกเป็น 3 กลุ่มคือ ตัวแปรอิสระ ตัวแปรควบคุมและตัวแปรตาม ได้ดังนี้

1) ตัวแปรอิสระ

- ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น

2) ตัวแปรควบคุม

- ความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต
- ขนาดมิติของหอทำน้ำแข็งหลอด
- กำลังการผลิตของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด
- ค่าการนำความร้อนของท่อทำน้ำแข็งหลอด
- ค่าการนำความร้อนของน้ำแข็งหลอด
- พลังงานภายในจำเพาะของน้ำแข็งหลอด
- อุณหภูมิพื้นผิวภายในน้ำแข็งหลอดเท่ากัน

ตลอดความยาวท่อ

- อุณหภูมิพื้นผิวนอกของท่อทำน้ำแข็งหลอดเท่ากันตลอดความยาวท่อ

- น้ำไหลเต็มท่อในแนวดิ่งภายใต้ความดัน

บรรยากาศ

- ความดันอิมิตัวของสารทำความเย็นเหลวคงที่

3) ตัวแปรตาม

- ภาระการทำความเย็น
- อัตราการระเหยของสารทำความเย็น
- อุณหภูมิของน้ำ (ช่วงการลดอุณหภูมิของน้ำ)
- มวลน้ำแข็งหลอด (ช่วงก่อตัวน้ำแข็งหลอด)

- ความหนาแน่นแข็งหลอด (ช่วงก่อดัวน้ำแข็งหลอด)

3.2 ระบบสมการจากแบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของกระบวนการทำความเย็น

จากการวิเคราะห์กระบวนการทำความเย็นและสร้าง

แบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนไปสู่ระบบสมการเพื่อหาระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต ซึ่งจะนำไปสู่การทำความเย็น อัตราการระเหยของสารทำความเย็น มวลน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้ แสดงความสัมพันธ์ของระบบสมการดัง Table 1

Table 1 Equation system of the freezing process.

Process	Function	Equation	Relation
Water temperature decreasing	F1	(17)	$F1 = f(\alpha_w, \alpha_{NH_3})$
	F2	(16)	$F2 = f(F1, \dot{m}_w)$
	F3	(9)	$F3 = f(F2)$
	F4	(2)	$F4 = f(F3, T_{w,i})$
Tube ice-making	f1	(20)	$f1 = f(r_{ic,i}, \alpha_{NH_3})$
	f2	(19)	$f2 = f(f1, \dot{m}_{w,in})$
	f3	(11)	$f3 = f(f2)$
	f4	(12)	$f4 = f(f3)$
	f5	(5)	$f5 = f(f2)$
Both	f6	(7)	$f6 = f(f3, f5)$

3.3 การแก้ระบบสมการด้วยวิธีการแทนค่าลำดับ (sequential simulation)

การจำลองด้วยวิธีการแทนค่าลำดับ คือ การป้อนผลลัพธ์ของสมการก่อนหน้าเพื่อใช้คำนวณหาผลลัพธ์ของสมการถัดไป คำนวณแบบลำดับต่อเนื่องจนถึงสมการสุดท้าย จำเป็นต้องเรียงลำดับสมการที่คำนวณให้สัมพันธ์กับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในระบบ (Stoecker, 1989)

จากแบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนจำเป็นต้องทราบระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นที่นำไปสู่ตัวแปรต่างๆ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการทำความเย็น ได้แก่ ภาระการทำความเย็น อัตราการระเหยของสารทำความเย็นและความหนาแน่นน้ำแข็งหลอด จึงสร้างแผนผังและแก้ระบบสมการด้วยวิธีการแทนค่าลำดับ ดัง Figure 4

3.4 ข้อมูลสำหรับการจำลองระบบทางความร้อนของกระบวนการทำความเย็น

การจำลองระบบทางความร้อนของกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด ใช้ข้อมูลของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิตเต็มพิกัดขนาด 30 ตันต่อวัน และภายในหอทำน้ำแข็งหลอดมีท่อทำน้ำแข็งหลอดจำนวน 315 ท่อน น้ำแข็งหลอดในท่อทุกท่อนยาว 3 เมตร สำหรับการตรวจสอบความแม่นยำการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น ใช้ผลลัพธ์ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดดังกล่าว และข้อมูลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ (ภูวนาถ กาบคำ, 2547) การจำลองระบบทางความร้อนใช้ข้อมูลดัง Table 2

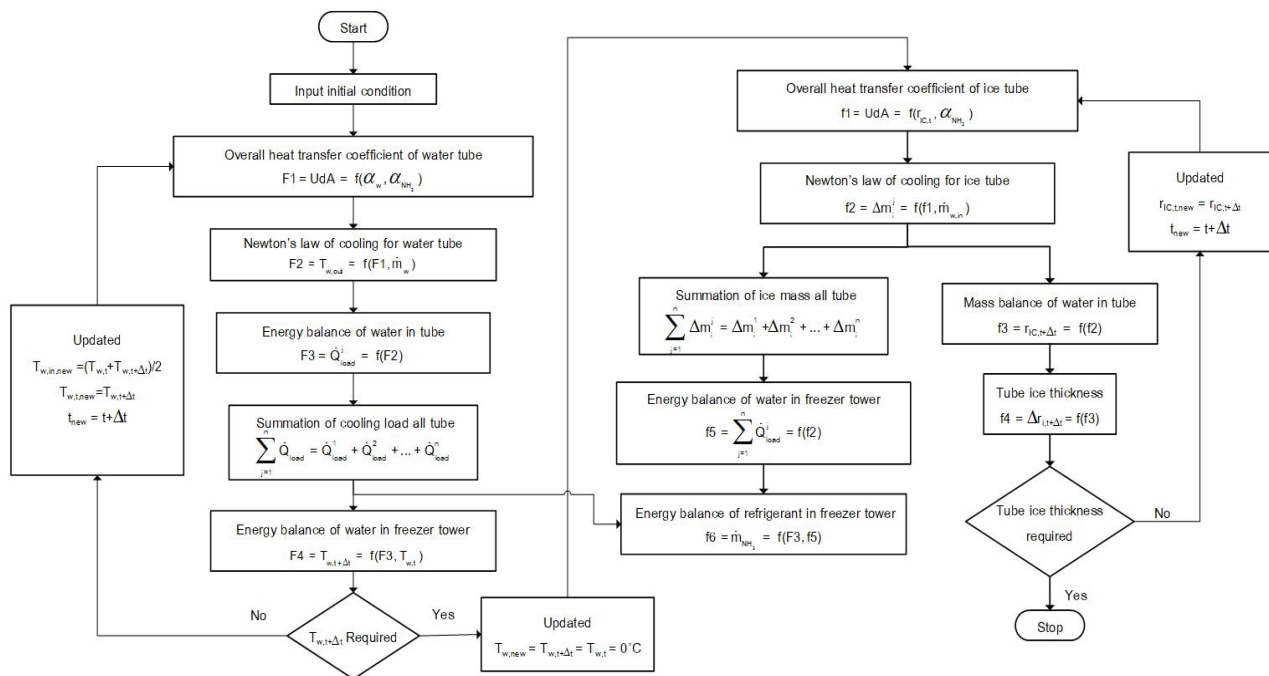


Figure 4 Flow diagram of sequential simulation in the freezing process.

ผลการศึกษา

1. ผลอุณหภูมิน้ำและความหนาน้ำแข็งตลอดระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นจากการจำลอง

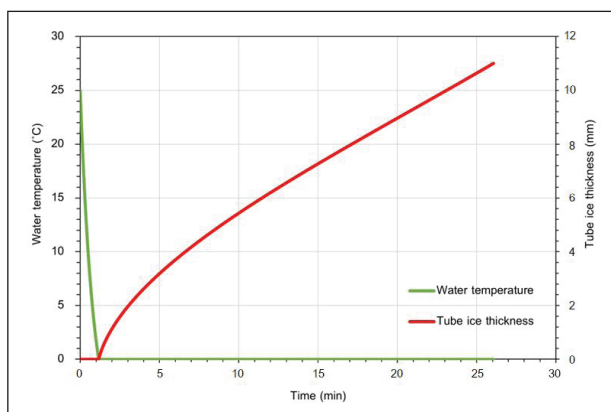


Figure 5 Water temperature and tube ice thickness throughout the freezing process.

2. ผลภาระการทำความเย็นและความหนาน้ำแข็งตลอดระยะเวลากระบวนการทำความเย็นจากการจำลอง

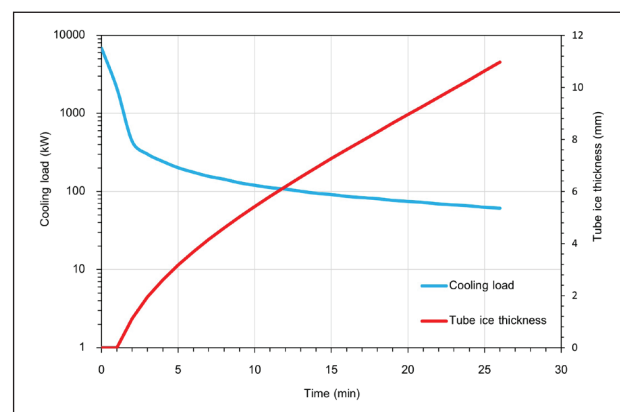


Figure 6 Cooling load and tube ice thickness throughout the freezing process.

3. ผลภาระการทำความเย็นและอัตราการระเหยของสารทำความเย็นตลอดระยะเวลากระบวนการทำความเย็นจากการจำลอง

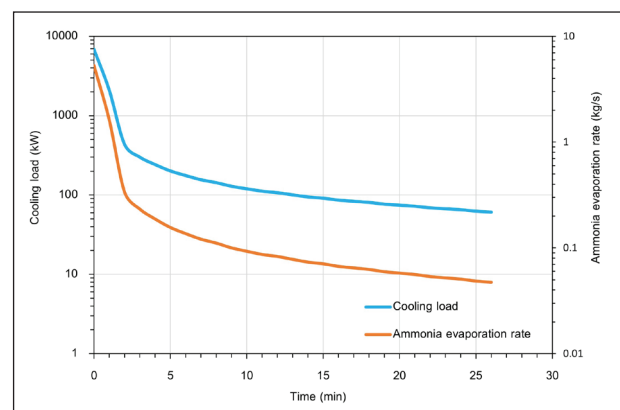


Figure 7 Cooling load and ammonia evaporation rate throughout the freezing process.

Table 2 Data for simulation in freezing process.

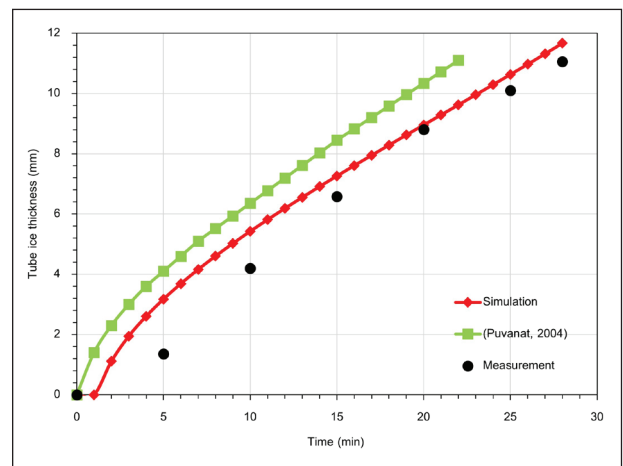
Variable	Value	Unit
Inner diameter of tube	35	mm
Outer diameter of tube	41	mm
Tube discretize quantity	9450	tube
Length tube discretize	10	cm
Ice density	910	kg/m ³
Ice thermal conductivity	2.214	W/m °C
Tube thermal conductivity	15.09	W/m °C
Ammonia saturated temperature	-8	°C
Ice thickness required	11	mm
Feed water volume	2.5	m ³
Initial condition		
Feed water temperature	25	°C

วิจารณ์และสรุปผล

จาก Figure 5 และ 6 จะเห็นว่า ในช่วงนาที่แรกของกระบวนการทำความเย็นไม่เกิดน้ำแข็งหลุดขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงการลดอุณหภูมิ น้ำ เมื่อน้ำเข้าสู่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความหนาของน้ำแข็งหลุดเพิ่มขึ้นตามเวลาอย่างรวดเร็ว จากนั้นเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลงในช่วงท้ายของกระบวนการทำความเย็น เป็นผลมาจากความต้านทานความร้อนของน้ำแข็งหลุด ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำไปยังสารทำความเย็นได้ยากขึ้น ทำให้น้ำแข็งก่อตัวได้ในอัตราที่ช้าลง

จาก Figure 7 จะเห็นว่า ภาระการทำความเย็นและอัตราการระเหยของสารทำความเย็นเกิดขึ้นสูงสุด ณ เวลาเริ่มต้นในช่วงการลดอุณหภูมิของกระบวนการทำความเย็นซึ่งลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและช้าลงในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลุด เนื่องจากในช่วงแรกความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำกับสารทำความเย็นเหลืออ้อมตัวมีค่าสูงจากนั้นลดลงอย่างรวดเร็ว และต่อมาช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลุดเกิดความต้านทานความร้อนจากความหนาของน้ำแข็งหลุดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลให้ถ่ายโอนความร้อนจากน้ำไปยังสารทำความเย็นได้ยากขึ้น

นำข้อมูลความหนาของน้ำแข็งหลุดจากผลการจำลองใน Figure 5 มาเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดความหนาของน้ำแข็งหลุดทุกช่วงเวลา 5 นาทีและผลจากแบบจำลองของ (ภูวนาท กาบคำ, 2547) แสดงดัง Figure 8

**Figure 8** Tube ice thickness comparison between measurement and simulation.

นำข้อมูลความหนาของน้ำแข็งหลุดจากการจำลองและผลจากแบบจำลองของ (ภูวนาท กาบคำ, 2547) มาเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดความหนาของน้ำแข็งหลุดที่เครื่องทำน้ำแข็งหลุดทุกช่วงเวลา 5 นาทีจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทำความเย็น เพื่อหาความคลาดเคลื่อน แสดงดัง Table 3

Table 3 Comparison tube ice thickness error between measurement and simulation.

Time (min)	Error (%)	
	(Puvanat, 2004)	Simulation
0	0	0
5	201.47	133.48
10	51.34	29.18
15	28.42	10.37
20	17.53	1.78
25	-	5.26
28	-	5.51

จาก Table 3 จะเห็นว่า เมื่อกระบวนการทำความเย็นผ่านไป 5 นาที ผลจากการจำลองมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดถึง 133.48% และลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากการจำลองระบบนี้มีสมมุติฐานให้สารทำความเย็นรับความร้อนภายใต้ความดันและอุณหภูมิคงที่ตลอดกระบวนการ แต่กระบวนการจริงความดันของสารทำความเย็นมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากช่วงแรกของกระบวนการทำความเย็นมีภาระการทำความเย็นสูงทำให้เกิดอัตราการระเหยของสารทำความเย็นสูงตามไปด้วย ซึ่งสมมุติฐานว่าอัตราการระเหยของสารทำความเย็นสูงกว่าอัตราการดูดซับทำความเย็นของเครื่องอัดไอที่มีอัตราการดูดซับที่ ส่งผลให้สารทำความเย็นสถานะไอที่ถูกดูดซับกลับมีปริมาตรจำเพาะลดลงและมีความดันสูงขึ้น เพื่อให้เข้าสู่ภาวะสมดุลสารทำความเย็นเหลวจึงมีความดันสูงขึ้น ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารทำความเย็นเหลวและน้ำมีค่าลดลงจนเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ยากขึ้น การก่อตัวของน้ำแข็งหลุดจากกระบวนการจริงจึงช้ากว่าผลจากการจำลอง เพราะฉะนั้นแล้วผลลัพธ์จากการศึกษาวิจัยนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดอัตราการดูดซับทำความเย็นของเครื่องอัดไอที่สามารถควบคุมสภาวะของสารทำความเย็นให้เหมาะสมกับเครื่องทำน้ำแข็งหลอดต่อไป

จาก Figure 8 จะเห็นว่า น้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้มีความหนา 11 มิลลิเมตร เครื่องทำน้ำแข็งหลอดใช้เวลาผลิตจริง 28 นาที ขณะที่ผลการจำลองนี้ได้ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นเป็น 26 นาที 15 วินาที เกิดความคลาดเคลื่อน 6.25% ซึ่งแม่นยำขึ้น 15.18% จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ (ภูวนาท กาบคำ, 2547) ที่ได้ระยะเวลา 22 นาที เกิดความคลาดเคลื่อน 21.43% เมื่อเทียบกับเวลาผลิตจริงจากการตรวจวัด เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวขาดการพิจารณา การลดอุณหภูมิน้ำภายในหอทำน้ำแข็งหลุดจากอุณหภูมิน้ำป้อนไปสู่อุณหภูมิน้ำพร้อม

แข็งตัวรวมถึงพลังงานที่อยู่ในมวลน้ำขณะเกิดการไหลในท่อทำน้ำแข็ง โดยเฉพาะในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำที่เกิดภาระการทำความเย็นสูงสุดขึ้น ด้วยเหตุนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวจึงไม่สามารถใช้ประเมินอัตราการระเหยของสารทำความเย็นที่นำไปสู่การกำหนดอัตราการดูดซับทำความเย็นของเครื่องอัดไอที่เหมาะสมกับเครื่องทำน้ำแข็งหลอดได้

เอกสารอ้างอิง

- ณัฐดนัย พรรณเจริญวงศ์, จัตรชัย เบญจปิยะพร, รพีพัฒน์ ลาดศรีทา, & สุกัญญา ทองโยธี. (2556). การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการแข็งตัวของน้ำแข็งหลอด. *The Journal of Industrial Technology*, 9(3), 63-80.
- ธีรวัฒน์ คลับคล้าย, & ธีระชาติ พรพิบูลย์. (2556). แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาล. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 32(5), 606-616.
- ภูวนาท กาบคำ. (2547). *การศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งหลอด*. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR). <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/1515>
- Ozisik, M. N. (1985). *Heat transfer: A basic approach*. McGraw-Hill.
- Pannucharoenwong, N., Benjapiyaporn, C. Theerakulpisut, S., Saeng-Uthai, S., Benjapiyaporn, J. & Promteerawong, P. (2016). 50 Ton tubular ice factory production optimization. *Engineering and Applied Science Research*, 43, 180-182.

- Stephan, K., & Abdelsalam, M. (1980). Heat-transfer correlations for natural convection boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 23(1), 73-87.
- Stoecker, W. F. (1989). *Design of thermal systems* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Stoecker, W. F., & Jones, J. W. (1982). *Refrigeration and air conditioning*. McGraw-Hill.
- Tangthieng, C. (2011). Effect of tube diameter on the specific energy consumption of the ice making process. *Applied Thermal Engineering*, 31(5), 701-707.
- Thongdee, A. & Chinsuwan A. (2019). An optimization of the components and operating conditions of a pre-cooling system for tubular ice making machines. *Energy Procedia*, 157, 602-610.