

การศึกษาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ในกระบวนการทำความเย็น
สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

A STUDY THERMODYNAMIC MODEL IN FREEZING PROCESS
OF TUBE ICE PRODUCTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การศึกษาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ในกระบวนการทำความเย็น
สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ คลับคล้าย)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนาจ)

กรรมการ



(ผศ. ดร.วิฑูรย์ เข้มสุวรรณ)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักษกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

รักษาการแทนคณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กมลวิสิทธิ์ พันวอ : การศึกษาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ในกระบวนการ
ทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด (A STUDY THERMODYNAMIC
MODEL IN FREEZING PROCESS OF TUBE ICE PRODUCTION)

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์, 204 หน้า.

คำสำคัญ: แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์/กระบวนการทำความเย็น/การผลิตน้ำแข็งหลอด

การศึกษานี้ทำการสร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด เพื่อใช้วิเคราะห์การทำความเย็นภายใต้ระยะเวลากระบวนการทำความเย็น เนื่องจากปัจจุบันไม่มีการศึกษาวิจัยการทำความเย็นดังกล่าวอย่างจริงจังและขาดการพิจารณาการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิน้ำป้อนที่ส่งผลต่อกระบวนการทำความเย็น จึงทำการจำลองระบบด้วยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง โดยการจำลองแบ่งเป็น 2 ช่วงตามลักษณะการถ่ายโอนความร้อนคือ ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ผลลัพธ์การศึกษานี้ทำให้ทราบระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิตและภาระการทำความเย็นตลอดกระบวนการ ทำให้ทราบถึงอัตราการระเหยสารทำความเย็นซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดอัตราการดูดของเครื่องอัดไอที่เหมาะสมยิ่งไปกว่านั้นการศึกษานี้ยังช่วยทำนายระยะเวลาการทำความเย็นภายใต้ความหนาน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต ทำให้สามารถกำหนดระยะเวลาการทำความเย็นที่เหมาะสมต่อการประหยัดพลังงานได้

ผลลัพธ์ความหนาน้ำแข็งหลอดจากการจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดในอดีตภายใต้เงื่อนไขการทำความเย็นเดียวกันพบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันอย่างน่าพึงพอใจ บ่งชี้ว่าการจำลองนี้ทำนายระยะเวลาการทำความเย็นได้ใกล้เคียงสภาวะจริง การจำลองในกรณีศึกษาพบว่าภาระการทำความเย็นเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการและมีค่าสูงสุดในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำเป็นผลจากอุณหภูมิน้ำป้อน ภาระการทำความเย็นนี้ทำให้ทราบอัตราการระเหยสารทำความเย็นซึ่งใช้จำลองหาสภาวะสารทำความเย็นในด้านดูดของเครื่องอัดไอพบว่า ทำนายพฤติกรรมความดันสารทำความเย็นด้านดูดได้แม่นยำสอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัดในกรณีศึกษา สะท้อนสู่ความเป็นไปได้ของแนวทางการกำหนดอัตราการดูดที่เหมาะสมกับอัตราการระเหยสารทำความเย็น และจากการจัดการระยะเวลาการทำความเย็นในกรณีศึกษา โดยให้รอบผลิตที่ 2 เป็นต้นไปผลิตน้ำแข็งหลอดหนาเท่ากับรอบผลิตที่ 1 ซึ่งมีความหนาน้อยที่สุดและคงลักษณะที่ต้องการพบว่า ระยะเวลาและค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง 26.35% สรุปได้ว่า วิธีการที่นำเสนอในการศึกษานี้เป็นเครื่องมือที่สามารถกำหนดอัตราการดูดของเครื่องอัดไอและกำหนดระยะเวลาการทำความเย็นที่เหมาะสมต่อความหนาน้ำแข็งหลอดที่ต้องการภายใต้สภาวะการผลิตได้ ซึ่งทำให้การผลิตน้ำแข็งหลอดใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ



สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา นพรัตน์ พิเศษ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ธีระพงษ์ นพคุณ

KAMONWISIT PHANWOR : A STUDY THERMODYNAMIC MODEL IN FREEZING
PROCESS OF TUBE ICE PRODUCTION.

THESIS ADVISOR : TEERACHART PORNPIBUL, Ph.D., 204 PP.

Keyword: Thermodynamic model/Freezing process/Tube ice production

This research study creates a thermodynamic model based on the mass balance and energy balance of the freezing process in tube ice production. To analyze the cooling load under the freezing process time because present there is no serious study of such cooling loads and no consideration of deviations in feed water temperature that affect the freezing process. Therefore, applying the successive substituting method used for the system simulation which is divided into 2 periods according to the heat transfer characteristics: Water temperature decreasing and tube ice-making. The results of this research study reveal the freezing process time under the desired tube ice thickness to be produced and the cooling load throughout the freezing process. This gives an idea of the refrigerant evaporation rate, which is an important factor in determining the suitable suction volumetric rate of the compressor. Moreover, the prediction of the freezing time under the desired tube ice thickness to be produced makes it possible to determine the suitable freezing time to save energy.

The tube ice thickness results from the simulation were compared with historical measurement data under the same produced conditions satisfactorily trending in the same direction. It indicates that the simulation can predict the freezing time under the required tube ice thickness to be produced close to the actual condition. From the simulation in the case study, it was found that the cooling load changes throughout the process and is highest during water temperature decreases as a result of the feed water temperature. This cooling load allows the refrigerant evaporation rate to be known for use in simulating the condition of the refrigerant in the suction side of the vapor compressor. It was found that the refrigerant pressure behavior at the suction side can be accurately predicted compared to the measurement data of the case study, showing the feasibility of the method for determining the suitable volumetric suction rate with the refrigerant

evaporation rate. From the decreasing cooling time in the case study for production cycle 2 onwards under the same tube ice thickness as production cycle 1, which had the least thickness and the tube ice characteristics were still as desired, it was found that the freezing time and electrical energy costs were reduced by 26.35%. In conclusion, the method presented in this study can determine the suitable compressor volumetric suction rate and is a tool for determining the freezing time according to the thickness. required tube ice under production conditions this tube ice production is then energy efficient.



School of Mechanical Engineering
Academic year 2023

Student's Signature.....Kamonwisit Phannor
Advisor's Signature.....Tasachai Pompikul

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับโอกาสและความเมตตากรุณาเป็นอย่างสูงจากอาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย ตลอดจนการอบรมสั่งสอนในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริง ความทุ่มเทและความเสียสละของอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท พรพิบูลย์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับดำเนินการวิจัยรวมถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดอย่างละเอียด

ขอขอบพระคุณ คุณธงชัย คชวรงค์ และพี่ ๆ ทุกคนที่กรุณาให้คำปรึกษาและถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับการใช้โปรแกรม MATLAB ในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ ผอ.เพื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจมาโดยตลอด และเป็นแรงผลักดันที่สำคัญให้แก่ผู้วิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

กมลวิสิทธิ์ พันวอ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	ก
Abstract.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 น้ำแข็งหลอด	4
2.2 กระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด	5
2.2.1 กระบวนการเติมน้ำ	5
2.2.2 กระบวนการทำความเย็น.....	9
2.2.3 กระบวนการละลายน้ำแข็ง	11
2.2.4 กระบวนการตัดน้ำแข็ง	12
2.3 การทำงานของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดและหลักการทำงานของอุปกรณ์	13
2.3.1 ชุดหอน้ำน้ำแข็งหลอด	13
2.3.2 แอคคิวมูเลเตอร์.....	15
2.3.3 ชุดเครื่องอัดไอ	15
2.3.4 ชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบควบแน่นระบบระบายความร้อน ด้วยน้ำ.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5	ถังพักเก็บสารทำความเย็น 18
2.3.6	ชุดวาล์วลดความดัน 20
2.3.7	ชุดวาล์วลดความดัน 20
2.4	เครื่องระเหย..... 21
2.4.1	แบบจำลองเครื่องระเหย..... 21
2.4.2	การถ่ายโอนความร้อนในเครื่องระเหย 23
2.5	แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์..... 31
2.5.1	กฎการอนุรักษ์มวล 32
2.5.2	กฎการอนุรักษ์พลังงาน..... 33
2.6	สมการโมเมนตัมเชิงเส้น 37
2.6.1	ปริมาตรควบคุมคงรูปและไม่มีการเคลื่อนที่ 38
2.6.2	ปริมาตรควบคุมคงรูปและมีการเคลื่อนที่ 39
2.7	ปริทัศน์วรรณกรรม 40
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย..... 45
3.1	กระบวนการทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด..... 45
3.1.1	ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ 45
3.1.2	ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด..... 45
3.2	แบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของกระบวนการทำความเย็น 46
3.2.1	แบบจำลองของหอทำน้ำแข็งหลอดด้านน้ำ 46
3.2.2	แบบจำลองของถังน้ำด้านล่าง 49
3.2.3	แบบจำลองของท่อทำน้ำแข็งหลอด 52
3.2.4	การถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำกับสารทำความเย็น..... 56
3.2.5	แบบจำลองของหอทำน้ำแข็งหลอดด้านสารทำความเย็น 59
3.2.6	แบบจำลองของเครื่องอัดไอชนิดลูกสูบ 65
3.3	การจำลองระบบทางความร้อน 68
3.3.1	การจำแนกตัวแปรในการวิเคราะห์..... 68

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2	ระบบสมการจากแบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของกระบวนการ ทำความเย็น	69
3.3.3	ระบบสมการจากแบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของกระบวนการ ทำความเย็น	74
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลของการศึกษาวิจัย.....		77
4.1	การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองระบบโดยใช้แบบจำลอง ทางอุณหพลศาสตร์.....	77
4.2	การวิเคราะห์การจำลองระบบโดยใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์.....	79
4.2.1	การวิเคราะห์ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น.....	79
4.2.2	การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิและความหนาของน้ำแข็งหลอดใน กระบวนการทำความเย็น.....	80
4.2.3	การวิเคราะห์ผลการทำความเย็นในกระบวนการทำความเย็น	82
4.2.4	การวิเคราะห์ผลอัตราการระเหยสารทำความเย็นในกระบวนการ ทำความเย็น	84
4.3	การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่ป้อนต่อกระบวนการทำความเย็น	86
4.3.1	การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่ป้อนต่อระยะเวลาของกระบวนการ ทำความเย็น	86
4.3.2	การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่ป้อนต่อผลการทำความเย็นของ กระบวนการทำความเย็น.....	87
4.3.3	การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่ป้อนต่ออัตราการระเหยสารทำความเย็น ของกระบวนการทำความเย็น	88
4.4	การวิเคราะห์ผลอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอ.....	90
4.4.1	การตรวจสอบความถูกต้องของแนวทางการกำหนดอัตราการดูดของ เครื่องอัดไอ.....	90
4.4.2	การวิเคราะห์ผลอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอ	92
4.4.3	การวิเคราะห์ผลความดันสารทำความเย็นในด้านดูดของเครื่องอัดไอ	93

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.4 การวิเคราะห์ผลอุณหภูมิของสารทำความเย็นในด้านดูดของเครื่องอัดไอ	95
บทที่ 5 การจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นเพื่อการประหยัดพลังงาน	98
5.1 อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าของโรงงาน	98
5.2 กรณีศึกษาการจัดการระยะเวลากระบวนการทำความเย็นที่สะท้อนสู่การใช้พลังงานในกระบวนการทำความเย็น	99
5.3 กรณีศึกษาการประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าจากการจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น.....	100
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาวิจัย.....	103
6.1 สรุปผลการวิเคราะห์ภาระการทำความเย็นโดยใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ ...	103
6.2 สรุปผลการจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นเพื่อการประหยัดพลังงาน	104
6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคต	104
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก ก. ข้อมูลเครื่องทำน้ำแข็งหลอดในกรณีศึกษาและตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุและสารที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด.....	107
ภาคผนวก ข. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขณะเดือดช่วงการเกิดฟองของแอมโมเนีย.....	123
ภาคผนวก ค. เงื่อนไขในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดข้อมูลการตรวจวัดความดันสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอและการวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองของเครื่องอัดไอในกรณีศึกษา	131
ภาคผนวก ง. ผลลัพธ์จากการจำลองกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด สำหรับกรณีศึกษา.....	147
ภาคผนวก จ. การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด สำหรับกรณีศึกษา.....	190
ภาคผนวก ฉ. โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	193
ประวัติผู้เขียน.....	204

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ..... 70
3.2	ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด 72
5.1	อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้ (TOU)..... 98
5.2	อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า จำนวนรอบการผลิตและกิโลวัตต์ชั่วโมงที่ลดลง..... 101
ก.1.1	ข้อมูลเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 ตันต่อวัน..... 109
ก.1.2	ข้อมูลเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 80 ตันต่อวัน..... 110
ก.1.3	ข้อมูลเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตันต่อวัน 111
ค.1.1	เงื่อนไขกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด รอบการผลิตที่ 1..... 132
ค.1.2	เงื่อนไขกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด รอบการผลิตที่ 2..... 132
ค.2.1	ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็น ของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 133
ค.2.2	ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็น ของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 139
ง.1.1	ผลลัพธ์ความเร็วและผลรวมพลังงานจลน์จำเพาะกับพลังงานศักย์จำเพาะ ตลอดความยาวของท่อ 3.2 เมตร เมื่อแบ่งท่อเป็นส่วนย่อย 30 ท่อน เรียงจากบนลงล่าง เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน 148
ง.1.2	ผลลัพธ์ความเร็วและผลรวมพลังงานจลน์จำเพาะกับพลังงานศักย์จำเพาะ ตลอดความยาวของท่อ 3.3 เมตร เมื่อแบ่งท่อเป็นส่วนย่อย 30 ท่อน เรียงจากบนลงล่าง เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน 150
ง.1.3	ผลลัพธ์ความเร็วและผลรวมพลังงานจลน์จำเพาะกับพลังงานศักย์จำเพาะ ตลอดความยาวของท่อ 3.2 เมตร เมื่อแบ่งท่อเป็นส่วนย่อย 30 ท่อน เรียงจากบนลงล่าง เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน..... 152
ง.1.4	ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษา เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 154

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.1.5 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษา เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1.....	160
ง.1.6 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษา เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1.....	166
ง.1.7 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษา เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2.....	172
ง.1.8 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษา เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2.....	178
ง.1.9 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษา เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2.....	184
จ.1.1 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด ในกรณีศึกษา.....	191

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างมิติขนาดน้ำแข็งหลอดใหญ่.....	4
2.2 ตัวอย่างขั้นตอนการเตรียมน้ำสะอาดสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็ง.....	5
2.3 เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งติดตั้งใกล้กับบริเวณแหล่งน้ำธรรมชาติ.....	6
2.4 บ่อพักตกตะกอน.....	7
2.5 เครื่องสูบน้ำบ่อพักตกตะกอน.....	7
2.6 ถังกรองทรายและคาร์บอน.....	8
2.7 บ่อพักน้ำสะอาด.....	8
2.8 แผนภาพของชุดหอทำน้ำแข็งหลอด.....	9
2.9 น้ำแข็งหลอดในท่อทำน้ำแข็งหลอด.....	10
2.10 แผนภาพเครื่องทำน้ำแข็งหลอด.....	13
2.11 หอทำน้ำแข็งหลอด.....	14
2.12 แอคคิวมูลเตออร์.....	15
2.13 แผนภาพชุดเครื่องอัดไอ.....	16
2.14 เครื่องอัดไอและเครื่องแยกน้ำมันหล่อลื่นอัดไอ.....	17
2.15 แผนภาพชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบควบแน่นระบายความร้อนด้วยน้ำ.....	17
2.16 ชุดเครื่องควบแน่นระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ.....	18
2.17 แผนภาพถังพักเก็บสารทำความเย็นความดันสูง.....	19
2.18 ถังพักเก็บสารทำความเย็น.....	19
2.19 ชุดวาล์วลดความดัน.....	20
2.20 ถังบรรจุสารทำความเย็นแอมโมเนีย.....	21
2.21 การแจกแจงอุณหภูมิในเครื่องระเหย.....	22
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิกับทิศทางการถ่ายโอนความร้อน ภายใต้การนำความร้อน 1 มิติในระบบพิกัดฉาก.....	25
2.23 ความสัมพันธ์ของความร้อนต่อหน่วยพื้นที่กับค่าความแตกต่างอุณหภูมิการเดือดในอ่าง.....	29
2.24 ปริมาตรควบคุมสำหรับระบบเปิด.....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 การถ่ายเทพลังงานของระบบปิดและสิ่งแวดล้อม	34
2.26 การถ่ายเทพลังงานของระบบเปิดและสิ่งแวดล้อม	35
2.27 ปริมาตรควบคุมของระบบเปิดเพื่อพิจารณากฎข้อที่ 2 ของนิวตัน	37
3.1 ระบบควบคุมมวลน้ำภายในหอทำน้ำแข็งหลอด	46
3.2 ปริมาตรควบคุมน้ำภายในถังน้ำด้านล่างในหอทำน้ำแข็งหลอด	50
3.3 ปริมาตรควบคุมน้ำภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด	52
3.4 ปริมาตรควบคุมน้ำสำหรับการสมดุลแรงภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อย	55
3.5 ปริมาตรควบคุมสารทำความเย็นเหลวอิมิตัวภายในหอทำน้ำแข็งหลอด	60
3.6 ปริมาตรควบคุมสารทำความเย็นสถานะไอภายในหอทำน้ำแข็งหลอด และแอกคิวมูเลเตอร์	61
3.7 ปริมาตรควบคุมสารทำความเย็นรวมภายในหอทำน้ำแข็งหลอดและแอกคิวมูเลเตอร์	63
3.8 แผนภาพความสัมพันธ์ของระบบสมการในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ ด้วยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง	75
3.9 แผนภาพความสัมพันธ์ของระบบสมการในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ด้วยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง	76
4.1 การเปรียบเทียบความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดตลอดกระบวนการทำความเย็น	78
4.2 ระยะเวลาในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด รอบการผลิตที่ 1	79
4.3 ระยะเวลาในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด รอบการผลิตที่ 2	80
4.4 อุณหภูมิและความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดตลอดกระบวนการทำความเย็น รอบการผลิตที่ 1	81
4.5 อุณหภูมิและความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดตลอดกระบวนการทำความเย็น รอบการผลิตที่ 2	81
4.6 ภาระการทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1	83
4.7 ภาระการทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 อัตราการระเหยสารทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1	84
4.9 อัตราการระเหยสารทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2	85
4.10 ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นที่อุณหภูมิน้ำป้อนค่าต่าง ๆ	87
4.11 ภาระการทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นที่อุณหภูมิน้ำป้อนค่าต่าง ๆ	88
4.12 อัตราการระเหยสารทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็น ที่อุณหภูมิน้ำป้อนค่าต่างๆ	89
4.13 ความดันของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็น เปรียบเทียบกับความดันด้านดูดจากการตรวจวัด รอบการผลิตที่ 1	90
4.14 ความดันของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็น เปรียบเทียบกับความดันด้านดูดจากการตรวจวัด รอบการผลิตที่ 2	91
4.15 อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวลของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็น รอบการผลิตที่ 1	92
4.16 อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวลของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็น รอบการผลิตที่ 2	93
4.17 ความดันของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็น รอบการผลิตที่ 1	94
4.18 ความดันของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็น รอบการผลิตที่ 2	95
4.19 อุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็น รอบการผลิตที่ 1	96
4.20 อุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็น รอบการผลิตที่ 2	96
5.1 ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นจากการจัดการกระบวนการทำความเย็น	99
5.2 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงจากการจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น	101
ก.1.1 ขนาดพิกัดเครื่องทำน้ำแข็งหลอดในกรณีศึกษา	108
ค.3.1 กราฟสมรรถนะของเครื่องอัดไอในกรณีศึกษา เครื่องทำน้ำแข็งหลอด 100 ตันต่อวัน	145

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่ (m^2)
c_p	=	ค่าความจุความร้อน ณ ความดันคงที่ ($kJ/kg^\circ C$)
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟอง (m)
dA	=	พื้นที่ส่วนย่อย (m^2)
dz	=	ความยาวส่วนย่อย (m)
F	=	แรง (N)
g	=	ความโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
h	=	เอนทาลปีจำเพาะ (kJ/kg)
KE	=	พลังงานจลน์ (kJ)
KP^j	=	ผลรวมของพลังงานจลน์จำเพาะและพลังงานศักย์จำเพาะ (kJ/kg)
k	=	ค่าการนำความร้อน ($kW/m^\circ C$)
m	=	มวล (kg)
\dot{m}	=	อัตราการไหลโดยมวล (kg/s)
\hat{n}	=	เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวควบคุม
P	=	ความดัน (kPa)
PE	=	พลังงานศักย์ (kJ)
Q_{Load}	=	ปริมาณความร้อน (kJ)
\dot{Q}_{Load}	=	ภาระการทำความเย็น (kW)
R	=	ความต้านทานความร้อน ($^\circ C /kW$)
r	=	รัศมี (m)
T	=	อุณหภูมิ ($^\circ C$)
u	=	พลังงานภายในจำเพาะ (kJ/kg)
U	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม ($kW/m^2^\circ C$)
W	=	งาน (kW)
x	=	ค่าคุณภาพ
ΔP	=	ความแตกต่างของความดัน (kPa)
ΔU	=	การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน (kJ)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

V	=	ปริมาตร (m^3)
\dot{V}	=	อัตราการไหลโดยปริมาตร (m^3/s)
v	=	ปริมาตรจำเพาะ (m^3/kg)
α	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($kW/m^2\text{ }^\circ C$)
ρ	=	ค่าความหนาแน่น (kg/m^3)
σ	=	แรงตึงผิว (N/m)
β	=	ค่ามุมสัมผัสของพองกับผนังท่อ (degree)
Nu	=	ค่านี้สเสล์ต
Pr	=	ค่าพรันด์เทิล
Re	=	ค่าเรย์โนลด์
μ	=	ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Ns/m^2)
ν	=	ค่าความหนืดจลน์ (m^2/s)

สัญลักษณ์ตัวยกและตัวห้อย

c	=	ของไหลด้านเย็น
f	=	สถานะของเหลวอิ่มตัว
g	=	สถานะไออิ่มตัว
h	=	ของไหลด้านร้อน
i	=	น้ำแข็ง
j	=	ลำดับท่อส่วนย่อยที่พิจารณา
n	=	จำนวนท่อส่วนย่อยภายในหอทำน้ำแข็งหลอด
t	=	เวลาเริ่มต้น
w	=	น้ำ
X	=	ทิศทางแกน x
in	=	ขาเข้า
out	=	ขาออก
nb	=	การเดือดช่วงการเกิดพอง
OT	=	พื้นผิวภายนอกของท่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

IT	=	พื้นผิวภายในของท่อ
OC	=	พื้นผิวภายนอกของน้ำแข็งหลอด
IC	=	พื้นผิวภายในของน้ำแข็งหลอด
RE	=	สัมพัทธ์
NH ₃	=	แอมโมเนีย
t + Δt	=	เวลาเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ Δt (s)
Sat	=	สถานะอิ่มตัวทางอุณหพลศาสตร์
Suct	=	ด้านดูดของเครื่องอัดไอ
Disc	=	ด้านจ่ายของเครื่องอัดไอ
evap	=	ด้านระเหย



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

กระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด 1 รอบการผลิตมี 4 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการเติมน้ำสะอาด กระบวนการทำความเย็น กระบวนการละลายน้ำแข็งและกระบวนการตัดน้ำแข็ง ตามลำดับ โดยกระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดทำงานตามหลักการของวัฏจักรอัดไอ ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น ซึ่งกระบวนการทำความเย็นมีส่วนการใช้ระยะเวลาในกระบวนการและพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดจากทั้ง 4 กระบวนการอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อ 1 รอบการผลิต ซีระชาติ (2560) กระบวนการทำความเย็นที่หอทำน้ำแข็งหลอด จะควบคุมระดับสารทำความเย็นของเหลวอิ่มตัวให้คงที่ตลอดกระบวนการภายใต้สภาวะความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่ยวกันสารทำความเย็นเหล่านั้นจะทำความเย็นให้กับน้ำสะอาดที่ไหลเวียนภายในหอทำน้ำแข็งหลอด จนเกิดการเปลี่ยนสถานะไปเป็นน้ำแข็งเกาะที่ผิวท่อและเพิ่มความหนาต่อเนื่องจากขอบด้านนอกของน้ำแข็งหลอดจนมีความหนาที่เหมาะสมตามความต้องการผลิต โดยตลอดระยะเวลาในกระบวนการทำความเย็นนั้นมีการทำความเย็นเกิดขึ้นเนื่องจากน้ำสะอาดที่คายความร้อนให้กับสารทำความเย็น ความร้อนที่สารทำความเย็นได้รับ ทำให้สารทำความเย็นดังกล่าวเกิดการระเหยกลายเป็นสารทำความเย็นไออิ่มตัวเข้าสู่แอกคิวมูเลเตอร์และเครื่องอัดไอ ตามลำดับ

ปัญหาที่พบในกระบวนการทำความเย็นคือ ความหนาของน้ำแข็งที่ผลิตได้ไม่ตรงตามความต้องการผลิต เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำป้อนที่เข้าสู่เครื่องทำน้ำแข็งหลอดมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล และการลดอุณหภูมิน้ำป้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำเย็นทิ้งจากการละลายน้ำแข็งตามมาตรการประหยัดพลังงานก่อนน้ำป้อนเข้าสู่เครื่องทำน้ำแข็งหลอด ยิ่งไปกว่านั้นเครื่องอัดไอที่เลือกใช้มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น ทำให้เครื่องอัดไามีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมคือ อัตราการดูดของสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอบางกว่าอัตราการระเหยของสารทำความเย็นจากหอทำน้ำแข็งหลอด เนื่องจากต้องการให้เกิดความมั่นใจว่าสามารถควบคุมให้สารทำความเย็นในหอทำน้ำแข็งหลอดเกิดการระเหยภายใต้สภาวะความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำสำหรับการผลิตน้ำแข็งหลอดตลอดกระบวนการทำความเย็นจึงส่งผลให้เครื่องอัดไอใช้พลังงานไฟฟ้าสูงในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด เห็นได้จาก พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อหน่วยมวลน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้ของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดอัตราการผลิตสูงนั้นมีค่ามากกว่าเครื่องที่มีอัตราการผลิตต่ำกว่า ซีระชาติ (2560) ทั้งนี้สาเหตุเกิดจากในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาวิจัย

ภาระการทำความเย็นภายใต้ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดอย่างจริงจัง ผลลัพธ์ของการศึกษาวิจัยนี้จะนำไปสู่อัตราการระเหยของสารทำความเย็นในช่วงเวลาต่าง ๆ ของกระบวนการทำความเย็นด้วย ซึ่งเป็นเครื่องมือในการกำหนดอัตราการดูดของเครื่องอัดไอที่เหมาะสม

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ภาระการทำความเย็นภายใต้ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด โดยใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์จากวิธีสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน ผลลัพธ์ของการศึกษาวิจัยนี้จะนำไปสู่อัตราการระเหยของสารทำความเย็นซึ่งเป็นเครื่องมือในการกำหนดอัตราการดูดของเครื่องอัดไอที่เหมาะสม รวมถึงทำให้ทราบระยะเวลาในกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาของน้ำแข็งหลอดตามความต้องการในการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ภาระการทำความเย็นภายใต้ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด โดยใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์จากวิธีสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน ผลลัพธ์ของการศึกษาวิจัยนี้จะนำไปสู่อัตราการระเหยของสารทำความเย็นซึ่งเป็นเครื่องมือในการกำหนดอัตราการดูดของเครื่องอัดไอที่เหมาะสม รวมถึงทำให้ทราบระยะเวลาในกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาของน้ำแข็งหลอดตามความต้องการในการผลิต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เครื่องทำน้ำแข็งหลอดที่ทำการศึกษาวิจัยใช้สารทำความเย็นเป็นแอมโมเนียและเครื่องอัดไอเป็นชนิดลูกสูบ เนื่องจากมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

1.3.2 เครื่องทำน้ำแข็งหลอดที่ใช้ในกรณีศึกษา มีอัตราการผลิตน้ำแข็งหลอดใหญ่เต็มพิกัด 50, 80, และ 100 ตันต่อวัน เนื่องจากเป็นอัตราการผลิตที่ได้รับความนิยมเลือกใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำแข็งหลอดขนาดใหญ่

1.3.3 พิจารณาให้ไม่มีการถ่ายโอนความร้อนระหว่างหอทำน้ำแข็งหลอดกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เนื่องจากหอทำน้ำแข็งหลอดได้รับการหุ้มฉนวนอย่างดี

1.3.4 กำหนดความดันอิ่มตัวของสารทำความเย็นภายใต้สภาวะอุณหภูมิค่าเป็นไปตามมาตรฐานของกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด

1.3.5 พิจารณาพื้นผิวภายนอกและภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดเป็นพื้นผิวเรียบ

1.3.6 กระบวนการทำความเย็นของน้ำในท่อทำน้ำแข็งอยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศตลอดกระบวนการ เนื่องจากเป็นระบบเปิดทางอุณหพลศาสตร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด

1.4.2 วิธีการวิเคราะห์ภาระการทำความเย็นภายใต้ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด

1.4.3 อัตราภาระเหยของสารทำความเย็นซึ่งเป็นเครื่องมือในการนำเสนอเครื่องอัดไอที่เหมาะสมกับเครื่องทำน้ำแข็งหลอด

1.4.4 ระยะเวลาในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดภายใต้ความหนาของน้ำแข็งหลอดที่เหมาะสมตามความต้องการในการผลิต



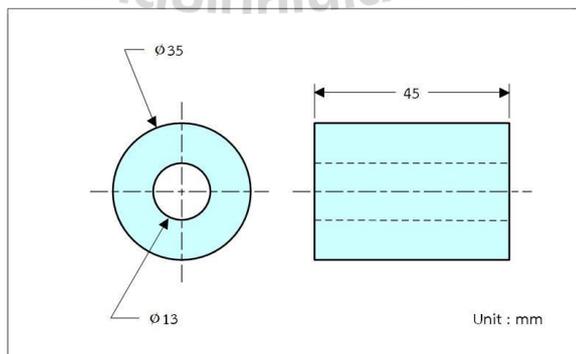
บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับน้ำแข็งหลอด กระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด การทำงานของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดและหลักการทำงานของอุปกรณ์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระเหย รวมไปถึงทฤษฎีเกี่ยวกับการจำลองระบบทางความร้อนด้วยแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ พร้อมทั้งกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1 น้ำแข็งหลอด

น้ำแข็งหลอดเป็นน้ำแข็งก้อนรูปทรงกระบอก มีรูอยู่ตรงกลาง น้ำแข็งมีความใส ไม่มีตะกอน ละลายช้าและให้ความเย็นได้อย่างรวดเร็ว มีทั้งน้ำแข็งหลอดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 16 ถึง 19 มิลลิเมตร และน้ำแข็งหลอดใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 35 ถึง 41 มิลลิเมตร ขณะเดียวกันความยาวของน้ำแข็งหลอดจะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้บริโภค ความยาวน้ำแข็งหลอดที่ได้รับความนิยมมีค่าประมาณ 40 ถึง 50 มิลลิเมตรหรือประมาณ 1.5 ถึง 2 นิ้ว น้ำแข็งหลอดเป็นน้ำแข็งที่ใช้สำหรับบริโภค เหมาะกับร้านอาหาร ร้านกาแฟและร้านเครื่องดื่มที่ต้องการน้ำแข็งสะอาด โดยน้ำแข็งหลอดได้รับการควบคุมดูแลให้มีความสะอาดเหมาะสมกับการบริโภคจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) กระทรวงสาธารณสุข เนื่องด้วยหากน้ำแข็งที่ใช้รับประทานโดยตรงไม่สะอาด มีจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคปนเปื้อนอยู่อาจเป็นสาเหตุก่อให้เกิดอาการป่วยจากโรคติดเชื้อในระบบทางเดินอาหาร ตัวอย่างมิติขนาดน้ำแข็งหลอดใหญ่ดังรูปที่ 2.1 ดังนี้



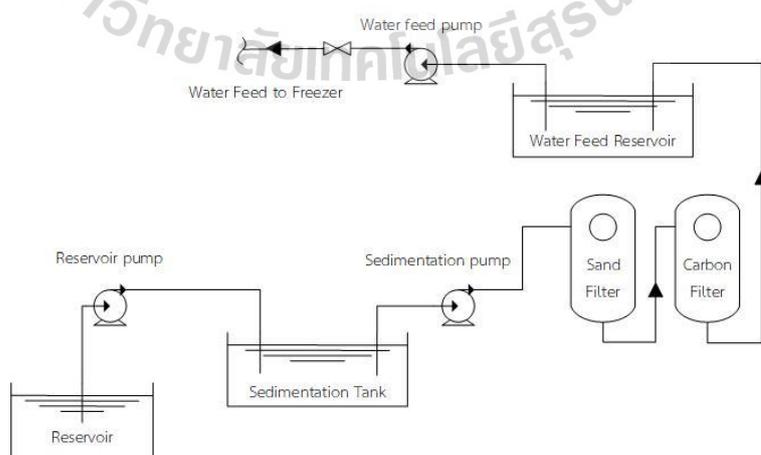
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างมิติขนาดน้ำแข็งหลอดใหญ่

2.2 กระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด

กระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด (Tube Ice Production) ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็งหลอดจะผลิตตามความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งโรงน้ำแข็งอยู่ในประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่ จึงมีการกำหนดอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate (Tariff), TOU) เพื่อลดอัตราค่าไฟฟ้า โดยมีความพยายามผลิตน้ำแข็งในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ (Off Peak) ในช่วงเวลาตั้งแต่ 22:00 ถึง 09:00 น. ในวันจันทร์ - วันศุกร์ และผลิตน้ำแข็งได้ 24 ชั่วโมงในวันเสาร์ วันอาทิตย์และวันหยุดนักขัตฤกษ์ เนื่องจากอัตราค่าไฟฟ้าต่ำ อีกทั้งอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตสูงตามกำลังการผลิตน้ำแข็งหลอดและต้นทุนหลักในการผลิตน้ำแข็งหลอดมาจากค่าพลังงานไฟฟ้า ในปัจจุบันมีเครื่องทำน้ำแข็งหลอดขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรมหลายขนาดตั้งแต่ขนาดกำลังการผลิตเต็มพิกัด 50 80 ไปจนถึง 100 ตันต่อวัน สามารถแบ่งกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดออกเป็น 4 กระบวนการ คือ กระบวนการเติมน้ำ กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการละลายน้ำแข็งและกระบวนการตัดน้ำแข็ง ดังนี้

2.2.1 กระบวนการเติมน้ำ

กระบวนการเติมน้ำสะอาด (Water Feeding Process) เป็นกระบวนการที่นำน้ำสะอาดเติมเข้าสู่เครื่องทำน้ำแข็งหลอด ซึ่งต้องมีการเตรียมน้ำสะอาดสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดเพื่อให้ น้ำสะอาดในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดเป็นไปตามมาตรฐาน GMP : Good Manufacturing Practice เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ สะอาดและปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยแหล่งน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะมาจากแหล่งน้ำธรรมชาติ แม่น้ำ น้ำบาดาลและน้ำประปา ตัวอย่างขั้นตอนการเตรียมน้ำสะอาดสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งจะแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนี้



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างขั้นตอนการเตรียมน้ำสะอาดสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็ง

1) เครื่องสูบน้ำแหล่งน้ำธรรมชาติ (Reservoir Pump) ติดตั้งใกล้กับบริเวณแหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นเครื่องสูบบแบบหอยโข่งหรือแบบแรงเหวี่ยงมีต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า ทำหน้าที่สูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ ฯ ส่งจ่ายยังบ่อพักตกตะกอนจนกระทั่งระดับน้ำถึงจุดควบคุมจากนั้นเครื่องสูบน้ำจึงหยุดการทำงาน เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งติดตั้งใกล้แหล่งน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนี้

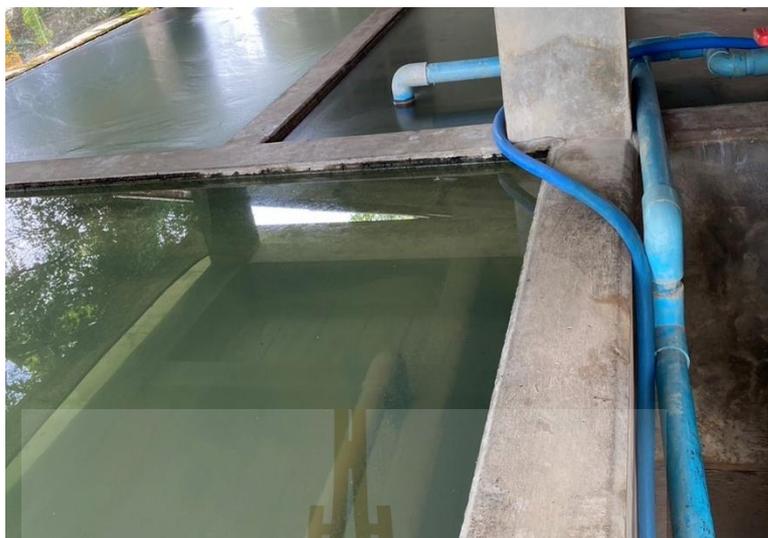


รูปที่ 2.3 เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งติดตั้งใกล้กับบริเวณแหล่งน้ำธรรมชาติ

2) บ่อพักตกตะกอน (Sedimentation Tank) ทำหน้าที่เป็นบ่อรับน้ำดิบที่เครื่องสูบน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติส่งจ่ายมายังบ่อพักตกตะกอน บ่อพักนี้มีการเติมสารส้มเพื่อให้ตะกอนหรือสารแขวนลอยเกิดการตกตะกอน ทำให้เกิดการตกตะกอนของสารแขวนลอยหรือของเสียนขนาดใหญ่ที่อยู่ในน้ำดิบ บ่อพักตกตะกอนมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.4 ดังนี้

3) เครื่องสูบน้ำบ่อพักตกตะกอน (Sedimentation Pump) ติดตั้งอยู่ระหว่างบ่อพักตกตะกอนกับถังกรองทรายและคาร์บอน เป็นเครื่องสูบบแบบหอยโข่งมีต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า ทำหน้าที่สูบน้ำจากบ่อพักตกตะกอนจ่ายเข้าสู่ถังกรองทรายและกรองคาร์บอน เครื่องสูบน้ำบ่อพักตกตะกอนมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนี้

4) ถังกรองทรายและคาร์บอน (Sand and Carbon Filter) ติดตั้งอยู่ระหว่างบ่อพักตกตะกอนกับบ่อน้ำสะอาด ทำหน้าที่กรองของเสียและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำดิบจากบ่อพักตกตะกอน โดยน้ำดิบจะเข้าสู่ถังกรองทรายเพื่อกำจัดของเสียหรือสิ่งปนเปื้อนขนาดเล็ก จากนั้นน้ำดิบจะเข้าสู่ถังคาร์บอนเพื่อขจัดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ กระทั่งน้ำที่ออกจากถังคาร์บอนกลายเป็นน้ำสะอาดที่ผ่านมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการบริโภค ถังกรองทรายและคาร์บอนมีลักษณะดังรูปที่ 2.6 ดังนี้



รูปที่ 2.4 บ่อพักตกตะกอน



รูปที่ 2.5 เครื่องสูบน้ำบ่อพักตกตะกอน

5) บ่อพักน้ำสะอาด (Water Feed Reservoir) ทำหน้าที่กักเก็บน้ำสะอาดที่รับมาจากถังกรองทรายและคาร์บอน ที่มีทั้งบ่อพักน้ำสะอาดใต้ดินและบ่อพักน้ำสะอาดที่อยู่ในอาคาร ซึ่งเป็น

น้ำสะอาดที่พร้อมสำหรับการผลิตน้ำแข็งหลอดตามมาตรฐาน GMP ทั้งในด้านความปลอดภัยและความสะอาดสำหรับการบริโภค ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ถังกรองทรายและคาร์บอน

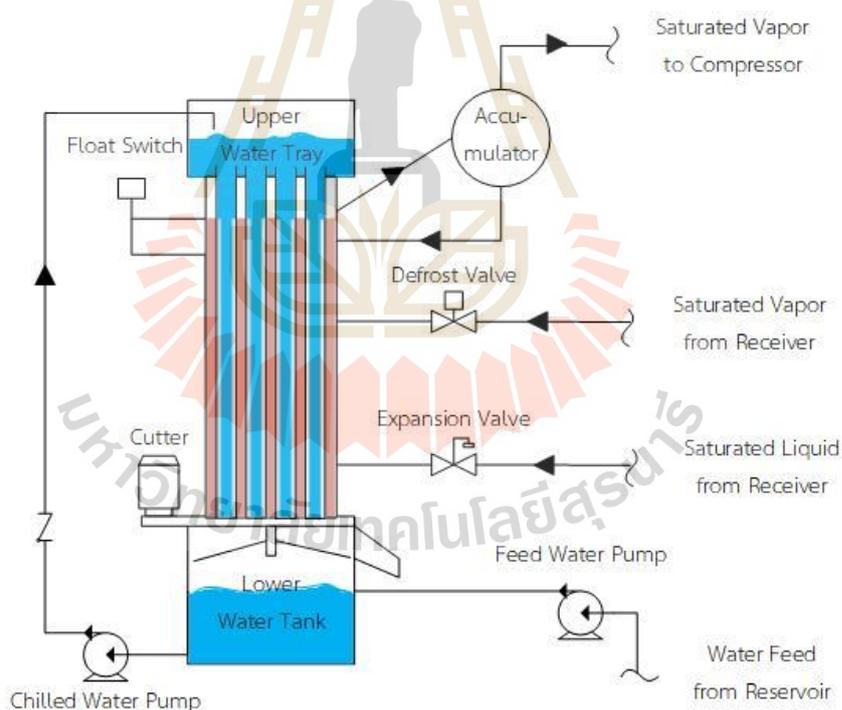


รูปที่ 2.7 บ่อพักน้ำสะอาด

6) เครื่องสูบน้ำบ่อกักน้ำสะอาด (Water Feed Pump) ติดตั้งอยู่ระหว่างบ่อกักน้ำสะอาดกับเครื่องทำน้ำแข็งหลอด เป็นเครื่องสูบบางแบบหอยโข่งมีต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า ทำหน้าที่สูบน้ำจากบ่อกักน้ำสะอาดส่งจ่ายไปยังเครื่องทำน้ำแข็งหลอดเพื่อใช้น้ำสะอาดในกระบวนการทำน้ำแข็งหลอดต่อไป

2.2.2 กระบวนการทำความเย็น

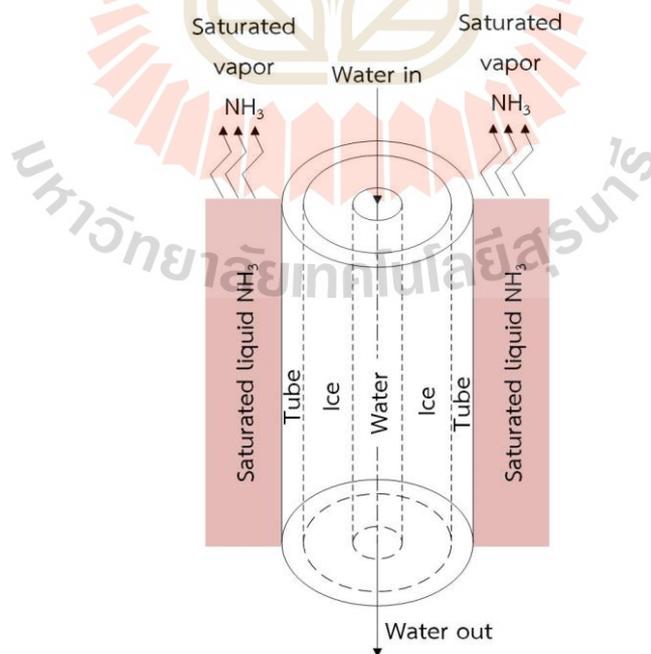
กระบวนการทำความเย็น (Freezing Process) เป็นกระบวนการที่ทำให้น้ำสะอาดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เข้าสู่เครื่องทำน้ำแข็งหลอดและไหลเวียนอยู่ในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดถูกลดอุณหภูมิจนกระทั่งน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งภายใต้ความดันบรรยากาศด้วยการทำความเย็นจากสารทำความเย็นที่อยู่ในอ่างบรรจุ (Shell) ซึ่งลักษณะกายภาพของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดและส่วนประกอบต่าง ๆ อธิบายได้ดังรูปที่ 2.8 แผนภาพของชุดหอทำน้ำแข็งหลอด ดังนี้



รูปที่ 2.8 แผนภาพของชุดหอทำน้ำแข็งหลอด

จากแผนภาพของชุดหอทำน้ำแข็งหลอด หอทำน้ำแข็งหลอดมีการหมุนวนกันความร้อนปิดล้อมชุดหอทำน้ำแข็งหลอดและอุปกรณ์ที่ทำงานภายใต้อุณหภูมิต่ำทั้งหมด

เพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนและเกิดความร้อนรั่วไหลจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่หอทำน้ำแข็งหลอดให้น้อยที่สุด ท่อที่ใช้ทำน้ำแข็งหลอดเป็นท่อวัสดุสแตนเลส AISI 302 และมีสารทำความเย็นล้อมรอบท่อ ซึ่งใช้สารทำความเย็นแอมโมเนีย (Refrigerant 717, NH₃) ในกระบวนการทำความเย็นสำหรับผลิตน้ำแข็ง ซึ่งสารทำความเย็นด้านความดันต่ำจะมีอุณหภูมิอิ่มตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ -10 ถึง 0 องศาเซลเซียส เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอิ่มตัวด้านความดันต่ำของสารทำความเย็นต่ำกว่า -10 องศาเซลเซียสจะส่งผลให้น้ำแข็งมีสภาพแห้งเกินไป ทำให้น้ำแข็งไม่เป็นไปตามลักษณะของน้ำแข็งหลอดที่พร้อมจำหน่าย โดยน้ำสะอาดที่ไหลเวียนในท่อทำน้ำแข็งหลอดจะถ่ายโอนความร้อนผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอดไปสู่สารทำความเย็นจนกระทั่งน้ำเปลี่ยนสถานะกลายเป็นน้ำแข็ง โดยน้ำแข็งจะเริ่มก่อตัวและยึดเกาะที่ผิวภายในของท่อทำน้ำแข็งหลอด น้ำแข็งจะก่อตัวขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการทำความเย็น ในขณะที่เดียวกันน้ำแข็งที่ก่อตัวขึ้นนี้ส่งผลให้ความต้านทานความร้อนหรือความเป็นฉนวนกันความร้อน (Insulation) เพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำสะอาดไปสู่สารทำความเย็นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้ในช่วงที่น้ำแข็งมีความหนาเพิ่มมากขึ้นนี้ความร้อนที่ถ่ายโอนไปยังสารทำความเย็นจะลดน้อยลงและน้ำแข็งหลอดก่อตัวในอัตราที่ช้าลงจนกระทั่งมีความหนาที่เหมาะสมต่อการจำหน่ายจึงจะสิ้นสุดกระบวนการทำความเย็น น้ำแข็งที่ก่อตัวขึ้นในท่อทำน้ำแข็งหลอดมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.9 ดังนี้



รูปที่ 2.9 น้ำแข็งหลอดในท่อทำน้ำแข็งหลอด

2.2.3 กระบวนการละลายน้ำแข็ง

การละลายน้ำแข็ง (Defrost Process) ของเครื่องระเหย (Evaporator) หรือหอทำน้ำแข็งหลอดสามารถจำแนกได้เป็น 2 วิธี คือ การละลายน้ำแข็งตามธรรมชาติและการละลายน้ำแข็งด้วยความร้อนเสริม ตามแหล่งที่มาของความร้อนที่ใช้ในการละลายน้ำแข็ง ดังนี้ Dossat (1984)

2.2.3.1 การละลายน้ำแข็งตามธรรมชาติ ในบางครั้งเรียกว่า การละลายน้ำแข็งแบบปิดเครื่องหรือหยุดการทำงานของวัฏจักร ใช้ความร้อนของอากาศในพื้นที่เพื่อละลายน้ำแข็งจากเครื่องระเหยซึ่งต้องปิดเครื่องเป็นระยะเวลานานพอที่จะทำให้อุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้นถึงระดับที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของน้ำแข็งพอสมควร ซึ่งวิธีการนี้จะไม่แน่นอนของระยะเวลาในกระบวนการละลายน้ำแข็งที่พิจารณาจากขนาดของเครื่องระเหย ความหนาของน้ำแข็งที่ก่อตัว อีกทั้งการละลายน้ำแข็งนี้จะต้องมีอุณหภูมิอย่างน้อยอยู่ในช่วง 2 ถึง 5 องศาเซลเซียส ด้วยเหตุนี้วิธีการละลายน้ำแข็งตามธรรมชาติจึงไม่สามารถใช้งานได้จริง เมื่ออุณหภูมิโดยรอบพื้นที่ออกแบบหรืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส

2.2.3.2 การละลายน้ำแข็งด้วยความร้อนเสริม นำความร้อนที่มาจากแหล่งอื่นนอกเหนือจากอากาศภายในพื้นที่ มาใช้ในการละลายน้ำแข็ง ได้แก่ ความร้อนจากน้ำในอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ความร้อนจากไฟฟ้า (Electric) และความร้อนจากก๊าซร้อน (Hot Gas) หรือสารทำความเย็นในสถานะไอยิ่งยวด อธิบายได้ดังต่อไปนี้

1) การละลายน้ำแข็งด้วยน้ำ (Water Defrosting) สำหรับอุณหภูมิของเครื่องระเหยที่ลดลงถึงประมาณ -40 องศาเซลเซียส การละลายน้ำแข็งสามารถทำได้โดยการฉีดน้ำบนพื้นผิวของคอยล์ในเครื่องระเหย สำหรับอุณหภูมิของเครื่องระเหยที่ลดลงต่ำกว่า -40 องศาเซลเซียส ควรใช้น้ำเกลือหรือสารละลายป้องกันการแข็งตัวแทนน้ำ

2) การละลายน้ำแข็งด้วยไฟฟ้า (Electric Defrosting) มักใช้เครื่องทำความร้อน (Heater) เพื่อละลายน้ำแข็งที่เกิดขึ้น โดยการละลายน้ำแข็งด้วยไฟฟ้าสามารถเริ่มและหยุดได้ด้วยตนเองหรืออาจจะใช้เครื่องจับเวลา (Timer) ละลายน้ำแข็งเป็นแบบอัตโนมัติ ทั้ง 2 กรณีมีขั้นตอนการละลายน้ำแข็งจะเหมือนกันคือ จะปิดโซลินอยด์วาล์วเพื่อให้สารทำความเย็นในเครื่องระเหย เกิดการระเหยตัวออกไปทั้งหมด หลังจากนั้นเครื่องอัดไอจะปิดการทำงานด้วยการควบคุมแรงดันต่ำ เนื่องจากไม่มีไอระเหยสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดไอ ในเวลาเดียวกันจะเปิดการทำงานของเครื่องทำความร้อนเพื่อละลายน้ำแข็งที่อยู่ในคอยล์ของเครื่องระเหย เมื่อละลายน้ำแข็งเสร็จสิ้นแล้ว เครื่องทำความร้อนจะปิดการทำงานและระบบจะกลับมาทำงานตามปกติอีกครั้ง

3) การละลายน้ำแข็งด้วยก๊าซร้อน (Hot Gas Defrosting) มีหลายรูปแบบ โดยทั้งหมดนี้ใช้ก๊าซร้อนที่ปล่อยออกจากเครื่องอัดไอเป็นแหล่งความร้อนเพื่อละลายน้ำแข็งที่เครื่องระเหย วิธีการที่ง่ายที่สุดวิธีหนึ่งคือ การทำบายพาสหรือทางผ่านพร้อมกับโซลินอยด์วาล์วระหว่าง

เครื่องอัดไอกับเครื่องระเหย เมื่อเปิดโซลินอยด์วาล์วก๊าซร้อนความดันสูงจากเครื่องอัดไอกจะส่งไปยังเครื่องระเหย ก๊าซร้อนความดันสูงจะให้ความร้อนแก่เครื่องระเหยและควบแน่นกลายเป็นสารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัว ทำให้น้ำแข็งที่เกาะอยู่ในเครื่องระเหยได้รับความร้อนและละลายจากผิวด้านนอกของน้ำแข็ง สารทำความเย็นที่ให้ความร้อนนั้นบางส่วนจะระเหยกลับสู่เครื่องอัดไอกและบางส่วนจะกลายเป็นสารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัวอยู่ในเครื่องระเหย ข้อเสียของการละลายน้ำแข็งด้วยก๊าซร้อนมีหลายประการ คือ ในระหว่างการละลายน้ำแข็งจะไม่มีภาระของสารทำความเย็นเข้าไปสู่เครื่องอัดไอก และเครื่องอัดไอนั้นยังส่งก๊าซร้อนเข้าสู่เครื่องระเหยต่อเนื่อง อาจส่งผลให้สารทำความเย็นสถานะไออิ่มตัวที่เข้าสู่เครื่องอัดไอนั้นมีน้อยลงและระบบมีแนวโน้มที่จะหมดความร้อนก่อนที่จะละลายน้ำแข็งหมด และข้อเสียอีกประการที่ร้ายแรงกว่า คือ มีความเป็นไปได้ที่สารทำความเย็นในสถานะของผสม (Liquid Vapor Mixture) จะกลับเข้าสู่เครื่องอัดไอก ทำให้เครื่องอัดไอกเกิดความเสียหายได้ ซึ่งมักเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการละลายน้ำแข็งหรือทันทีหลังจากการละลายน้ำแข็งเสร็จสิ้น โดยข้อเสียทั้ง 2 ประการสามารถแก้ไขได้โดยการระเหยสารทำความเย็นที่ควบแน่นในเครื่องระเหยให้สารทำความเย็นเหล่านี้น้อยอยู่ในสถานะไออิ่มตัวก่อนกลับเข้าสู่เครื่องอัดไอกและอีกแนวทางหนึ่งคือ การติดตั้งแอกคิวลุ่มเตอร์ระหว่างเครื่องระเหยและเครื่องอัดไอกเพื่อป้องกันสารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัวเข้าสู่เครื่องอัดไอก

กระบวนการละลายน้ำแข็งสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดจะนิยมใช้วิธีละลายน้ำแข็งด้วยก๊าซร้อน (Hot Gas Defrosting) ซึ่งเป็นวิธีการละลายน้ำแข็งที่ง่าย มีประสิทธิภาพสูง รวมทั้งระยะเวลาในช่วงการละลายน้ำแข็งสั้นที่สุด โดยเมื่อเปิดโซลินอยด์วาล์วทำให้สารทำความเย็นในสถานะไออิ่มตัวที่อยู่ถึงพาสสารทำความเย็นไหลผ่านโซลินอยด์วาล์วเข้าสู่หอทำน้ำแข็งหลอดเพื่อทำการละลายน้ำแข็ง ส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่อยู่ในอ่างบรรจุหรือหอทำน้ำแข็งหลอดมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงระดับจุดหลอมเหลวของน้ำแข็งที่ 0 องศาเซลเซียสหรืออุณหภูมิมากกว่าระดับจุดหลอมเหลว ทำให้น้ำแข็งที่เกาะติดอยู่กับผิวภายในของท่อหรือผนังด้านในของท่อเกิดการละลาย น้ำแข็งที่เกิดการละลายจะไม่สามารถยึดเกาะกับผิวภายในท่อได้ ทำให้น้ำแข็งหลุดจากท่อและร่วงหล่นด้วยแรงโน้มถ่วงสู่เครื่องตัดน้ำแข็งต่อไป

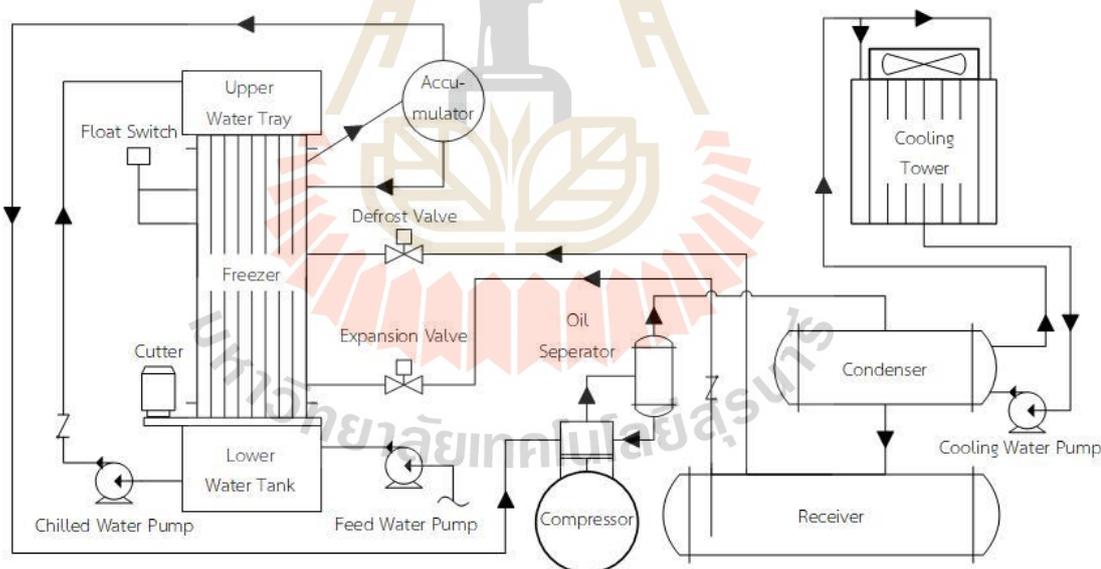
2.2.4 กระบวนการตัดน้ำแข็ง

กระบวนการตัดน้ำแข็ง (Cutting Process) ต้องพิจารณาถึงความยาวของน้ำแข็งที่เหมาะสมต่อการส่งจำหน่ายน้ำแข็ง ซึ่งจะสัมพันธ์กับความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องตัด เนื่องจากน้ำแข็งร่วงหล่นจากท่อทำน้ำแข็งด้วยแรงโน้มถ่วง ให้ความยาวของน้ำแข็งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เครื่องตัด หากความเร็วรอบของมอเตอร์สูงเกินไปจะส่งผลให้น้ำแข็งหลอดที่ตัดได้นั้นสั้นเกินไป ส่งผลเสียไปถึงน้ำแข็งจะเกิดการละลายเร็วขึ้นเมื่อสัมผัสกับอากาศในสิ่งแวดล้อมและขนาด

น้ำแข็งไม่เหมาะสมสำหรับการจำหน่ายเพื่อบริโภค หากความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องอัดต่ำเกินไป จะส่งผลให้น้ำแข็งหลอดที่ตัดได้นี้ยาวเกินความจำเป็น ส่งผลเสียไปถึงน้ำหลอดที่ส่งจำหน่ายไม่สามารถใช้สำหรับการบริโภคได้ เนื่องจากจะไม่สามารถบรรจุในภาชนะสำหรับบริโภค กระบวนการตัดน้ำแข็งนี้จะต้องใช้ความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องตัดที่มีความเหมาะสมต่อความยาวของน้ำแข็งหลอดที่ตรงตามความต้องการของผู้บริโภคและการส่งจำหน่ายต่อไป

2.3 การทำงานของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดและหลักการทำงานของอุปกรณ์

การทำงานของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด กระบวนการทำความเย็นทำงานภายใต้วัฏจักรแบบอัดไอ (Vapor Compression Cycle) โดยของไหลทำงาน (Working Fluid) เป็นสารทำความเย็น คือ แอมโมเนีย เครื่องทำน้ำแข็งหลอดประกอบด้วย 6 อุปกรณ์หลักคือ ชุดหอน้ำแข็งหลอด แอคคิวมูเลเตอร์ ชุดเครื่องอัดไอแบบลูกสูบ ชุดเครื่องควบแน่นระบายความร้อนด้วยน้ำ ถังพักเก็บสารทำความเย็นและชุดวาล์วลดความดัน ดังรูปที่ 2.10 และหลักการทำงานของอุปกรณ์ทั้ง 6 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.10 แผนภาพเครื่องทำน้ำแข็งหลอด

2.3.1 ชุดหอน้ำแข็งหลอด

หอน้ำแข็งหลอด (Freezer) หรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger) หรือเครื่องระเหย เป็นอุปกรณ์สำคัญของเครื่องทำน้ำแข็ง

หลอด ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำในท่อทำน้ำแข็งกับสารทำความเย็นที่อยู่ในอ่างบรรจุ หอทำน้ำแข็งหลอดประกอบไปด้วย 5 ส่วนหลัก ได้แก่ ท่อทำน้ำแข็งหลอด อ่างบรรจุสารทำความเย็น ถังน้ำเย็นด้านล่าง ป้อนน้ำเย็นและถาดน้ำด้านบน ที่แสดงในรูปที่ 2.7 การทำงานของหอทำน้ำแข็ง หลอดนั้นใช้ปั๊มน้ำเย็นสูบน้ำสะอาดจากถังน้ำด้านล่างส่งไปยังถาดน้ำด้านบน จากนั้นน้ำจะไหลตก เข้าสู่ท่อทำน้ำแข็งด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกภายใต้ความดันบรรยากาศ ในระหว่างที่น้ำไหลในท่อจะ เกิดการถ่ายโอนความร้อนผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอดให้สารทำความเย็นเหลวความดันต่ำที่อยู่ในอ่าง จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนสถานะภายใต้ความดันคงที่เป็นสารทำความเย็นไออิ่มตัว (Saturated Vapor) และน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหลตลอดความยาวท่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง พลังงานจลน์ของน้ำรวมถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์จากการเปลี่ยนแปลงความสูงจนกระทั่งน้ำ ไหลตกไปยังถังน้ำด้านล่างและถูกสูบเข้าสู่ปั๊มน้ำเย็นส่งไปยังถาดน้ำด้านบน โดยจะทำงานเป็น วัฏจักรต่อเนื่อง ทำให้น้ำสะอาดที่ไหลเวียนในเครื่องทำน้ำแข็งอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วและเกิดการ เปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งจากขอบนอกสุดที่สัมผัสกับผิวท่อด้านใน ซึ่งน้ำแข็งจะก่อตัวเพิ่มความหนา อย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการทำน้ำแข็งจนไปถึงความหนาที่ต้องการต่อการส่งจำหน่าย เป็นจุดสิ้นสุดกระบวนการทำน้ำแข็ง หอทำน้ำแข็งหลอดมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.11 ดังนี้



รูปที่ 2.11 หอทำน้ำแข็งหลอด

2.3.2 แอคคิวมูเลเตอร์

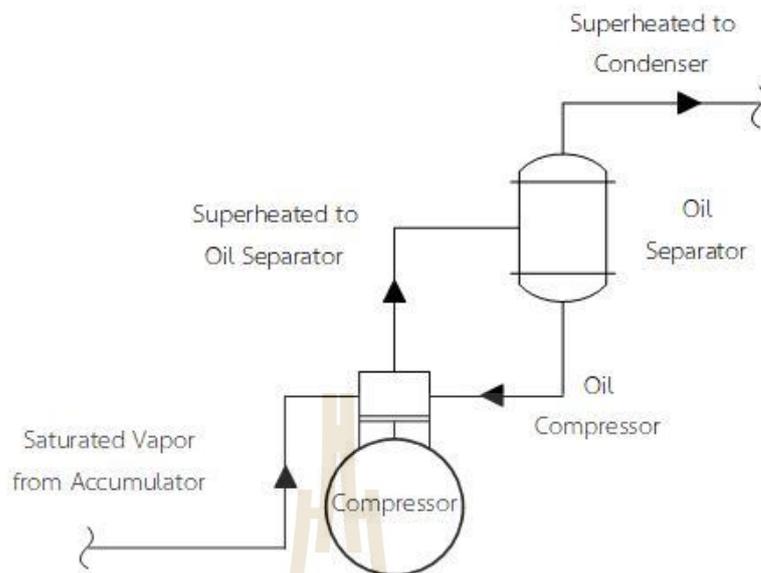
แอคคิวมูเลเตอร์ (Accumulator) ติดตั้งอยู่ระหว่างเครื่องระเหยหรือหอทำน้ำแข็ง หลอดกับเครื่องอัดไอน้ำแสดงในรูปที่ 2.2 ทำหน้าที่แบ่งแยกสารทำความเย็นสถานะไออิ่มตัว (Saturated Vapor) ส่งจ่ายไปยังเครื่องอัดไอ และแยกสารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัว (Saturated Liquid) กลับไปเครื่องระเหยเพื่อรับความร้อนต่อไป ซึ่งการแยกสารทำความเย็นก่อนส่งไปยังเครื่องอัดไอน้ำมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งคือ ป้องกันการอัดสารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัว (Wet Compression) ของเครื่องอัดไอ เพื่อยืดอายุการใช้งานเครื่องอัดไอน้ำรวมถึงเป็นอุปกรณ์ช่วยให้ระบบทำความเย็นทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แอคคิวมูเลเตอร์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.12 ดังนี้



รูปที่ 2.12 แอคคิวมูเลเตอร์

2.3.3 ชุดเครื่องอัดไอ

ชุดเครื่องอัดไอแบบลูกสูบ (Reciprocating Compressor) ติดตั้งอยู่ระหว่างแอคคิวมูเลเตอร์กับชุดเครื่องควบแน่น ประกอบด้วย เครื่องอัดไอชนิดลูกสูบและเครื่องแยกน้ำมันหล่อลื่นอัดไอ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนภาพชุดเครื่องอัดไอ

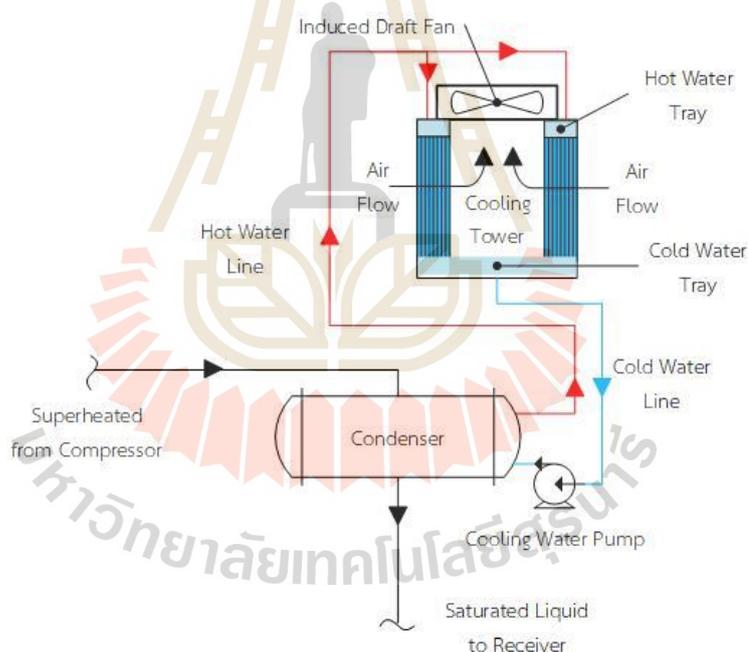
ชุดเครื่องอัดไอจะประกอบไปด้วย เครื่องอัดไอ (Compressor) และเครื่องแยกน้ำมันหล่อลื่นอัดไอ (Oil Separator) เครื่องอัดไอทำหน้าที่อัดและเพิ่มความดันให้กับสารทำความเย็น ไออิมตัวความดันต่ำไปสู่สารทำความเย็นไอยูยงยวดความดันสูง (Superheated Vapor) โดยสารทำความเย็นไออิมตัวความดันต่ำจะถูกดูดจากแอกคิวมูเลเตอร์เข้าสู่ด้านดูด (Suction) ของเครื่องอัดไอนั้นจะถูกอัดเพิ่มความดันตามการทำงานของเครื่องอัดไอเป็นสารทำความเย็นไอยูยงยวดความดันสูงและไหลออกจากด้านจ่าย (Discharge) ของเครื่องอัดไอไปยังเครื่องแยกน้ำมันหล่อลื่นอัดไอ ขณะที่เครื่องแยกน้ำมันหล่อลื่นอัดไอทำหน้าที่แยกระหว่างสารทำความเย็นไอยูยงยวดความดันสูงออกจากไอน้ำมันหล่อลื่น เพื่อไม่ให้น้ำมันหล่อลื่นปะปนไปกับสารทำความเย็น เนื่องจากไอน้ำมันหล่อลื่นนั้นจะลดประสิทธิภาพการทำงานของสารทำความเย็นเมื่อแยกไอน้ำมันหล่อลื่นออกจากสารทำความเย็นไอยูยงยวดความดันสูงแล้ว สารทำความเย็นความดันสูงในสถานะไอยูยงยวดจะถูกส่งจ่ายไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) ต่อไป เครื่องอัดไอและเครื่องแยกน้ำมันหล่อลื่นอัดไอมี่ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดังนี้

2.3.4 ชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบควบแน่นระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

ชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบควบแน่นระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Cooled Condenser) ติดตั้งอยู่ระหว่างเครื่องอัดไอและถังพักเก็บสารทำความเย็น มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.15 ดังนี้



รูปที่ 2.14 เครื่องอัดไอและเครื่องแยกน้ำมันหล่อลื่นอัดไอ



รูปที่ 2.15 แผนภาพชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบควบแน่นระบายความร้อนด้วยน้ำ

เครื่องควบแน่น (Condenser) เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger) ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นที่อยู่ในอ่างบรรจุหรือเปลือกกับน้ำระบายความร้อน (Cooling Water) ที่อยู่ในท่อ โดยสารทำความเย็นไอยิ่งยวดความดันสูงจากเครื่องอัดไอจะเข้ามาทิ้งความร้อนให้แก่น้ำระบายความร้อนที่อยู่ใน

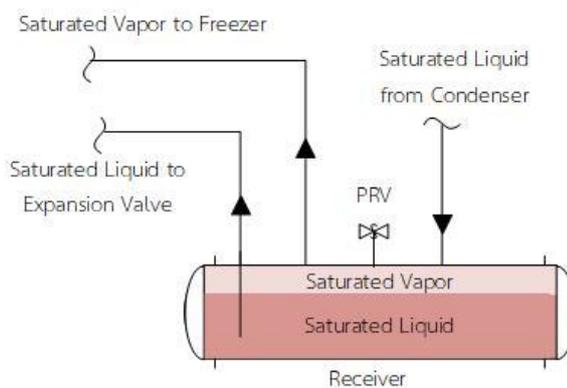
ในท่อ จนกระทั่งสารทำความเย็นความดันสูงเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวหรือของผสม (Liquid Vapor Mixture) จากนั้นส่งไปยังถังพักสารทำความเย็น ซึ่งน้ำระบายความร้อนเมื่อรับความร้อนเสร็จสิ้นจะถูกส่งขึ้นไปยังหอผึ่งน้ำเย็น (Cooling Tower) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรงกับอากาศด้วยการทิ้งความร้อนให้กับอากาศ โดยพัดลมดูดอากาศในหอผึ่งน้ำเย็นจะดูดอากาศจากภายนอกให้ไหลมาสัมผัสโดยตรงกับน้ำระบายความร้อนที่ไหลจากถาดน้ำร้อนด้านบนลงสู่ถาดน้ำเย็นด้านล่าง จากนั้นจะดูดอากาศที่รับความร้อนแล้วออกไปยังบรรยากาศโดยรอบ ขณะเดียวกันน้ำระบายความร้อนเมื่อทิ้งความร้อนให้กับอากาศเสร็จสิ้นแล้วจะอยู่ที่ถาดน้ำเย็นและถูกเครื่องสูบน้ำระบายความร้อน (Cooling Water Pump) ดูดจากถาดน้ำเย็นจ่ายเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบควบแน่นเพื่อรับความร้อนต่อไป ซึ่งจะทำงานเป็นวัฏจักรของน้ำระบายความร้อนชุดเครื่องควบแน่นระบบระบายความร้อนด้วยน้ำมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.16 ดังนี้



รูปที่ 2.16 ชุดเครื่องควบแน่นระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

2.3.5 ถังพักเก็บสารทำความเย็น

ถังพักเก็บสารทำความเย็น (Receiver) ติดตั้งอยู่ระหว่างเครื่องควบแน่น (Condenser) วาล์วลดความดัน (Expansion Valve) และหอทำน้ำแข็งหลอด (Freezer) มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.17 ดังนี้



รูปที่ 2.17 แผนภาพถังพักเก็บสารทำความเย็นความดันสูง

ถังพักเก็บสารทำความเย็น (Receiver) เป็นถังบรรจุสารทำความเย็นทั้งหมดที่มีอยู่ในระบบ ถังพักสารทำความเย็นภายในประกอบไปด้วย สารทำความเย็นของเหลวอิ่มตัวความดันสูงในปริมาณที่ออกแบบขนาดถังนี้ไว้ที่ระดับสูง (High Level) และมีสารทำความเย็นไออิ่มตัวความดันสูงในปริมาณส่วนที่เหลือจากระดับสูงไปจนเต็มปริมาณถังพัก ซึ่งสารทำความเย็นของเหลวอิ่มตัวความดันสูงจะถูกส่งจ่ายไปยังวาล์วลดความดันเพื่อใช้ทำความเย็น Stoecker (1998) และสารทำความเย็นไออิ่มตัวความดันสูงจะถูกส่งจ่ายไปยังเครื่องทำน้ำแข็งหลอดผ่านวาล์วควบคุมด้วยความแตกต่างของความดันของสารทำความเย็น เมื่อเข้าสู่กระบวนการละลายน้ำแข็ง ถังพักเก็บสารทำความเย็นมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.18 ดังนี้



รูปที่ 2.18 ถังพักเก็บสารทำความเย็น

2.3.6 ชุดวาล์วลดความดัน

ชุดวาล์วลดความดัน (Expansion Valve) ติดตั้งอยู่ระหว่างถังพักสารทำความเย็น (Receiver) กับหอน้ำแข็งหลอด (Freezer) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นวาล์วลดความดันที่ควบคุมแบบกลไกโดยด้านความดันต่ำ (Expansion Valve Low Side Float) คือ วาล์วลดความดันทำงานเมื่อปริมาณสารทำความเย็นในหอน้ำแข็งหลอดเปลี่ยนแปลงหรือระดับสารทำความเย็นลดต่ำกว่าจุดควบคุม วาล์วลดความดันจะทำการเปิดเพื่อลดความดันของสารทำความเย็นของเหลวอิ่มตัวความดันสูงเป็นสารทำความเย็นของเหลวผสมความดันต่ำเข้าสู่หอน้ำแข็งหลอดจนกระทั่งระดับสารทำความเย็นเหลวในหอน้ำแข็งหลอดถึงจุดควบคุมวาล์วลดความดันจะปิดตัวลง Stoecker and Jones (1982) ชุดวาล์วลดความดันมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.19 ดังนี้

2.3.7 ชุดวาล์วลดความดัน

สารทำความเย็นแอมโมเนีย (Refrigerant 717, NH₃) เป็นสารทำความเย็นที่ไม่ได้อยู่ในกลุ่มฟลูออโรคาร์บอน นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย พบเห็นได้ตามอุตสาหกรรมโรงงาน บรรจุอาหาร ลานสเก็ตน้ำแข็ง รวมถึงอุตสาหกรรมห้องเย็นต่างๆ เนื่องจากเป็นสารทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพในการทำความเย็นสูงและรับความร้อนได้ดี ทั้งยังเหมาะกับท่อที่ทำด้วยเหล็ก อลูมิเนียม และสแตนเลสที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นสารทำความเย็นที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับสารทำความเย็นชนิดอื่น ๆ แต่สารทำความเย็นแอมโมเนียมีข้อเสียคือ มีคุณสมบัติไวไฟ ระเบิดได้ง่าย และมีความเป็นพิษ Stoecker (1998) ถึงเก็บบรรจุสารทำความเย็นแอมโมเนียมีลักษณะดังรูปที่ 2.20 ดังนี้



รูปที่ 2.19 ชุดวาล์วลดความดัน



รูปที่ 2.20 ถังบรรจุสารทำความเย็นแอมโมเนีย

2.4 เครื่องระเหย

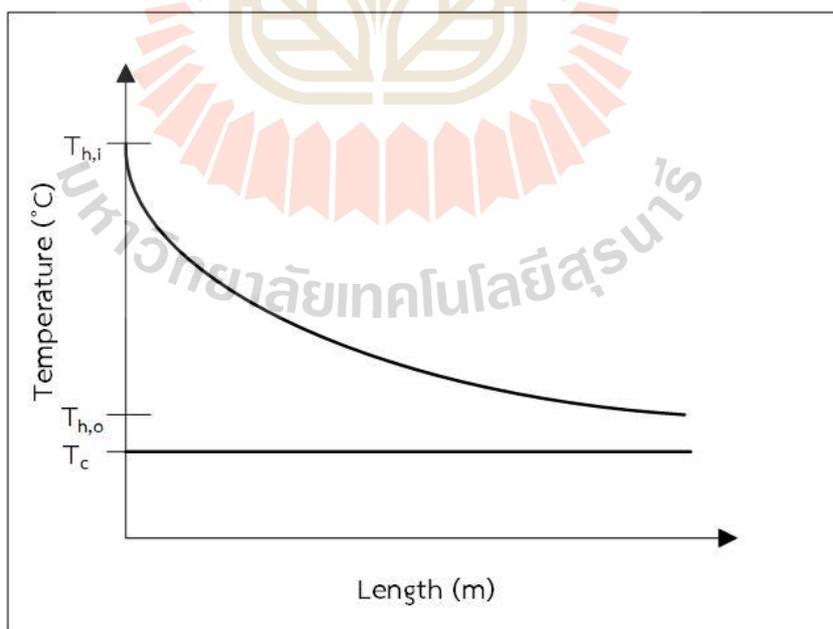
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระเหย (Evaporator) หรือเครื่องระเหย ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อในแนวตั้ง (Vertical Shell and Tube Heat Exchanger) ที่ใช้ในการทำน้ำแข็งเรียกว่า หอทำน้ำแข็งหลอด ซึ่งสารทำความเย็นจะอยู่ในเปลือกหรืออ่างบรรจุและน้ำสะอาดไหลเวียนอยู่ในท่อ จึงมีความจำเป็นจะต้องทราบถึงแบบจำลองและกลไกการถ่ายโอนความร้อนภายในหอทำน้ำแข็งหลอด ดังต่อไปนี้

2.4.1 แบบจำลองเครื่องระเหย

เมื่อมีของไหลเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระเหยแล้วของไหลดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสถานะ เช่น สารทำความเย็นที่เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระเหยจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวอิ่มตัวไปเป็นไออิ่มตัว เป็นต้น จำเป็นจะต้องสร้างแบบจำลองหรือสมการเฉพาะ เพื่อแสดงถึงปรากฏการณ์หรือพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เรียกว่า แบบจำลองเครื่องระเหย (Modeling of Evaporator) Stoecker (1989) ในการศึกษาวิจัยหอทำน้ำแข็งหลอดเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระเหยในแนวตั้ง (Vertical Evaporator) ที่มีน้ำไหลเวียนผ่านท่อ รวมถึงสารทำความเย็นที่อยู่ภายในอ่างบรรจุเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวอิ่มตัวเป็นไออิ่มตัว เข้าสู่เครื่องอัดไอ เมื่อสารทำเย็นสถานะไออิ่มตัวระเหยออกจากหอทำน้ำแข็งหลอดจะมีการเติมสารทำความเย็นของผสมความดันต่ำเข้าสู่หอทำน้ำแข็งหลอดภายใต้กระบวนการไหลแบบคงตัว

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองของท่อทำน้ำแข็งหลอดนี้ขึ้นเพื่อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำภายในท่อที่ถ่ายโอนความร้อนให้กับสารทำความเย็นในอ่างบรรจุ

ในการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระเหยจำเป็นต้องเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายโอนความร้อนทั้งหมดได้แก่ การรับความร้อนและการคายความร้อนที่เกิดขึ้นจากสถานะของไหลที่เข้าและออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าว สมประสิทธิ์ - การถ่ายโอนความร้อนรวมและพื้นที่ผิวถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้จากการใช้สมดุลพลังงาน (Energy Balance) ในของไหลด้านร้อนและของไหลด้านเย็น โดยไม่พิจารณาความร้อนสูญเสียกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ รวมถึงอยู่ภายใต้กระบวนการการไหลแบบคงตัว (Steady Flow) ซึ่งอุณหภูมิของไหลด้านร้อนนั้นจะแตกต่างกันไปและแปรผันตามตำแหน่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะที่ของไหลด้านเย็นหรือสารทำความเย็นจะมีอุณหภูมิคงที่และมีความดันคงที่คือ สารทำความเย็นอัดตัวความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ จำเป็นต้องพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลด้านร้อนและด้านเย็น ด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสม (Log Mean Temperature Difference, LMTD) การถ่ายโอนความร้อนในเครื่องระเหยมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.21 และสามารถเขียนสมการอัตราการถ่ายโอนความร้อนทั้งหมดได้ดังสมการที่ (2-1) ดังนี้



รูปที่ 2.21 การแจกแจงอุณหภูมิในเครื่องระเหย

$$\dot{Q} = UA \left\{ \frac{(T_c - T_{h,i}) - (T_c - T_{h,o})}{\ln \left[\frac{(T_c - T_{h,i})}{(T_c - T_{h,o})} \right]} \right\} \quad (2-1)$$

โดยที่	\dot{Q}	แทน อัตราการถ่ายโอนความร้อน (W)
	U	แทน สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (W/m ² K)
	A	แทน พื้นที่การถ่ายโอนความร้อน (m ²)
	T _c	แทน อุณหภูมิของของไหลด้านเย็น (K)
	T _{h,i}	แทน อุณหภูมิของไหลด้านร้อนขาเข้า (K)
	T _{h,o}	แทน อุณหภูมิของไหลด้านร้อนขาออก (K)

2.4.2 การถ่ายโอนความร้อนในเครื่องระเหย

การถ่ายโอนความร้อนจากของไหลในท่อไปยังสารทำความเย็นให้เกิดการระเหย มีความต้านทานความร้อนอยู่ 3 ส่วนที่เกิดในเครื่องระเหย คือ ความต้านทานความร้อนของท่อไปยังสารทำความเย็น ความต้านทานความร้อนของผนังท่อและความต้านทานความร้อนของไหลในท่อ ทั้ง 3 ส่วนนี้จะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficients, U)

2.4.2.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม

ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมจะคำนวณจากค่าความต้านทานความร้อนรวม (Thermal Resistance) ของวัสดุหรือสารที่ทำการถ่ายโอนความร้อนผ่านทั้งหมด สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2-2) ดังนี้

$$UA = \frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{(R_i + R_A + R_B + \dots + R_o)} \quad (2-2)$$

การศึกษาวิจัยนี้จะถ่ายโอนความร้อนจากน้ำสะอาดในท่อผ่านท่อไปยังสารทำความเย็น ลักษณะกายภาพของการถ่ายโอนความร้อนจะอยู่บนรูปทรงกระบอก (Cylindrical Geometry) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของความต้านทานความร้อนรวมภายใต้รูปทรงกระบอกได้ดังสมการที่ (2-3) ดังนี้

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{UA} = \frac{1}{\alpha_i A_i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \dots + \frac{1}{\alpha_o A_o} \quad (2-3)$$

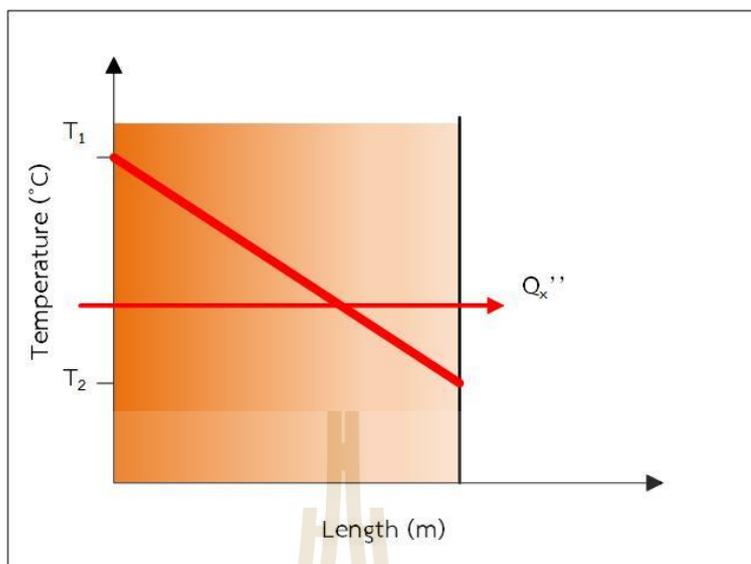
โดยที่	R_{total}	แทน ความต้านทานความร้อนรวม (K/W)
	U	แทน สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม ($\text{W/m}^2\text{K}$)
	α	แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2\text{K}$)
	k	แทน สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)
	A	แทน พื้นที่การถ่ายโอนความร้อน (m^2)
	L	แทน ความยาวของท่อ (m)
	r	แทน รัศมีของวัตถุ (m)

จากความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนความร้อนรวมและความต้านทานความร้อนรวม ภายใต้รูปทรงกระบอกซึ่งเป็นรูปร่างของท่อน้ำแข็งหลอดนั้น จำเป็นจะต้องพิจารณาถึงรูปร่างของท่อน้ำแข็ง ขนาดของท่อน้ำแข็ง การนำความร้อนผ่านท่อน้ำแข็ง สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อน้ำแข็ง การพาความร้อนของน้ำสะอาดภายในท่อ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำสะอาดภายในท่อน้ำแข็ง รวมถึงการถ่ายโอนความร้อนขณะเดือดของสารทำความเย็นที่อยู่รอบท่อน้ำแข็ง ซึ่งอธิบายดังต่อไปนี้

2.4.2.2 การนำความร้อน

การนำความร้อน (Heat Conduction) มีความหมายทางกายภาพคือการถ่ายโอนพลังงานความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยอาศัยตัวกลางหรือวัตถุที่ไม่มีการเคลื่อนที่ หรือการถ่ายโอนพลังงานภายในเนื้อวัตถุหรือวัตถุที่สัมผัสกันจากความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยกลไกการนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสารที่มีสถานะเป็นของแข็ง (Solid) ของเหลว (Liquid) และก๊าซ (Gas) ซึ่งปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนด้วยกลไกการนำความร้อนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อน รูปร่าง ขนาดของวัตถุและความแตกต่างของอุณหภูมิ สามารถประมาณการปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนด้วยการนำความร้อนจาก Fourier's Law ภายใต้สมมุติฐานการนำความร้อนใน 1 มิติสำหรับระบบพิกัดฉาก Incropera et al. (2007) ได้ดังรูปที่ 2.22 และสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2-4) ดังนี้

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2-4)$$



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิกับทิศทางการถ่ายโอนความร้อนภายใต้การนำความร้อน 1 มิติในระบบพิกัดฉาก

หากทำการพิจารณาความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (Heat Flux) เพื่อแสดงให้เห็นถึงอัตราความร้อนที่ถ่ายโอนด้วยการนำความร้อนใน 1 หน่วยพื้นที่ แสดงได้ดังสมการที่ (2-5) ดังนี้

$$\dot{Q}_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2-5)$$

ภายใต้รูปทรงกระบอกที่เป็นรูปร่างของท่อทำน้ำแข็งนั้น จำเป็นจะต้องพิจารณาถึงรูปร่างของท่อทำน้ำแข็ง ขนาดของท่อทำน้ำแข็ง สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อทำน้ำแข็งและความแตกต่างของอุณหภูมิจากพื้นผิวภายในกับพื้นผิวท่อกายนอก ได้การนำความร้อนผ่านท่อทำน้ำแข็งซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2-6) ดังนี้

$$\dot{Q} = \frac{2\pi kL(T_{is,tube} - T_{os,tube})}{\ln(r_{os,tube}/r_{is,tube})} \quad (2-6)$$

โดยที่ \dot{Q} แทน อัตราการถ่ายโอนความร้อน (W)

\dot{Q}_x แทน อัตราความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายโอนผ่านวัตถุในทิศทางแกน x (W)

\dot{Q}''_x	แทน อัตราความร้อนต่อพื้นที่ถ่ายโอนความร้อนผ่านวัตถุในทิศทางแกน x (W/m ²)
k	แทน สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m·K)
A	แทน พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน (m ²)
L	แทน ความยาวของวัตถุที่ถ่ายโอนความร้อน (m)
T _{is,tube}	แทน อุณหภูมิพื้นผิวภายในของท่อ (K)
T _{os,tube}	แทน อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของท่อ (K)
r _{is,tube}	แทน รัศมีพื้นผิวภายในของท่อ (m)
r _{os,tube}	แทน รัศมีพื้นผิวภายนอกของท่อ (m)
$\frac{dT}{dx}$	แทน ความแตกต่างอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ในช่วงที่พิจารณา (K/m)

2.4.2.3 การพาความร้อน

การถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อน จะอยู่ภายใต้กฎการทำความเย็นของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ที่เกิดจากของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวและมีความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ระหว่างพื้นผิวและของไหลที่ไหลผ่าน ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนด้วยการพาความร้อนขึ้น Özişik (1985) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของการพาความร้อนได้ดังสมการที่ (2-7) ดังนี้

$$\dot{Q} = \alpha A \Delta T \quad (2-7)$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective Heat Transfer Coefficient) ต้องพิจารณากลไกของการไหล ซึ่งการศึกษาวิจัยนี้เป็นการไหลของน้ำสะอาดที่ไหลเวียนภายในท่อ จึงทำการศึกษาเพียงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสำหรับการไหลในท่อ และอยู่ในรูปแบบการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) เนื่องจากน้ำไหลในท่อด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก พร้อมทั้งรูปแบบการไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ (Turbulent Flow Inside Tube) ทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนขึ้นกับตัวแปรต่าง ๆ ที่เขียนความสัมพันธ์ของสมการได้ดังสมการที่ (2-8) ดังนี้

$$\alpha = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Nu}) \quad (2-8)$$

ค่าเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) คือ ตัวแปรไร้มิติเป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงพฤติกรรมในการไหล กล่าวคือรูปแบบการไหลสำหรับของไหล แบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) มีค่าเรย์โนลด์ต่ำกว่า 2300 และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) มีค่าเรย์โนลด์สูงกว่า 4000 ซึ่งพิจารณาจากขอบเขตหน้าตัดของการไหล ความเร็วและความหนืดของของไหล โดยของไหลต่างชนิดและความเร็วต่างกันจะมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกันเมื่อค่าเรย์โนลด์เท่ากัน สามารถเขียนสมการของค่าเรย์โนลด์ ได้ดังสมการที่ (2-9) ดังนี้

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (2-9)$$

ค่าพริ้นด์เทิล (Prandtl Number, Pr) คือ ตัวแปรไร้มิติเป็นดัชนีที่แสดงถึงความสามารถทางด้านความร้อนของของไหล ที่ขึ้นกับค่าความจุความร้อน ค่าความหนืดสัมบูรณ์และค่าการนำความร้อนของของไหล ดังนั้นหากอุณหภูมิหรือความดันของของไหลเปลี่ยนแปลง จึงส่งผลให้ค่าพริ้นด์เทิลเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยจะส่งผลอย่างมากเมื่อของไหลมีสถานะเป็นของเหลวค่าพริ้นด์เทิลจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงมาก ในขณะที่ของไหลสถานะก๊าซนั้นค่าพริ้นด์เทิลจะค่อนข้างคงที่สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปของสมการได้ดังสมการที่ (2-10) ดังนี้

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2-10)$$

พิจารณาค่านัสเสล์ต (Nusselt Number, Nu) คือ ตัวแปรไร้มิติเป็นดัชนีที่แสดงถึงลักษณะการไหลและการถ่ายโอนความร้อนของของไหลที่ส่งผลต่อชั้นของขอบเขตของความร้อนที่แตกต่างกัน เมื่อของไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่าไหลผ่านพื้นผิวที่อุณหภูมิสูงกว่า จะเกิดชั้นความร้อนขึ้น ได้แก่ ชั้นของการนำความร้อนจากพื้นผิวไปยังของไหลที่ติดกับพื้นผิวและชั้นของการพาความร้อนจากของไหลไปสู่ของไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นหากลักษณะการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงส่งผลให้ชั้นของขอบเขตของความร้อนเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย หากพิจารณาการไหลในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วน ท่อผิวเรียบ (Smooth Pipe) และเป็น การไหลเต็มรูปแบบ (Fully Developed Flow) จะใช้ Dittus-Boelter Equation ในการกำหนดค่า นัสเสล์ต ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ของสมการได้ดังสมการที่ (2-11) ดังนี้

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (2-11)$$

สำหรับการทำความเย็น (Cooling) จะใช้ $n = 0.3$ และสำหรับการทำความร้อน (Heating) จะใช้ $n = 0.4$ จากนั้นเมื่อทราบ ค่าเรย์โนลด์ ค่าพรีนดท์เทิลและค่านัสเสลต์ พร้อมทั้งคุณสมบัติทางความร้อนต่าง ๆ ของของไหลแล้ว จะสามารถกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการได้ดังสมการที่ (2-12) ดังนี้

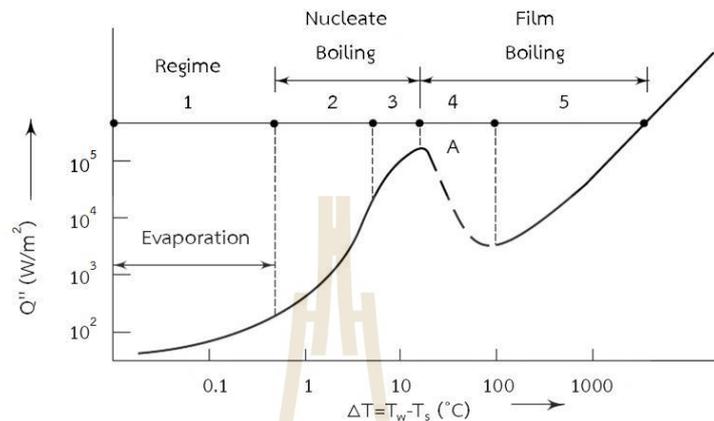
$$\alpha = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (2-12)$$

โดยที่	\dot{Q}	แทน อัตราการถ่ายโอนความร้อน (W)
	α	แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2K)
	Nu	แทน ค่านัสเสลต์
	Pr	แทน ค่าพรีนดท์เทิล
	Re	แทน ค่าเรย์โนลด์
	k	แทน ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m \cdot K$)
	μ	แทน ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Ns/m^2)
	ν	แทน ค่าความหนืดจลน์ (m^2/s)
	c_p	แทน ค่าความจุความร้อน ($kJ/kg \cdot K$)
	v	แทน ความเร็ว (m/s)
	A	แทน พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน (m^2)
	D	แทน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
	ΔT	แทน ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลและพื้นผิว (K)

2.4.2.4 การเดือดในอ่าง

กลไกของการเดือดของสารทำความเย็นเพื่อให้เกิดการระเหย มีอิทธิพลมาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น แรงตึงผิว อุณหภูมิอิ่มตัว ความร้อนแฝง ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของท่อ ซึ่งมีความซับซ้อนต่อการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดของสารทำความเย็น ในกระบวนการเดือดของสารทำความเย็นมีอยู่ 2 รูปแบบคือ การเดือดในอ่าง (Pool Boiling) คือ สารทำความเย็นจะอยู่ในเปลือกหรืออ่างบรรจุ และการเดือดด้วยการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection Boiling) Arora (2009) ในการศึกษาวิจัยนี้จะกล่าวถึงเพียง การเดือดในอ่างการเดือดในอ่าง (Pool Boiling) เกิดขึ้นกับเครื่องระเหยที่สารทำความเย็นในอ่างมีระดับท่วมท่อที่ติดตั้งในเครื่องดังกล่าว ในการเดือดของสารทำความเย็นที่อุณหภูมิอิ่มตัวนั้นมี 3 ช่วง แบ่งตามความสัมพันธ์ของความ

ร้อนต่อหน่วยพื้นที่กับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวท่อด้านนอกกับอุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำความเย็น เรียกว่า Wall Superheat ดังรูปที่ 2.23 ดังนี้



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ของความร้อนต่อหน่วยพื้นที่กับค่าความแตกต่างอุณหภูมิการเดือดในอ่าง

1) ช่วงเริ่มระเหย (Regime) เป็นการระเหยด้วยการพาความร้อนตามธรรมชาติจะเกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกของท่อที่สัมผัสกับสารทำความเย็นโดยไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิของผิวด้านนอกอยู่ในระดับที่สูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำความเย็นเล็กน้อยเพียงไม่กี่องศาหรือ Wall Superheat ต่ำที่สุด

2) ช่วงการเกิดฟอง (Nucleate Boiling) เป็นช่วงเกิดฟองและฟองแยกตัวออกมาจากผนังท่อด้านนอกซึ่งในช่วงหมายเลข 2 หรือเรียกว่า Discrete Nucleate Boiling นั้น Wall Superheat ยังมีค่าต่ำ จนกระทั่งเข้าสู่ช่วงหมายเลข 3 และไปถึงตำแหน่ง A ซึ่งเรียกตำแหน่งนี้ว่า พลักซ์ความร้อนสูงสุด (Peak Nucleate Heat Flux) ซึ่งในตำแหน่งนี้จะเริ่มเกิดขึ้นของการเดือดเคลือบผิวด้านนอกบางส่วน (Vapor Film)

3) ช่วงการเดือดเคลือบผิว (Film Boiling) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงหมายเลข 4 หรือเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงเปลี่ยนแปลงการเดือด (Transition Boiling) สารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัวบางส่วนจะสัมผัสกับผิวด้านนอก ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงจนถึงจุดต่ำที่สุดคือ Minimum Heat Flux และเข้าสู่ช่วงหมายเลข 5 เป็นช่วงการเดือดเคลือบผิว (Film Boiling) จะเกิดขึ้นของการเดือดเคลือบผิวด้านนอกของท่อทั้งหมดเกิดกลไกการถ่ายโอนความร้อนจากการนำความร้อนและการพาความร้อนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นของการเดือดและสารทำความเย็นสถานะอิ่มตัว

ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในขณะเดือดช่วงนี้ต่ำมาก แต่ค่า Wall Superheat สูงมาก จนอาจเกิดการหลอมละลายของวัสดุที่ใช้ทำผนังท่อ เป็นช่วงที่ควรหลีกเลี่ยงอย่างยิ่ง

การศึกษาวิจัยนี้จะพิจารณาช่วง การเดือดในช่วงการเกิดฟอง (Nucleate Boiling) เป็นช่วงที่ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (Heat Flux) แปรผันตรงตามค่า Wall Superheat และ ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายภายในเครื่องระเหย

2.4.2.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดช่วงการเกิดฟอง

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดช่วงการเกิดฟอง (Heat Transfer Coefficient for Nucleate Pool Boiling) Stephan and Abdelsalam (1980) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ของการเดือดช่วงการเกิดฟอง (Nucleate Boiling) ขึ้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำ สำหรับของไหลชนิดต่าง ๆ ซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพของของไหล มีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (2-13) ดังนี้

$$\frac{\alpha_{nb}d}{k_f} = 0.0546 \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\dot{q}_{load}d}{k_f T_{sat}} \right)^{-0.67} \left(\frac{h_{fg}d^2}{v_f^2} \right)^{0.248} \left(\frac{\rho_f - \rho_g}{\rho_f} \right)^{-4.33} \right] \quad (2-13)$$

เมื่อ d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองที่แยกตัวออกจากผิวด้านนอกของท่อ สามารถหาได้จากสมการที่ (2-14) ดังนี้

$$d = 0.0146\beta \left[\frac{2\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (2-14)$$

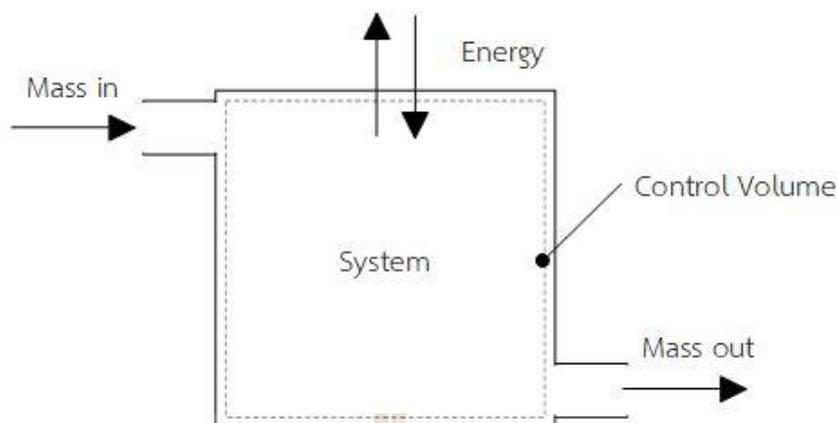
โดยที่	α_{nb}	แทน	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะเดือดช่วงการเกิดฟอง ($W/m^2 \cdot K$)
	d	แทน	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟอง (m)
	k_f	แทน	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำความเย็นของเหลวอิ่มตัว ($W/m \cdot K$)
	ρ_f	แทน	ความหนาแน่นของสารทำความเย็นในสถานะของเหลวอิ่มตัว (kg/m^3)
	ρ_g	แทน	ความหนาแน่นของสารทำความเย็นในสถานะไออิ่มตัว (kg/m^3)
	\dot{q}_{load}	แทน	ค่าความร้อนที่ถ่ายเทมายังสารทำความเย็น (W)
	T_{sat}	แทน	อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำความเย็นด้านความดันต่ำ (K)

Δh_{fg}	แทน เอนทาลปีที่ทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะเป็นไออิ่มตัว (kJ/kg)
V_f	แทน ความหนืดจลน์ของสารทำความเย็นในสถานะของเหลวอิ่มตัว (m^2/s)
σ	แทน แรงตึงผิวของสารทำความเย็น (N/m)
β	แทน ค่ามุมสัมผัสของฟองกับผนังด้านนอกของท่อ (degree)

กำหนดให้ค่ามุมสัมผัสของฟองอยู่ที่ 35° เพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณสำหรับของไหลทุกชนิด โดยไม่พิจารณาถึงค่าที่แท้จริง ซึ่งวิธีใช้ได้ทั้งสารจำพวกไฮโดรคาร์บอน สารพวกแอลลกอฮอล์ และสารทำละลายต่าง ๆ สำหรับการเดือดที่ ผิวด้านนอกของท่อ Stephan and Abdelsalam (1980)

2.5 แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์

จากกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด น้ำสะอาดไหลเวียนอยู่ในท่อทำน้ำแข็งหลอดถ่ายเทความร้อนผ่านท่อไปสู่สารทำความเย็น เพื่อลดอุณหภูมิน้ำสะอาดไปจนถึงอุณหภูมิน้ำเปลี่ยนสถานะไปเป็นน้ำแข็ง ทำให้เกิดน้ำแข็งและก่อตัวเกาะติดกับผิวด้านในของท่อทำน้ำแข็งหลอด ซึ่งไม่สามารถตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงในท่อทำน้ำแข็งได้ รวมไปถึงภาวะการทำความเย็น อัตราการเกิดน้ำแข็งภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดและอัตราการระเหยของสารทำความเย็น ในกระบวนการผลิตจริง เครื่องทำน้ำแข็งหลอดถูกกำหนดเวลาของกระบวนการทำความเย็นไว้คงที่ทุกรอบการผลิตภายใต้อุณหภูมิน้ำป้อนค่าหนึ่งที่อยู่ไว้ แต่ในความเป็นจริงอุณหภูมิน้ำป้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงทุกรอบการผลิต รวมไปถึงขนาดของเครื่องอัดไอที่อาจจะไม่เหมาะสมกับขนาดของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดเนื่องจากการศึกษาวิจัยภาวะการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดในอดีตขาดการพิจารณาช่วงลดอุณหภูมิน้ำป้อน ซึ่งเป็นช่วงที่มีผลสำคัญต่อพิจารณาคุณสมบัติของเครื่องอัดไอ ด้วยสาเหตุนี้ จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยนี้คือ นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ภาวะการทำความเย็นภายใต้ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด เพื่อหาระยะเวลาในกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาของน้ำแข็งหลอดที่เหมาะสมตามความต้องการผลิตและทราบภาวะการทำความเย็นที่แท้จริงสำหรับกระบวนการทำน้ำแข็งหลอด ผลลัพธ์จะนำไปสู่อัตราการระเหยของสารทำความเย็นซึ่งเป็นเครื่องมือในการกำหนดคุณสมบัติของเครื่องอัดไอที่เหมาะสม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) มาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งระบบที่ทำการวิเคราะห์นั้นเป็นระบบเปิด (Open System) เป็นระบบที่มีการถ่ายเทมวลและพลังงานผ่านขอบเขตของระบบที่กำหนดขึ้น



รูปที่ 2.24 ปริมาตรควบคุมสำหรับระบบเปิด

ในการวิเคราะห์กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบเปิด (Open System) จะต้องกำหนดขอบเขตของระบบหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปริมาตรควบคุม (Control Volume, CV) เป็นปริมาตรที่เราสนใจศึกษาหรือทำการวิเคราะห์ พื้นผิวของปริมาตรควบคุมนี้เรียกว่า พื้นผิวควบคุมจะประกอบไปด้วยพื้นผิวปิดเสมอ สามารถกำหนดขนาดและรูปร่างของปริมาตรควบคุมได้อย่างอิสระและเหมาะสมกับการวิเคราะห์ ปริมาตรควบคุมนี้สามารถเคลื่อนที่ ขยายตัว รวมทั้งหดตัวได้ ซึ่งมวลและพลังงานสามารถเคลื่อนที่หรือถ่ายโอนเข้าออกปริมาตรควบคุมได้ตลอดจนคุณสมบัติของมวลสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ กระบวนการในระบบเปิดสามารถแบ่งตามการไหลได้เป็น 2 ลักษณะคือ กระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว (Steady Flow Process) และกระบวนการที่มีการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow Process) เนื่องด้วยระบบเปิดที่ทำการวิเคราะห์นั้นมีการถ่ายโอนมวลและพลังงาน จึงจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงปรากฏการณ์ทั้ง 2 ลักษณะ โดยการถ่ายโอนมวลและพลังงานนั้นจะอยู่ภายใต้กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) ตามลำดับ Sonntag et al. (2003)

2.5.1 กฎการอนุรักษ์มวล

มวลภายในระบบเปิดหรือปริมาตรควบคุมจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมวลที่เข้าระบบแตกต่างจากมวลที่ออกจากระบบ กล่าวคือ เมื่อมวลที่เข้าระบบมากกว่ามวลที่ออกจากระบบจะทำให้มวลภายในระบบจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่มวลที่เข้าระบบน้อยกว่ามวลที่ออกจากระบบจะทำให้มวลภายในระบบลดลง มวลของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปจะเท่ากับผลต่างระหว่างมวลที่เข้าระบบและ

ออกจากระบบนั้น หลักการดังกล่าว เรียกว่า กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) และแสดงอยู่ในรูปสมการดังแสดงในสมการที่ (2-15) ดังนี้ ชีระชาติ (2558)

$$\sum m_{in} - \sum m_{out} = \Delta m_{CV} \quad (2-15)$$

โดยที่ $\sum m_{in}$ แทน ผลรวมมวลที่เข้าสู่ระบบ (kg)
 $\sum m_{out}$ แทน ผลรวมมวลที่ออกจากระบบ (kg)
 $\sum m_{CV}$ แทน มวลภายในระบบที่เปลี่ยนแปลงไป (kg)

2.5.1.1 กฎการอนุรักษ์มวลสำหรับกระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว

ในกระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว (Steady Flow Process) มวลภายในระบบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้มวลภายในระบบคงที่ตลอดกระบวนการ (m_{CV} is constant) นั่นคือ มวลที่ไหลเข้าสู่ระบบเท่ากับมวลที่ไหลออกจากระบบ

$$\sum m_{in} = \sum m_{out} \quad (2-16)$$

อุปกรณ์ทางวิศวกรรมจำนวนมากเมื่อทำงานต่อเนื่องไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง การทำงานของอุปกรณ์จะเข้าสู่การทำงานในลักษณะกระบวนการแบบสภาวะคงตัว (Steady State) และมีการไหลแบบคงตัว (Steady Flow) ได้แก่ เครื่องอัดไอ (Compressor) ท่อหัวฉีด (Nozzle) ท่อขยาย (Diffuser) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ห้องผสม (Mixing Chamber) วาล์วลดความดัน (Throttling Valve) และกังหัน (Turbine) เป็นต้น

2.5.1.2 กฎการอนุรักษ์มวลสำหรับกระบวนการที่มีการไหลแบบไม่คงตัว

ในกระบวนการที่มีการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow Process) มวลภายในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้มวลภายในระบบไม่คงที่ตลอดกระบวนการ (m_{CV} is Inconstant) นั่นคือ ผลต่างระหว่างมวลที่ไหลเข้าสู่ระบบกับมวลที่ไหลออกจากระบบจะเท่ากับมวลในระบบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไป ดังที่แสดงในสมการ (2-15)

2.5.2 กฎการอนุรักษ์พลังงาน

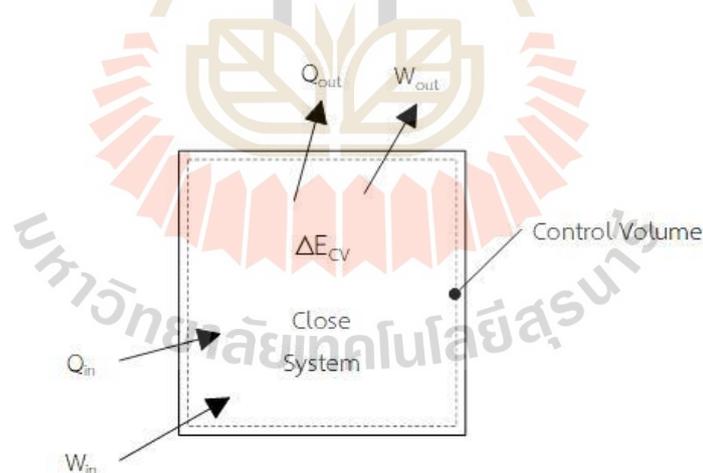
จากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ (The First Law of Thermodynamics) คือ พลังงานไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือถูกทำลายลงได้ แต่พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปได้ โดยหลักการ

อนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) หรือหลักการสมดุลพลังงาน (Energy Balance) สำหรับระบบใด ๆ ในระหว่างกระบวนการใด ๆ สามารถใช้ในการวิเคราะห์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับระบบ โดยหลักการสมดุลพลังงาน สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \quad (2-17)$$

2.5.2.1 กฎการอนุรักษ์พลังงานของระบบปิด

กฎการอนุรักษ์พลังงานของระบบปิด (Close System) เป็นระบบที่มีการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานสุทธิของระบบ โดยรูปแบบของพลังงานที่ระบบปิดถ่ายเทกับสิ่งแวดล้อมมี 2 รูปแบบคือ 1) พลังงานรูปแบบความร้อน และ 2) พลังงานรูปแบบงาน จึงกล่าวได้ว่า พลังงานสุทธิที่ระบบปิดได้รับจากสิ่งแวดล้อมคือผลรวมระหว่างพลังงานรูปความร้อนและพลังงานรูปแบบงาน ในขณะที่พลังงานสุทธิที่ระบบปิดให้แก่สิ่งแวดล้อมคือผลรวมระหว่างพลังงานรูปความร้อนและพลังงานรูปแบบงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 และสมการที่ (2-18) ตามลำดับ ดังนี้



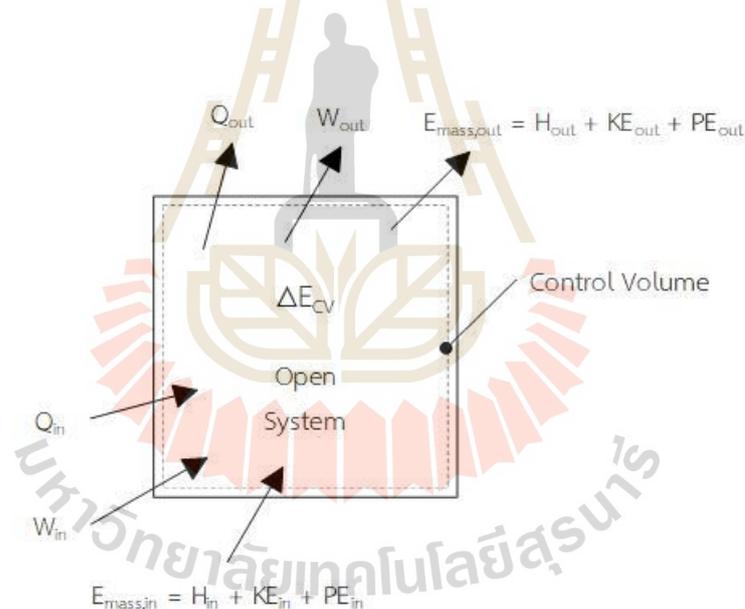
รูปที่ 2.25 การถ่ายเทพลังงานของระบบปิดและสิ่งแวดล้อม

$$\left[Q_{in} + W_{in} \right] - \left[Q_{out} + W_{out} \right] = \Delta E_{system} \quad (2-18)$$

โดยที่ Q แทน ความร้อน (kJ)
 W แทน งาน (kJ)
 ΔE_{system} แทน พลังงานสุทธิในระบบที่เปลี่ยนไปตลอดช่วงเวลา que ศึกษาระณา (kJ)

2.5.2.2 กฎการอนุรักษ์พลังงานของระบบเปิด

หากพิจารณากฎการอนุรักษ์พลังงานของระบบเปิดนั้น ระบบเปิดมีการถ่ายโอนพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานสุทธิของระบบ โดยรูปแบบของพลังงานที่ระบบเปิดถ่ายโอนกับสิ่งแวดล้อมมี 3 รูปแบบคือ 1) พลังงานรูปแบบความร้อน 2) พลังงานรูปแบบงาน และ 3) พลังงานจากการถ่ายโอนมวลระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม โดยระบบเปิดนั้นเมื่อเกิดการถ่ายโอนพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมจะเกิดกระบวนการขึ้นในระบบ ที่สามารถจำแนกออกเป็น 2 กระบวนการ ดังนี้



รูปที่ 2.26 การถ่ายเทพลังงานของระบบเปิดและสิ่งแวดล้อม

1) กฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบเปิดกระบวนการสถานะคงตัว

กระบวนการที่มีสถานะคงตัว (Steady State Process) เป็นกระบวนการที่พลังงานในระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งพลังงานในระบบประกอบไปด้วยพลังงานภายใน (Internal Energy, U) พลังงานจลน์ (Kinetic Energy, KE) และพลังงานศักย์ (Potential Energy, PE) โดยกระบวนการที่มีสถานะคงตัวทำให้พลังงานในระบบมีค่าคงที่

(E_{system} or E_{cv} is Constant) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบจึงเป็นศูนย์ ($\Delta E_{\text{cv}} = 0$) นั่นคือ พลังงานรวมสุทธิที่เข้าสู่ระบบจะเท่ากับพลังงานรวมสุทธิที่ออกจากระบบ สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$E_{\text{in}} = E_{\text{out}} \quad (2-19)$$

โดยที่ E_{in} แทน ผลรวมของพลังงานสุทธิที่ถ่ายโอนเข้าสู่ระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)

E_{out} แทน ผลรวมของพลังงานสุทธิที่ถ่ายโอนออกจากระบบที่ทำการพิจารณา (kJ)

ทำการพิจารณาพลังงานที่ถ่ายโอนผ่านปริมาตรควบคุม (Energy Transfer) และพลังงานโดยมวลที่เข้าและออกจากปริมาตรควบคุม (Energy by Mass) สำหรับระบบเปิด (Open System) ในสมการที่ (2-20) ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการถ่ายโอนพลังงานของระบบกับสิ่งแวดล้อมได้ดังนี้

$$\left[\dot{Q}_{\text{in}} + \dot{W}_{\text{in}} + \sum (\dot{H}_{\text{in}} + \dot{KE}_{\text{in}} + \dot{PE}_{\text{in}}) \right] = \left[\dot{Q}_{\text{out}} + \dot{W}_{\text{out}} + \sum (\dot{H}_{\text{out}} + \dot{KE}_{\text{out}} + \dot{PE}_{\text{out}}) \right] \quad (2-20)$$

- 2) กฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบเปิดกระบวนการสถานะไม่คงตัว สำหรับกระบวนการที่มีสถานะไม่คงตัว (Unsteady State Process)

เป็นกระบวนการที่พลังงานในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เป็นการวิเคราะห์ในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งจะมีลักษณะการวิเคราะห์ที่คล้ายกับระบบปิด แต่ในระบบเปิดที่มีสถานะไม่คงตัวจะมีการไหลไม่คงตัวทำให้มวลในระบบไม่คงที่ ในขณะที่มวลในระบบปิดจะคงที่เสมอ

ความแตกต่างของระบบเปิดที่มีสถานะคงตัวและระบบเปิดที่มีสถานะไม่คงตัว คือ ระบบเปิดที่มีสถานะคงตัวจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงพลังงานตามเวลา ($\Delta E_{\text{system}} = 0$) ในขณะที่ระบบเปิดที่มีสถานะไม่คงตัวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบในช่วงที่พิจารณา ($\Delta E_{\text{system}} \neq 0$) โดยหลักการสมดุลพลังงานสำหรับกระบวนการที่มีสถานะไม่คงตัว สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

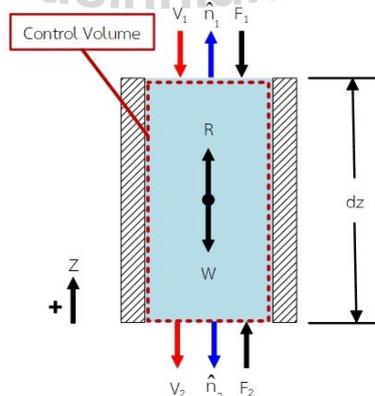
$$\left[\dot{Q}_{\text{in}} + \dot{W}_{\text{in}} + \sum (\dot{H}_{\text{in}} + \dot{KE}_{\text{in}} + \dot{PE}_{\text{in}}) \right] - \left[\dot{Q}_{\text{out}} + \dot{W}_{\text{out}} + \sum (\dot{H}_{\text{out}} + \dot{KE}_{\text{out}} + \dot{PE}_{\text{out}}) \right] = \Delta E_{\text{system}} \quad (2-21)$$

โดยที่	ΔE_{system}	แทน พลังงานสุทธิในระบบที่เปลี่ยนไปตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา (kJ)
	Q	แทน ความร้อน (kJ)
	W	แทน งาน (kJ)
	H	แทน เอนทาลปี (kJ)
	KE	แทน พลังงานจลน์ (kJ)
	PE	แทน พลังงานศักย์ (kJ)

2.6 สมการโมเมนตัมเชิงเส้น

กระบวนการทำความเย็นสำหรับการผลิตน้ำแข็งหลอด น้ำสะอาดจากถาดน้ำเย็นด้านบนไหลลงผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอดด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งอยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศ ส่งผลให้ความเร็วของน้ำสะอาดเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดการไหลในท่อ ซึ่งไม่สามารถตรวจวัดความเร็วของน้ำสะอาดได้ ด้วยสาเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องอาศัยสมการโมเมนตัมเชิงเส้น (The Linear Momentum Equation) มาใช้ในการวิเคราะห์ ระบบที่ทำการวิเคราะห์นั้นคล้ายคลึงกับกฎการอนุรักษ์มวล เป็นระบบเปิด (Open System) ที่มีการถ่ายโอนมวลและพลังงานผ่านขอบเขตของระบบที่กำหนดขึ้น

ในการวิเคราะห์จะต้องการกำหนดขอบเขตของระบบหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปริมาตรควบคุม เป็นปริมาตรที่เราสนใจศึกษาหรือทำการวิเคราะห์ พื้นผิวของปริมาตรควบคุมนี้เรียกว่า พื้นผิวควบคุมจะประกอบไปด้วยพื้นผิวปิดเสมอ สามารถกำหนดขนาดและรูปร่างของปริมาตรควบคุมได้อย่างอิสระและเหมาะสมกับการวิเคราะห์ ปริมาตรควบคุมนี้สามารถเคลื่อนที่ ขยายตัวและหดตัวได้ ซึ่งมวลและพลังงานสามารถเคลื่อนที่หรือถ่ายโอนเข้าออกปริมาตรควบคุมได้ตลอดจนคุณสมบัติของมวลสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ ปริมาตรควบคุมของระบบเปิด ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ปริมาตรควบคุมของระบบเปิดเพื่อพิจารณากฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law) พิจารณาปริมาตรควบคุม (Control Volume, CV) ณ เวลาชั่วขณะหนึ่ง ให้สสารภายในปริมาตรควบคุมเป็นระบบ แรงที่กระทำกับระบบและแรงที่กระทำภายในระบบจะเท่ากัน เรียกว่า สมดุลแรง

$$\sum F_{\text{sys}} = \sum F_{\text{content_coincident_CV}} \quad (2-22)$$

แรงที่กระทำกับระบบพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้น ซึ่งเป็นผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้นภายในปริมาตรควบคุมกับอัตราของโมเมนตัมเชิงเส้นสุทธิที่ผ่านพื้นผิวควบคุม (Control Surface, CS) ดังนี้

$$\frac{D}{Dt} \int_{\text{sys}} v \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{CV}} v \rho dV + \int_{\text{CS}} v \rho v \cdot \hat{n} dA \quad (2-23)$$

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Newton's law of motion) หรือเรียกว่า สมการโมเมนตัมเชิงเส้น (Linear Momentum Equation) พิจารณาได้ดังนี้

2.6.1 ปริมาตรควบคุมคงรูปและไม่มีการเคลื่อนที่

กำหนดให้สสารภายในปริมาตรควบคุมเป็นระบบ หากระบบอยู่นิ่ง (Fixed) ไม่มีการเคลื่อนที่และคงรูป (Nondeforming) ภายใต้การไหลแบบคงตัว พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้นภายในปริมาตรควบคุมเท่ากับศูนย์

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{CV}} v \rho dV = 0 \quad (2-25)$$

ดังนั้น สมการโมเมนตัมเชิงเส้นสำหรับปริมาตรควบคุมคงรูปและไม่มีการเคลื่อนที่ภายใต้การไหลแบบคงตัว พิจารณาได้ดังนี้

$$\int_{\text{CS}} v \rho v \cdot \hat{n} dA = \sum F_{\text{content_coincident_CV}} \quad (2-26)$$

2.6.2 ปริมาตรควบคุมคงรูปและมีการเคลื่อนที่

กำหนดให้สสารภายในปริมาตรควบคุมเป็นระบบ หากระบบมีการเคลื่อนที่ (Moving) และคงรูป (Nondeforming) พิจารณาได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} v \rho dV + \int_{CS} v \rho v_{RE} \cdot \hat{n} dA = \sum F_{\text{content_coincident_CV}} \quad (2-27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} (v_{RE} + v_{CV}) \rho dV + \int_{CS} (v_{RE} + v_{CV}) \rho v_{RE} \cdot \hat{n} dA = \sum F_{\text{content_coincident_CV}} \quad (2-28)$$

2.6.2.1 ปริมาตรควบคุมมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่และเป็นการไหลแบบคงตัว

พิจารณาให้อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้นภายในปริมาตรควบคุมเท่ากับศูนย์ เนื่องจากปริมาตรควบคุมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่และเป็นการไหลแบบคงตัว

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} (v_{RE} + v_{CV}) \rho dV = 0 \quad (2-29)$$

ในขณะเดียวกันพิจารณาอัตราของโมเมนตัมเชิงเส้นสุทธิที่ผ่านพื้นผิวควบคุม ภายใต้พื้นผิวควบคุมขนาดคงที่ได้ดังนี้

$$\int_{CS} (v_{RE} + v_{CV}) \rho v_{RE} \cdot \hat{n} dA = \int_{CS} v_{RE} \rho v_{RE} \cdot \hat{n} dA + v_{CV} \int_{CS} \rho v_{RE} \cdot \hat{n} dA \quad (2-30)$$

สำหรับการไหลแบบคงตัวพิจารณาให้อัตราของโมเมนตัมเชิงเส้นที่ผ่านพื้นผิวควบคุมด้วยความเร็วของปริมาตรควบคุมคงที่ อัตราของโมเมนตัมเชิงเส้นนี้มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\int_{CS} \rho v_{RE} \cdot \hat{n} dA = 0 \quad (2-31)$$

ดังนั้น สมการโมเมนตัมเชิงเส้นสำหรับปริมาตรควบคุมมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่และเป็นการไหลแบบคงตัว พิจารณาได้ดังนี้

$$\int_{CS} V_{RE} \rho V_{RE} \cdot \hat{n} dA = \sum F_{content_coincident_CV} \quad 2-32$$

โดยที่ $F_{content_coincident_CV}$ แทน แรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม (N)

V_{RE} แทน ความเร็วสัมพัทธ์ (m/s)

V_{CV} แทน ความเร็วปริมาตรควบคุม (m/s)

V แทน ความเร็วสัมบูรณ์ (m/s)

ρ แทน ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

\hat{n} แทน เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวควบคุม

dA แทน พื้นที่ของพื้นผิวควบคุม (m^2)

dV แทน ปริมาตรของปริมาตรควบคุม (m^3)

2.7 ปรีทัศน์วรรณกรรม

Tangthieng (2010) ทำการศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับผลกระทบของรอบเวลาการผลิตต่อการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด ทำการวิเคราะห์ระบบใน 1 มิติในทิศทางรัศมีภายใต้สภาวะไม่คงตัว สมการควบคุมประกอบด้วยน้ำแข็งและผนังท่อทำน้ำแข็ง โดยเป็นการพาความร้อนที่ผิวด้านนอกของท่อทำน้ำแข็งและที่ผิวน้ำแข็งสัมผัสกับน้ำเกิดการเปลี่ยนสถานะที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal) แปลงสมการควบคุมให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ จากนั้นทำการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขสำหรับความหนาแน่นของน้ำแข็งด้วยวิธีผลต่างจำกัด คำนวณค่าภาระการทำความร้อนพร้อมทั้งอัตราการใช้พลังงานและการใช้พลังงานจำเพาะตลอดระยะเวลาของกระบวนการผลิตน้ำแข็ง แล้วทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากการตรวจวัดที่โรงงาน พบว่า มีความแม่นยำเชิงคุณภาพ ซึ่งใช้พลังงานเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 5.8 kJ/min และการใช้พลังงานจำเพาะเฉลี่ยต่ำสุดที่ 0.341 kJ/g ที่รอบเวลาผลิต 14 นาที จากเวลาในกระบวนการผลิตน้ำแข็ง 28 นาที งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึง การใช้พลังงานในการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดที่ความหนาแน่นของน้ำแข็งมีค่ามากเพื่อให้ได้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่เหมาะสมจากคุณสมบัติความต้านทานความร้อนของน้ำแข็ง อีกทั้งงานวิจัยนี้ขาดการพิจารณาอิทธิพลของน้ำที่ไหลเวียนในท่อทำน้ำแข็งและช่วงการลดอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดภาระการทำความร้อนสูงและมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงด้วย

Wu et al. (2012) ทำการศึกษากาโรไหลของพลังงานในการทอดแผ่นมันฝรั่งทอดกรอบโดยสร้างแบบจำลองจากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์เทียบกับข้อมูลตรวจวัดจากการผลิตจริง โดย

การสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่หม้อทอด (Flyer) ภายใต้กระบวนการไหลที่คงตัวและสภาวะคงตัว (Steady Flow and Steady State) ที่ใช้น้ำมันดอกทานตะวันเป็นของไหลให้ความร้อนแก่แผ่นฝรังแผ่นที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ในช่วง 170 ถึง 190 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำมันดอกทานตะวันจะรับพลังงานความร้อนจากก๊าซไอเสียจากเตาเผาที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากนั้นน้ำมันดอกทานตะวันที่มีความร้อนสูงจะเข้าสู่หม้อทอดและให้ความร้อนแก่แผ่นมันฝรั่งเพื่อทำการระเหยน้ำออกจากมันฝรั่งแผ่นให้เหลือความชื้นในมันฝรั่งแผ่นไม่เกิน 2% โดยมวล และมีน้ำมันบางส่วนระเหยและผสมกับอากาศไปยังเตาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเชื้อเพลิงหลักของเตาเผาที่เกิดการเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิง 16.5:1 จากนั้นแผ่นมันฝรั่งทอดกรอบจะถูกนำไปปรุงรสและบรรจุเพื่อจำหน่ายต่อไป ผลการศึกษาวิจัยพบว่า ในกระบวนการทอด พลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะใช้ในการระเหยน้ำออกจากแผ่นมันฝรั่งทอดกรอบ คิดเป็น 90% ของพลังงานที่เข้าหม้อทอด เพื่อลดความชื้นให้ได้ตามที่กำหนด และพลังงานส่วนอื่นๆ ที่ใช้รองลงมาจะเป็นน้ำมันที่ระเหยผสมกับอากาศไปยังเตาเผา รวมทั้งความร้อนสูญเสียของหม้อทอดโดยกลไกการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนกับสิ่งแวดล้อม และพลังงานความร้อนจากไอน้ำไหลออกจากหม้อทอดไปยังเตาเผา งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ภายใต้สภาวะคงตัวที่สามารถทำนายพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการทอดแผ่นมันฝรั่งทอดกรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับการตรวจวัดข้อมูลการผลิตจริง เป็นแนวทางที่ประยุกต์ใช้ได้กับการศึกษาวิจัยต่อไป

Pannucharoenwong et al. (2016) ทำการกำหนดวิธีเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตในด้านการอนุรักษ์พลังงานในการผลิตน้ำแข็งหลอด ในเครื่องที่มีกำลังการผลิต 50 ตันต่อวัน มีแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต 5 แนวทางได้แก่ การลดอุณหภูมิน้ำป้อนโดยการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การหุ้มฉนวนถึงน้ำเย็นด้านล่างของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด การบำรุงรักษาระบบทำความเย็นและระบบระบายอากาศ การใช้งานเครื่องสูบน้ำเย็นระบบ VSD การทำหลังคาคลุมถึงเก็บน้ำสะอาด พบว่า ทั้ง 5 วิธีการสามารถประหยัดพลังงานไปมากถึง 84,154 หน่วยต่อปีต่อเครื่อง และมีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี โดยวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าสู่เครื่องทำน้ำแข็ง ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ 50% ของการประหยัดพลังงานทั้งหมด ตามด้วยวิธีการบำรุงรักษาระบบทำความเย็นและระบบระบายอากาศที่สามารถประหยัดพลังงานได้ 22% งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึง อิทธิพลของอุณหภูมิน้ำป้อนที่สัมพันธ์กับการใช้พลังงานของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดและเป็นวิธีการประหยัดพลังงานที่เกิดประสิทธิภาพสูงในเชิงปฏิบัติ แต่ไม่ได้พิจารณาในทางทฤษฎีซึ่งเป็นแนวทางที่สามารถนำไปศึกษาวิจัยต่อไปได้

ภูวนาด (2547) ทำการศึกษาการระเหยและอัตราการผลิตน้ำแข็งหลอด เนื่องด้วยการระเหยจะส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานของระบบทำความเย็น จึงทำการปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตน้ำแข็งหลอดโดยวิธีการตกแต่งผิวท่อด้านที่สัมผัสกับ

สารทำความเย็นให้มีผิวท่อซุซุระ เพื่อหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนผ่านท่อน้ำแข็งหลอดและอัตราการผลิตน้ำแข็งหลอดเมื่อเทียบกับเวลาของท่อตกแต่งผิวซุซุระเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ โดยการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำแข็งผ่านท่อน้ำแข็งไปสู่สารทำความเย็นจะพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ การนำความร้อนผ่านน้ำแข็งและท่อน้ำแข็ง การถ่ายโอนความร้อนในขณะที่มีการเดือดในช่วงการเกิดฟอง (Nucleate Pool Boiling) ของท่อผิวเรียบและท่อที่ตกแต่งผิวซุซุระ จากนั้นทำการหาอัตราการร้อนที่ถ่ายโอนผ่านท่อน้ำแข็งหลอดและอัตราการผลิตน้ำแข็งเทียบกับเวลา โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขคือวิธีการซิมป์สัน ภายใต้สภาวะใกล้เคียงสภาวะคงตัว (Quasi-Steady State) แล้วทำการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณของท่อผิวเรียบและผิวตกแต่งซุซุระกับการตรวจวัดเก็บข้อมูลที่โรงงานน้ำแข็ง พบว่า ผลการคำนวณสอดคล้องกับการตรวจวัดในเชิงคุณภาพ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เกิดความคลาดเคลื่อนในช่วงแรกสูงถึง 200% และในช่วงท้ายคลาดเคลื่อน 17% เนื่องจากการกำหนดคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแอมโมเนียและท่อไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลง รวมถึงการใช้สมมุติฐานสภาวะใกล้เคียงสภาวะคงตัวที่ใช้ในกระบวนการก่อตัวของน้ำแข็ง งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึง อัตราการเกิดน้ำแข็งหลอดและการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดนั้นระบบไม่ได้อยู่ในสภาวะใกล้เคียงสภาวะคงตัวตลอดเวลา รวมถึงไม่ได้คิดอิทธิพลของพลังงานที่เกิดจากการไหลเวียนของน้ำในท่อน้ำแข็งและช่วงการลดอุณหภูมิน้ำที่มีการเกิดภาวการทำความเย็นที่สูงด้วย สามารถนำข้อมูลการตรวจวัดจริงของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดอัตราการผลิตเต็มพิกัด 30 ตันต่อวันไปทดสอบแบบจำลองได้และสามารถนำแนวคิดการถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการเดือดช่วงการเกิดฟองไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาวิจัยได้

นันทวัฒน์ (2548) ทำการศึกษาเชิงเลขของผลกระทบจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ออัตราการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยการจำลองการแข็งตัวของน้ำแข็งหลอดด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบปริยาย (Fully Implicit Method) ในระบบพิกัดฉากช่วงที่ความหนาของน้ำแข็งมีค่าน้อยรวมทั้งรัศมี ความโค้งผนังท่อที่มีค่ามากจนสามารถพิจารณาผนังท่อเสมือนแผ่นเรียบได้ และจำลองการแข็งตัวของน้ำแข็งหลอดด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบปริยายในระบบพิกัดเชิงขั้วช่วงที่ความหนาของน้ำแข็งมีค่ามาก เปรียบเทียบกับวิธีความซิมิลาริตี (Similarity Method) ร่วมกับการใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการเดือดช่วงการเกิดฟองของแอมโมเนีย พบว่า ผลการก่อตัวของน้ำแข็งที่ได้จากวิธีความซิมิลาริตีสอดคล้องกับผลที่ได้จากวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบปริยายในระบบพิกัดฉากและพิกัดเชิงขั้ว ในช่วง 3 วินาทีแรกเท่านั้น เมื่อเวลาผ่านไปผลในระบบพิกัดฉากและพิกัดเชิงขั้วมีค่ามากกว่าวิธีความซิมิลาริตี ความหนาของน้ำแข็งจากการคำนวณเทียบกับการตรวจวัดสอดคล้องกันในเชิงคุณภาพและที่ความหนาสุดท้ายคลาดเคลื่อนไป 4% หรือมากกว่าการตรวจวัด 0.5 มิลลิเมตร สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนขณะเดือดของแอมโมเนียส่งผลกระทบต่อการผลิตน้ำแข็งหลอด หากเพิ่มหรือลดอุณหภูมิอิมมัตวแอมโมเนีย 0.5 องศาเซลเซียสจะทำให้อัตราการก่อตัวของ

น้ำแข็งหลอตเปลี่ยนไป 8% และภาระการทำความเย็นช่วง 10 นาทีแรกจะสูงเป็น 2 เท่าของช่วงหลัง และลดลงจนสิ้นสุดกระบวนการ งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึง การพิจารณาการก่อตัวของน้ำแข็งในระบบ พักตฉากแมนยำน้อยกว่าพักตเชิงั่ว เนื่องจากกายภาพของน้ำแข็งหลอตสอดคล้องกับพักตเชิงั่ว อีกทั้งการประมาณการเชิงเลขด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องแบบปริยายในระบบพักตเชิงั่วสำหรับการก่อตัวของน้ำแข็งหลอตมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีความซิมิลาริตี้ ในช่วงที่มีความหนามาก โดยงานวิจัยไม่ได้คิด อิทธิพลของพลังงานที่เกิดจากการไหลเวียนของน้ำในท่อทำน้ำแข็งและช่วงการลดยุณหภูมิที่มีการ เกิดภาระการทำความเย็นที่สูงด้วยจึงทำให้วิธีการเชิงเลขนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนในช่วงกระบวนการ ก่อตัวของน้ำแข็งในช่วงแรกที่สูง

ธีรวัฒน์ และ ธีระชาติ (2556) ทำการนำเสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ กระบวนการต้มและอุ่นแบบหลายขั้นตอนที่มีความสัมพันธ์ร่วมกันทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อให้ทราบ ถึงปริมาณไอหัวหม้อที่จ่ายไปยังหม้ออุ่นและหม้อต้มชุดถัดไป และมีความสอดคล้องต่อความต้องการ ที่แท้จริงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์เหล่านั้น โดยใช้วิธีการสมดุลมวลและสมดุล พลังงาน ภายใต้กระบวนการสภาวะคงตัว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ จากนั้น แก้ปัญหาระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานด้วยวิธีแทนค่าลำดับ (Sequential Simulation) พบว่า จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่สร้างขึ้น ให้ทราบถึงปริมาณการใช้ไอน้ำ ที่คำนวณได้ต่ำกว่าปริมาณไอน้ำที่ใช้ในระบบจริง เนื่องจากมีการถดถอยของประสิทธิภาพการถ่ายเท ความร้อนของอุปกรณ์ จึงทำให้ระบบจริงใช้ไอน้ำมากกว่าแบบจำลอง งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึง แนว ทางการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ภายใต้สภาวะคงตัวของระบบทางความร้อนขนาดใหญ่ รวมถึงการแก้ระบบสมการด้วยวิธีแทนค่าลำดับ (Sequential Simulation) ไปประยุกต์ใช้ในการ ศึกษาวิจัยต่อไป แต่แบบจำลองในงานวิจัยนี้ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ภายใต้สภาวะไม่คงตัว ของกระบวนการดังกล่าวได้

ณัฐดนัย และคณะ (2556) ทำการศึกษาเชิงทดลองของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการแข็งตัวของ น้ำแข็งหลอตเทียบกับค่าจากการคำนวณ ประกอบด้วย อุณหภูมิไอน้ำป้อน อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศ รอบนอก อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอตและอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวของน้ำแข็ง โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ดังกล่าวที่ความหนาของน้ำแข็งค่าต่างๆ ด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอน ความร้อนขณะเดือดของช่วงเกิดฟองบนท่อผิวเรียบ เพื่อหาอัตราความร้อนที่ผ่านท่อน้ำแข็งพร้อมทั้ง กำหนดอุณหภูมิผิวท่อด้านนอก ณ ความหนาแน่นน้ำแข็งค่าต่างๆ จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างความ หนาของน้ำแข็งกับเวลาสำหรับการผลิตน้ำแข็งหลอตโดยใช้วิธีของซิมป์สัน เนื่องจากสัมประสิทธิ์การ ถ่ายโอนความร้อนขณะเดือดของช่วงเกิดฟองบนท่อผิวเรียบเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิผิวท่อด้านนอก และอุณหภูมิอิมตัวของสารทำความเย็นซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของน้ำแข็งค่าต่างๆ พบว่า ความหนา ของน้ำแข็งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ เพิ่มขึ้นตามเวลาและอัตราการผลิตลดลงช่วงท้ายการ

ผลิต รวมถึงเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ความหนาของน้ำแข็งสุดท้ายจะไม่เท่ากัน พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบมากที่สุดได้แก่ อุณหภูมิน้ำป้อน ส่วนพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบน้อยได้แก่ อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศรอบนอก อุณหภูมิเฉลี่ยบรรยากาศห้องเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดและอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวของน้ำแข็ง และผลการคำนวณทางทฤษฎีคลาดเคลื่อนกับการทดลอง 8% งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของอุณหภูมิน้ำป้อนที่มีผลต่อความหนาของน้ำแข็งหลอดอยู่มากและยังไม่ได้มีการศึกษาในทางทฤษฎี เป็นแนวทางที่สามารถนำไปศึกษาวิจัยต่อไปได้

ศศิธร และ ชีระชาติ (2560) ทำการนำเสนอแนวทางการหาอัตราการใช้น้ำในช่วงฆ่าเชื้อของน้ำมะพร้าวกระป๋อง เนื่องจากเป็นช่วงที่มีความสำคัญและใช้ระยะเวลาที่นานที่สุด แบ่งกระบวนการฆ่าเชื้อออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการไล่อากาศและช่วงการฆ่าเชื้อ หาอัตราการใช้น้ำจากการสมมูลมวลและสมมูลพลังงานตามหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์นี้จะอ้างอิงสภาวะการผลิตจริงเพื่อให้ได้แบบจำลองที่สอดคล้องกับสภาวะจริง จำเป็นจะต้องทราบอุณหภูมิและความหนาแน่นของไอน้ำในสภาวะที่ 2 เพื่อหาอัตราการใช้น้ำในแต่ละช่วง จึงจำเป็นต้องจำลองระบบสมการด้วยวิธีแทนค่าอย่างต่อเนื่อง (Successive Substitution) พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นของกระบวนการฆ่าเชื้อที่ต้องรักษาอุณหภูมิและความดันให้คงที่ตามมาตรฐานจะใช้น้ำต่ำกว่าอัตราการใช้น้ำเฉลี่ย 13.8% เนื่องจากอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยนั้นพิจารณาตลอดกระบวนการแต่ค่าที่ได้จากแบบจำลองพิจารณาช่วงฆ่าเชื้อเท่านั้น งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึง การพิจารณากระบวนการออกเป็นช่วงย่อย ๆ เพื่อให้ง่ายต่อการจำลองระบบ รวมถึงแนวทางในการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ภายใต้สภาวะไม่คงตัวของระบบขนาดใหญ่และวิธีการแก้ระบบสมการด้วยวิธีแทนค่าต่อเนื่อง (Successive Simulation) ไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดแบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของกระบวนการทำความเย็น ได้แก่ หอทำน้ำแข็งหลอด ท่อทำน้ำแข็งหลอด ถังน้ำเย็นด้านล่างและการถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำกับสารทำความเย็น รวมไปถึงการจำลองระบบทางความร้อนของกระบวนการทำความเย็น ดังต่อไปนี้

3.1 กระบวนการทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด

กระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด คือ เมื่อน้ำป้อนเข้าสู่ถังน้ำเย็นด้านล่างในหอทำน้ำแข็งหลอด น้ำป้อนจะถูกสูบด้วยเครื่องสูบน้ำส่งไปยังถาดน้ำด้านบนและไหลลงเข้าสู่ท่อทำน้ำแข็งหลอดด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ในขณะเดียวกันน้ำที่ไหลในท่อจะถ่ายโอนความร้อนภายใต้ความดันบรรยากาศผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอดไปยังสารทำความเย็นเหลวที่อยู่ล้อมรอบท่อทำน้ำแข็งหลอด ภายใต้สภาวะของสารทำความเย็นเหลวที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ ทำให้น้ำถูกลดอุณหภูมิจนกระทั่งน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งยึดติดที่ผิวท่อทำน้ำแข็งหลอด ซึ่งกระบวนการทำความเย็นจะทำงานด้วยวัฏจักรอัดไอและรับภาระการทำความเย็นต่อเนื่องกันทั้งน้ำแข็งหลอดมีความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดเป็นไปตามความต้องการผลิต หลักการถ่ายโอนความร้อนที่แตกต่างกันในกระบวนการทำความเย็น จึงแบ่งกระบวนการออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

3.1.1 ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ

น้ำป้อนที่เข้าสู่หอทำน้ำแข็งหลอดและไหลเวียนผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอดที่มีสารทำความเย็นเหลวล้อมรอบจะถูกทำความเย็นภายใต้ความดันบรรยากาศ เพื่อลดอุณหภูมิภายในหอทำน้ำแข็งหลอดไปสู่ 0 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำไปสู่สารทำความเย็นเหลวด้วยกลไกการพาความร้อนผ่านน้ำ การนำความร้อนผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอดและการพาความร้อนขณะเดือดผ่านสารทำความเย็น

3.1.2 ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด

น้ำภายในหอทำน้ำแข็งหลอดที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ถูกทำความเย็นต่อเนื่องภายใต้ความดันบรรยากาศ ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งยึดติดที่ผิวท่อทำน้ำแข็งหลอดและเพิ่มความหนาขึ้นต่อเนื่องตลอดกระบวนการทำความเย็นจนกระทั่งได้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอด

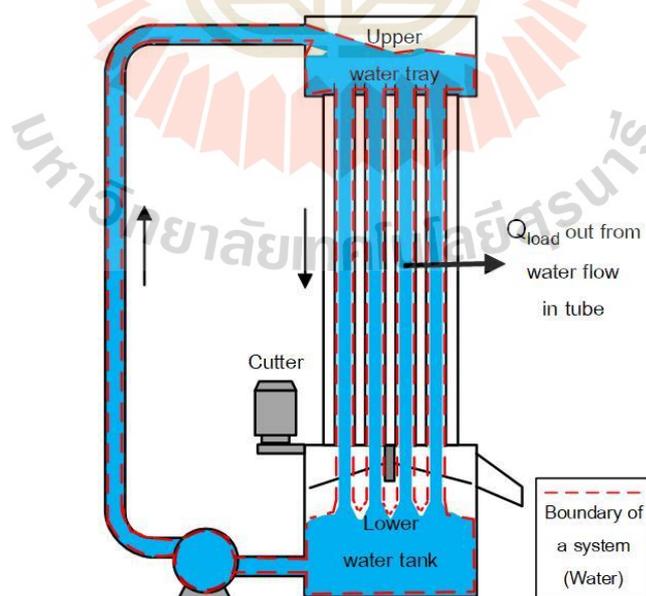
ตามความต้องการผลิต ซึ่งเกิดการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำไปสู่สารทำความเย็นเหลวด้วยกลไกการนำความร้อนผ่านน้ำแข็งหลอด การนำความร้อนผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอดและการพาความร้อนขณะเดือดผ่านสารทำความเย็น

การศึกษานี้จึงสร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์จากวิธีสมดุลมวลและสมดุลพลังงานเพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต รวมไปถึงวิเคราะห์ภาระการทำความเย็นที่เกิดขึ้นจากการถ่ายโอนความร้อนของน้ำไปสู่สารทำความเย็นตลอดระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น ทั้งในช่วงการลดอุณหภูมิและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ผลลัพธ์ของภาระการทำความเย็นนี้จะนำไปสู่อัตราการระเหยของสารทำความเย็น ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้นำเสนอแนวทางการกำหนดอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอที่เหมาะสมกับเครื่องทำน้ำแข็งหลอด

3.2 แบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของกระบวนการทำความเย็น

3.2.1 แบบจำลองของท่อทำน้ำแข็งหลอดด้านน้ำ

พิจารณาท่อทำน้ำแข็งหลอด โดยให้น้ำภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดเป็นระบบ ซึ่งเป็นระบบมวลคงที่ (fixed mass) เนื่องจากไม่มีการถ่ายโอนมวลน้ำเข้าและออกจากระบบ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบควบคุมมวลน้ำภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด

3.2.3.1 ช่วงการลดอุณหภูมิของหอทำน้ำแข็งหลอด

จากรูปที่ 3.1 แสดงน้ำในหอทำน้ำแข็งหลอด โดยพิจารณาน้ำเป็นระบบ และมวลน้ำคงที่ จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำภายในระบบ ($\Delta m_{\text{sys}} = 0$) สร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์จากการสมดุลพลังงาน เพื่อหาอุณหภูมิของน้ำภายในหอทำน้ำแข็งหลอดที่เปลี่ยนแปลงไป จากอุณหภูมิน้ำป้อนสู่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาของช่วงการลดอุณหภูมิ

- 1) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ โดยพิจารณาให้
 - ไม่มีพลังงานเข้าสู่ระบบ เนื่องจากไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ
 - พลังงานที่ออกจากระบบคือ ความร้อนที่น้ำถ่ายโอนให้แก่สารทำความเย็น ไม่มีงานถ่ายโอนออกจากระบบ
 - ระบบอยู่นิ่ง (Stationary System) จึงไม่เกิดความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ ในขณะที่เดียวกันการทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ

$$-\sum_{j=1}^n Q_{\text{Load}}^j = U_{w,t+\Delta t} - U_{w,t} \quad (3-1)$$

จากสมการที่ (3-1) ความร้อนที่น้ำถ่ายโอนให้สารทำความเย็นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของน้ำ จึงพิจารณารูปการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในดังกล่าวเพื่อหาอุณหภูมิภายในหอทำน้ำแข็งหลอดที่เปลี่ยนแปลงไป ดังสมการที่ (3-2)

$$T_{w,t+\Delta t} = T_{w,t} - \left(\frac{\sum_{j=1}^n Q_{\text{Load}}^j}{m_{w,\text{sys}} c_{p,w}} \right) \quad (3-2)$$

3.2.3.2 ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดของหอทำน้ำแข็งหลอด

จากรูปที่ 3.1 ระบบควบคุมมวลน้ำในหอทำน้ำแข็งหลอด สร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน เพื่อหาความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดและภาระการทำความเย็นตลอดช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดภายใต้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต

1) สมดุลมวลจากมวลควบคุม เพื่อหาความหนาของน้ำแข็งหลุดจากมวลน้ำแข็งที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยพิจารณาให้

- ไม่มีมวลน้ำที่เข้าและออกจากระบบ ทำให้ $m_{in} = m_{out} = 0$
- มวลน้ำที่ลดลงเท่ากับมวลน้ำแข็งหลุดที่เกิดขึ้นในระบบ กล่าวคือ มวลน้ำที่ลดลงเป็นมวลน้ำที่เปลี่ยนสถานะไปเป็นน้ำแข็งหลุดรวมที่ก่อตัวขึ้นภายในท่อทำน้ำแข็ง หลุดทุกท่อน พิจารณาความหนาของน้ำแข็งหลุด ดังสมการที่ (3-3)

$$\Delta r_i = r_{i,c,t} - r_{i,c,t+\Delta t} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \Delta m_i^j}{\rho_i \pi z}} \quad (3-3)$$

2) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ เพื่อหาความร้อนที่ถ่ายโอนจากน้ำไปสู่สารทำความเย็น โดยพิจารณาให้

- ไม่มีพลังงานเข้าสู่ระบบ เนื่องจากไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนเข้าระบบ
- พลังงานที่ออกจากระบบคือ ความร้อนที่ถ่ายโอนจากน้ำไปสู่สารทำความเย็น ไม่มีงานถ่ายโอนออกจากระบบ
- ระบบอยู่นิ่ง ไม่มีความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ ขณะเดียวกันการทำความเย็นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบจากการเปลี่ยนสถานะของน้ำไปเป็นน้ำแข็งหลุดภายใต้ความดันบรรยากาศ

$$-\sum_{j=1}^n Q_{Load}^j = (U_{w,t+\Delta t} - U_{w,t}) + (U_{i,t+\Delta t} - U_{i,t}) \quad (3-4)$$

จากสมการที่ (3-4) ความร้อนที่น้ำถ่ายโอนไปสู่สารทำความเย็นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของน้ำและน้ำแข็งหลุด จึงพิจารณาในรูปพลังงานภายในจำเพาะ โดยพลังงานภายในจำเพาะของน้ำและน้ำแข็งหลุดมีค่าคงที่ตลอดช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลุด เนื่องจากภายในหอทำน้ำแข็งหลุดอยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศ หาผลรวมมวลน้ำแข็งหลุดที่เกิดขึ้นในท่อทำน้ำแข็งหลุดทุกท่อน จัดรูปสมการที่ (3-4) ได้

$$\sum_{j=1}^n \Delta m_i^j = \frac{\sum_{j=1}^n Q_{\text{Load}}^j}{(u_w - u_i)} \quad (3-5)$$

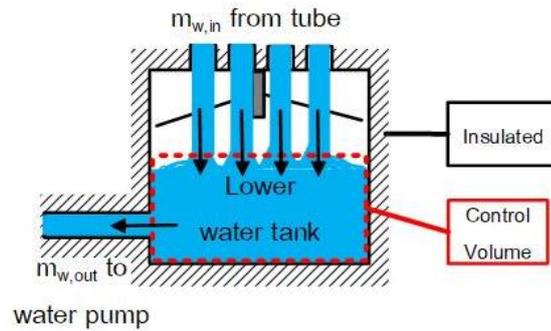
โดยที่	Q_{Load}^j	แทน ความร้อนที่ถ่ายโอนของท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อย (kJ)
	$U_{w,t+\Delta t}$	แทน พลังงานภายในของน้ำที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป (kJ)
	$U_{w,t}$	แทน พลังงานภายในของน้ำที่เวลาเริ่มต้น (kJ)
	$U_{i,t+\Delta t}$	แทน พลังงานภายในของน้ำแข็งที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป (kJ)
	$U_{i,t}$	แทน พลังงานภายในของน้ำแข็งที่เวลาเริ่มต้น (kJ)
	u_w	แทน พลังงานภายในจำเพาะของน้ำ (kJ/kg)
	u_i	แทน พลังงานภายในจำเพาะของน้ำแข็ง (kJ/kg)
	$c_{p,w}$	แทน ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg°C)
	ρ_i	แทน ค่าความหนาแน่นของน้ำแข็ง (kg/m ³)
	$T_{w,t+\Delta t}$	แทน อุณหภูมิของน้ำที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป (°C)
	$T_{w,t}$	แทน อุณหภูมิของน้ำที่เวลาเริ่มต้น (°C)
	$m_{w,\text{sys}}$	แทน มวลน้ำในระบบ (kg)
	Δm_i^j	แทน มวลน้ำแข็งที่ก่อตัวภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อย (kg)
	z	แทน ความยาวท่อทำน้ำแข็งหลอด (m)
	Δr_i	แทน ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอด (m)
	$r_{i,t+\Delta t}$	แทน รัศมีพื้นผิวภายในน้ำแข็งหลอดที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป (m)
	$r_{i,t}$	แทน รัศมีพื้นผิวภายในน้ำแข็งหลอดที่เวลาเริ่มต้น (m)
	n	แทน จำนวนท่อส่วนย่อยภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด

3.2.2 แบบจำลองของถังน้ำด้านล่าง

พิจารณาถังน้ำด้านล่าง ทำการสร้างปริมาตรควบคุมของระบบ แสดงดังรูปที่ 3.2

3.2.2.1 ช่วงการลดอุณหภูมิของถังน้ำเย็นด้านล่าง

จากรูปที่ 3.2 ปริมาตรควบคุมของระบบภายในถังน้ำเย็น เมื่อระบบคือน้ำ พิจารณาให้เป็นระบบเปิดเนื่องจากการถ่ายโอนมวลน้ำเข้าและออกจากระบบ และเป็นการไหลแบบคงตัว (Steady Flow) สร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาระยะเวลาช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ



รูปที่ 3.2 ปริมาตรควบคุมน้ำภายในถังน้ำด้านล่างในหอทำน้ำแข็งหลอด

- 1) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ โดยพิจารณาให้
 - ไม่พิจารณาความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่เข้าและออกจากระบบ เนื่องจากการไหลแบบคงตัวจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและความแตกต่างของความสูงที่เข้าและออกจากระบบมีค่าน้อยมาก
 - พลังงานที่เข้าสู่ระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ไหลเข้าสู่ระบบ ($E_{in} = \dot{m}_{w,in} h_{w,in}$) ไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ
 - พลังงานที่ออกจากระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ออกจากระบบ ($E_{out} = \dot{m}_{w,out} h_{w,out}$) ไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนออกจากระบบ
 - ระบบอยู่นิ่ง ไม่มีความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ ขณะเดียวกันมีความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำที่เข้าและออกจากระบบ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบขึ้น

$$\dot{m}_{w,in} h_{w,in} - \dot{m}_{w,out} h_{w,out} = \frac{1}{\Delta t} \left(m_{w,t+\Delta t} u_{w,t+\Delta t} - m_{w,t} u_{w,t} \right) \quad (3-6)$$

จากสมการที่ (3-6) การไหลของน้ำที่เข้าและออกจากถังน้ำด้านล่าง อยู่ภายใต้การไหลแบบคงตัว (Steady flow) ส่งผลให้มวลน้ำที่อยู่ภายในปริมาตรควบคุมมีมวลคงที่ ตลอดช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ โดยผลต่างอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าและออกจากระบบส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ จึงพิจารณาอุณหภูมิน้ำที่เข้าและออกจากระบบพร้อมทั้งอุณหภูมิน้ำภายในระบบที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำภายในระบบ ดังกล่าว ดังสมการที่ (3-7)

$$\Delta t = \frac{m_{w,tank} c_{p,w} (T_{w,t+\Delta t} - T_{w,t})}{\dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,in} - T_{w,out})} \quad (3-7)$$

3.2.2.2 ช่วงการก่อดำของน้ำแข็งหลอดของถังน้ำเย็นด้านล่าง

จากรูปที่ 3.2 ปริมาตรควบคุมของระบบภายในถังน้ำด้านล่าง เมื่อระบบคือน้ำ พิจารณาเป็นระบบเปิด เนื่องจากมีมวลน้ำเข้าและออกจากระบบ สร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ในการก่อดำของน้ำแข็งหลอดกระทั่งได้ความหนาที่ต้องการผลิต

1) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ โดยพิจารณาให้

- ไม่พิจารณาความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่เข้าและออกจากระบบ เนื่องจากการไหลแบบคงตัวจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและความแตกต่างของความสูงที่เข้าและออกจากระบบมีค่าน้อยมาก

- พลังงานที่เข้าสู่ระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ไหลเข้าสู่ระบบ ไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ

- พลังงานที่ออกจากระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ไหลออกจากระบบ ไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนออกจากระบบ

- ระบบอยู่นิ่ง ไม่มีความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ ขณะที่มวลน้ำที่เข้าและออกจากระบบไหลไม่คงตัว พลังงานภายในระบบจึงมีการเปลี่ยนแปลง

$$\dot{m}_{w,in} h_{w,in} - \dot{m}_{w,out} h_{w,out} = \frac{1}{\Delta t} (m_{w,t+\Delta t} u_{w,t+\Delta t} - m_{w,t} u_{w,t}) \quad (3-8)$$

จากสมการที่ (3-8) ภายใต้กระบวนการอุณหภูมิน้ำคงที่ 0 องศาเซลเซียส มวลน้ำในระบบที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับมวลน้ำที่เปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง เห็นได้จากความแตกต่างของมวลน้ำที่เข้าและออกจากถังน้ำ จึงพิจารณามวลน้ำที่เปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง เพื่อหาระยะเวลาที่ก่อดำน้ำแข็งหลอดกระทั่งน้ำแข็งหลอดมีความหนาตามที่ต้องการผลิต ดังสมการที่ (3-9)

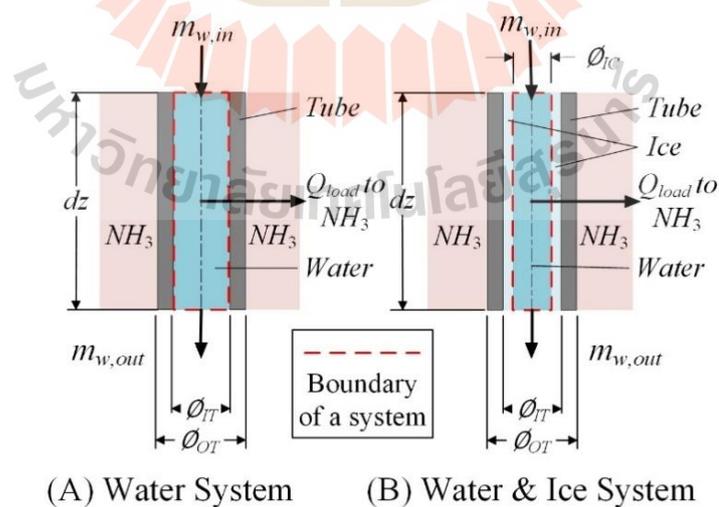
$$\Delta t = \frac{u_w \left(\sum_{j=1}^n \Delta m_i^j \right)}{h_w (\dot{m}_{w,in} - \dot{m}_{w,out})} \quad (3-9)$$

โดยที่

$\dot{m}_{w,in}$	แทน อัตราการไหลโดยมวลของน้ำเข้าสู่ระบบ (kg/s)
$\dot{m}_{w,out}$	แทน อัตราการไหลโดยมวลของน้ำออกจากระบบ (kg/s)
\dot{m}_w	แทน อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ (kg/s)
$m_{w,t+\Delta t}$	แทน มวลน้ำภายในระบบที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป (kg)
$m_{w,t}$	แทน มวลน้ำภายในระบบที่เวลาเริ่มต้น (kg)
$h_{w,in}$	แทน เอนทาลปีจำเพาะของน้ำที่เข้าสู่ระบบ (kJ/kg)
$h_{w,out}$	แทน เอนทาลปีจำเพาะของน้ำที่ออกจากระบบ (kJ/kg)
h_w	แทน เอนทาลปีจำเพาะของน้ำ (kJ/kg)
u_w	แทน พลังงานภายในจำเพาะของน้ำ (kJ/kg)
$T_{w,in}$	แทน อุณหภูมิน้ำที่เข้าสู่ระบบ ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{w,out}$	แทน อุณหภูมิน้ำที่ออกจากระบบ ($^{\circ}\text{C}$)
$m_{w,tank}$	แทน มวลน้ำภายในถังน้ำเย็นด้านล่าง (kg)
Δt	แทน ระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (s)

3.2.3 แบบจำลองของท่อทำน้ำแข็งหลอด

สร้างปริมาตรควบคุมระบบในท่อทำน้ำแข็งหลอดที่แบ่งเป็นส่วนย่อย ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ปริมาตรควบคุมน้ำภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด

3.2.3.1 ช่วงการลดอุณหภูมิของท่อทำน้ำแข็งหลอด

จากรูปที่ 3.3 (A) ปริมาตรควบคุมของระบบภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด เมื่อระบบคือน้ำ พิจารณาเป็นระบบเปิด เนื่องจากมีการถ่ายโอนมวลน้ำเข้าและออกจากระบบ สร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาความร้อนที่น้ำถ่ายโอนแก่สารทำความเย็นตลอดระยะเวลาที่ใช้ในช่วงการลดอุณหภูมิในท่อทำน้ำแข็งหลอด จากอุณหภูมิที่ป้อนไปสู่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

1) สมดุลมวลจากปริมาตรควบคุม เพื่อหามวลที่ไหลผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอด พิจารณาให้เป็นการไหลแบบคงตัว (Steady flow)

$$m_{w,in}^j = m_{w,out}^j = m_w^j \quad (3-10)$$

2) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ เพื่อหาความร้อนที่น้ำถ่ายโอนไปสู่สารทำความเย็นของท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อย โดยพิจารณาให้

- พลังงานที่เข้าสู่ระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ไหลเข้าสู่ระบบ ไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ
- พลังงานที่ออกจากระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ไหลออกจากระบบและความร้อนที่ถ่ายโอนจากระบบ ไม่มีงานถ่ายออกจากระบบ
- ระบบอยู่ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady State) ไม่มีความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบรวมไปถึงไม่เกิดความแตกต่างของพลังงานภายในระบบ

$$Q_{Load}^j = \left[m_{w,in}^j h_{w,in}^j + \frac{1}{2} m_{w,in}^j (v_{w,in}^j)^2 + m_{w,in}^j g z_{w,in}^j \right] - \left[m_{w,out}^j h_{w,out}^j + \frac{1}{2} m_{w,out}^j (v_{w,out}^j)^2 + m_{w,out}^j g z_{w,out}^j \right] \quad (3-11)$$

พิจารณาสมการที่ (3-11) ให้ความร้อนที่น้ำถ่ายโอนไปสู่สารทำความเย็นของท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อยอยู่ในรูปของอุณหภูมิและผลรวมพลังงานจลน์กับพลังงานศักย์จำเพาะ (KP^j) ดังนี้

$$Q_{Load}^j = m_w^j \left[c_{p,w} (T_{w,in}^j - T_{w,out}^j) + (KP^j) \right] \quad (3-12)$$

เมื่อผลรวมพลังงานจลน์กับพลังงานศักย์จำเพาะ พิจารณาได้ดังนี้

$$KP^j = \left[\frac{(v_{w,in}^j)^2 - (v_{w,out}^j)^2}{2} \right] + \left[g(z_{w,in}^j - z_{w,out}^j) \right] \quad (3-13)$$

3.2.3.2 ช่วงการก่อกวนของน้ำแข็งหลอดของท่อทำน้ำแข็งหลอด

จากรูปที่ 3.3 (B) ปริมาตรควบคุมของระบบภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด เมื่อระบบคือ น้ำและน้ำแข็งหลอด พิจารณาให้เป็นระบบเปิด เนื่องจากมีการถ่ายโอนมวลน้ำเข้าและออกจากระบบ สร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาความหนาของน้ำแข็งหลอดและความร้อนที่น้ำถ่ายโอนแก่สารทำความเย็นตลอดระยะเวลาที่ใช้ในช่วงการก่อกวนของน้ำแข็งหลอด

1) สมดุลมวลจากปริมาตรควบคุม เพื่อหาความหนาของน้ำแข็งหลอด พิจารณาให้เป็นการไหลไม่คงตัว (Unsteady flow) เนื่องจากมวลน้ำในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง

$$m_{w,in}^j - m_{w,out}^j = (m_{i,t+\Delta t}^j - m_{i,t}^j) \quad (3-14)$$

จากสมการที่ (3-14) พิจารณาความหนาของน้ำแข็งหลอดที่เกิดขึ้นในท่อส่วนย่อยจากมวลน้ำแข็งหลอดที่เกิดขึ้นภายในท่อส่วนย่อย ดังสมการที่ (3-15)

$$\Delta r_i^j = r_{iC,t}^j - r_{iC,t+\Delta t}^j = \sqrt{\frac{\Delta m_i^j}{\rho_i \pi dz_i^j}} \quad (3-15)$$

2) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ เพื่อหาความร้อนที่น้ำถ่ายโอนไปสู่สารทำความเย็นของท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อย โดยพิจารณาให้

- พลังงานที่เข้าสู่ระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ไหลเข้าสู่ระบบ ไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ
- พลังงานที่ออกจากระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ออกจากระบบ และความร้อนที่ถ่ายโอนออกจากระบบ ไม่มีงานถ่ายโอนออกจากระบบ

- ระบบอยู่นิ่ง ไม่มีความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ ขณะที่มวลน้ำที่เข้าและออกจากระบบไหลไม่คงตัว พลังงานภายในระบบจึงเปลี่ยนแปลง

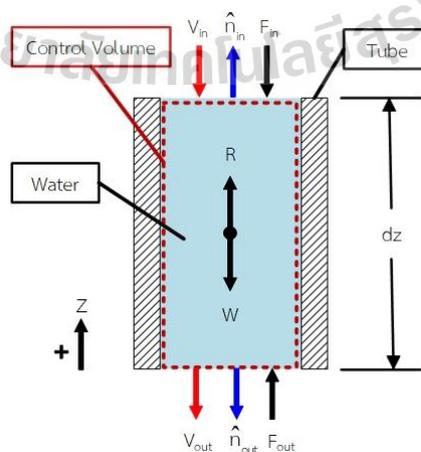
$$Q_{\text{Load}}^j = \left[m_{w,\text{in}}^j h_{w,\text{in}}^j + \frac{1}{2} m_{w,\text{in}}^j (v_{w,\text{in}}^j)^2 + m_{w,\text{in}}^j g z_{w,\text{in}}^j \right] - \left[m_{w,\text{out}}^j h_{w,\text{out}}^j + \frac{1}{2} m_{w,\text{out}}^j (v_{w,\text{out}}^j)^2 + m_{w,\text{out}}^j g z_{w,\text{out}}^j \right] - \left[m_{i,t+\Delta t}^j u_{i,t+\Delta t} - m_{i,t}^j u_{i,t} \right] \quad (3-16)$$

พิจารณาสมการที่ (3-16) ให้ความร้อนที่น้ำถ่ายโอนไปสู่สารทำความเย็นของท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อยอยู่ในรูปของมวลน้ำแข็งที่เกิดขึ้นและผลรวมพลังงานจลน์กับพลังงานศักย์จำเพาะ (KP^j) ดังนี้

$$Q_{\text{Load}}^j = \Delta m_i^j \left[u_w - u_i + \frac{(v_{w,\text{out}}^j)^2}{2} \right] + m_{w,\text{in}}^j [KP^j] \quad (3-17)$$

3.2.3.3 ความเร็วของน้ำภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดตลอดความยาว

สร้างปริมาตรควบคุมของระบบ เมื่อระบบคือ น้ำภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดที่ถูกแบ่งเป็นส่วนย่อยและพิจารณาเป็นระบบเปิด เนื่องจากมีน้ำเข้าและออกจากระบบ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ปริมาตรควบคุมน้ำสำหรับการสมดุลแรงภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อย

จากรูปที่ 3.4 ปริมาตรควบคุมของระบบภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด สร้างแบบจำลองเพื่อหาความเร็วของน้ำที่ออกจากท่อส่วนย่อยตลอดช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด โดยใช้สมการโมเมนตัมเชิงเส้น มีสมมุติฐานให้ปริมาตรควบคุมคงที่ การไหลของน้ำเป็นแบบคงตัวและไม่เกิดแรงเสียดทานในการไหล เนื่องจากในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งปริมาตรน้ำภายในท่อเปลี่ยนแปลงน้อยมากและท่อทำน้ำแข็งหลอดมีพื้นผิวเรียบ (Smooth pipe) เมื่อพิจารณาภายใต้สมมุติฐานดังกล่าว ได้สมการโมเมนตัมเชิงเส้น ดังนี้

$$(-v_{w,in}^j)(-m_{w,in}^j) + (-v_{w,out}^j)(m_{w,out}^j) = -W_w^j \quad (3-18)$$

จากสมการที่ (3-18) จัดรูปสมการเพื่อหาความเร็วของน้ำที่ออกจากท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อยที่พิจารณา ได้ดังนี้

$$v_{w,out}^j = v_{w,in}^j + \frac{gdz^j}{v_{w,in}^j} \quad (3-19)$$

โดยที่	KP^j	แทน ผลรวมของพลังงานจลน์จำเพาะและพลังงานศักย์จำเพาะ (kJ/kg)
	$m_{i,t+\Delta t}^j$	แทน มวลน้ำแข็งภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อยที่เวลาเริ่มต้น (kg)
	$m_{i,t}^j$	แทน มวลน้ำแข็งภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อยที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป (kg)
	W_w^j	แทน น้ำหนักของน้ำในท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อย (kg)
	dz^j	แทน ความยาวท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อย (m)
	$z_{w,in}^j$	แทน ความสูงของตำแหน่งที่น้ำเข้าสู่ระบบ (m)
	$z_{w,out}^j$	แทน ความสูงของตำแหน่งที่น้ำออกจากระบบ (m)
	g	แทน แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

3.2.4 การถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำกับสารทำความเย็น

การถ่ายโอนความร้อนนี้มีพฤติกรรมเสมือนกับการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องระเหย (Evaporator) คือ การถ่ายโอนความร้อนจากของไหลด้านร้อนไปสู่ของไหลด้านเย็นที่มีอุณหภูมิคงที่ (Constant cold fluid temperature) ดังนั้นการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Modeling)

3.2.4.1 การถ่ายโอนความร้อนช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ

จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อัตราการถ่ายโอนความร้อนและความร้อนที่ถ่ายโอนจากน้ำไปสู่สารทำความเย็นแสดงดังสมการที่ (3-20) และ (3-21) ตามลำดับ

$$\dot{Q}_{\text{Load}}^j = U_d A \left(T_{w,\text{avg}}^j - T_{\text{NH}_3} \right) \quad (3-20)$$

$$Q_{\text{Load}}^j = U_d A \left(T_{w,\text{avg}}^j - T_{\text{NH}_3} \right) \Delta t \quad (3-21)$$

เมื่อความยาวท่อที่พิจารณามีค่าน้อย (dz^j) ทำให้สามารถพิจารณาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำได้เป็น

$$T_{w,\text{avg}}^j = \frac{T_{w,\text{in}}^j + T_{w,\text{out}}^j}{2} \quad (3-22)$$

ให้สมการที่ (3-12) เท่ากับสมการที่ (3-21) และแทนสมการที่ (3-22) ลงในสมการดังกล่าว จากนั้นทำการจัดรูปสมการเพื่อหาอุณหภูมิน้ำที่ออกจากปริมาตรควบคุม

$$T_{w,\text{out}}^j = \left\{ \frac{1}{\left[\left(\frac{U_d A^j}{2} \right) + \left(\frac{m_w^j C_{p,w}}{\Delta t} \right) \right]} \left[U_d A^j \left(T_{\text{NH}_3} - \frac{T_{w,\text{in}}^j}{2} \right) \right] \right\} \left\{ + \frac{m_w^j}{\Delta t} \left[\left(C_{p,w} T_{w,\text{in}}^j \right) + (K P^j) \right] \right\} \quad (3-23)$$

จากรูปที่ 3.3 (A) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมกับพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนของน้ำที่เกิดการถ่ายโอนความร้อนผ่านท่อทำน้ำแข็งตลอดไปยังสารทำความเย็น พิจารณาจากผลรวมความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนของน้ำ ความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนของท่อทำน้ำแข็งตลอดและความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนขณะเดือดของสารทำความเย็น ดังสมการที่ (3-24)

$$UdA^j = \frac{1}{\left\{ \left[\frac{1}{2\pi r_{\Pi} dz^j \alpha_w^j} \right] + \left[\frac{\ln(r_{OT}/r_{\Pi})}{2\pi dz^j k_{Tube}} \right] + \left[\frac{1}{2\pi r_{OT} dz^j \alpha_{NH_3}^j} \right] \right\}} \quad (3-24)$$

3.2.4.2 การถ่ายโอนความร้อนช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด

น้ำอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสถูกทำความเย็นต่อเนื่องภายใต้ความดันบรรยากาศ จึงพิจารณาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำกับสารทำความเย็นอิมตัวมีค่าคงที่ตลอดช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อัตราการถ่ายโอนความร้อนและความร้อนที่ถ่ายโอนจากน้ำไปสู่สารทำความเย็นของท่อส่วนย่อยได้แสดงดังสมการที่ (3-25) และ (3-26)

$$\dot{Q}_{Load}^j = UdA \left(T_w^j - T_{NH_3} \right) \quad (3-25)$$

$$Q_{Load}^j = UdA \left(T_w^j - T_{NH_3} \right) \Delta t \quad (3-26)$$

จากสมการที่ (3-26) ความร้อนที่ถ่ายโอนจากน้ำไปสู่สารทำความเย็นที่เกิดขึ้นของท่อส่วนย่อยนี้จะนำไปสู่มวลน้ำแข็งหลอดที่เกิดขึ้น จึงให้สมการที่ (3-17) เท่ากับสมการที่ (3-26) จากนั้นจัดรูปสมการเพื่อหามวลน้ำแข็งหลอดที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุม ดังสมการที่ (3-27)

$$\Delta m_i^j = \frac{\left[UdA^j \left(T_w - T_{NH_3} \right) \Delta t - m_{w,in}^j \left(KP^j \right) \right]}{\left[\left(u_w - u_i \right) + \left(\frac{v_{w,out}^j}{2} \right)^2 \right]} \quad (3-27)$$

จากรูปที่ 3.4 (B) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมกับพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนของน้ำที่เกิดการถ่ายโอนความร้อนผ่านน้ำแข็งหลอดและท่อทำน้ำแข็งหลอดไปยังสารทำความเย็น พิจารณาเพียงผลรวมความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนผ่านน้ำแข็งหลอดที่เกาะกับผิวด้านในของท่อ ความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนผ่านท่อและความต้านทาน

ความร้อนจากการพาความร้อนขณะเดือดของสารทำความเย็น เนื่องจากความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนของน้ำที่ไหลเวียนนั้นไม่เกิดความแตกต่างอุณหภูมิน้ำและพื้นผิวภายในน้ำแข็งหลอด

$$UdA^j = \frac{1}{\left\{ \frac{\ln(r_{IT}/r_{IC,t}^j)}{2\pi dz^j k_i} + \frac{\ln(r_{OT}/r_{IT})}{2\pi dz^j k_{Tube}} + \left[\frac{1}{2\pi r_{OT} dz^j \alpha_{NH_3}^j} \right] \right\}} \quad (3-28)$$

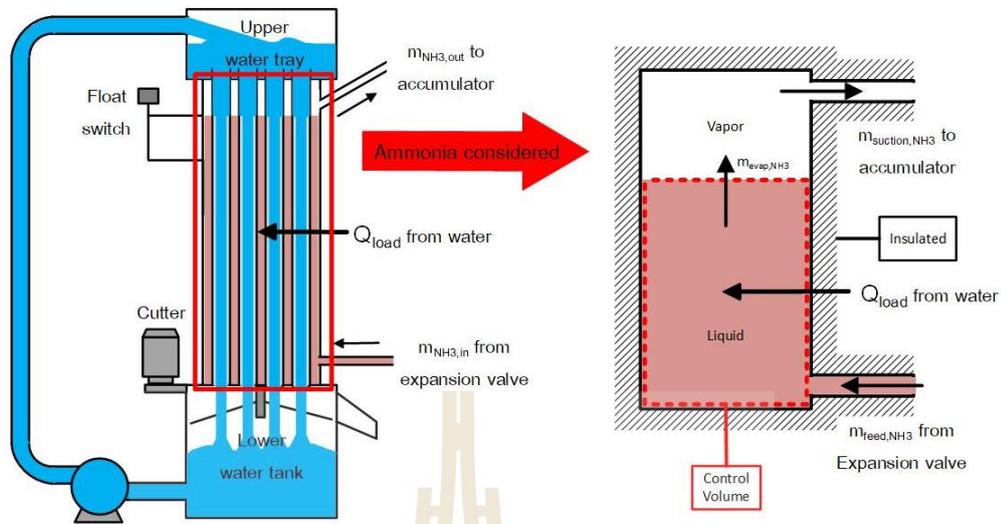
โดยที่	\dot{Q}_{Load}^j	แทน อัตราการถ่ายโอนความร้อน (kW)
	U	แทน สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (kW/m ² °C)
	dA^j	แทน พื้นที่ส่วนย่อยในการถ่ายโอนความร้อน (m ²)
	T_w	แทน อุณหภูมิของน้ำ (°C)
	$T_{w,avg}^j$	แทน อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดส่วนย่อย (°C)
	T_{NH_3}	แทน อุณหภูมิของแอมโมเนีย (°C)
	α_w^j	แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำ (kW/m ² °C)
	$\alpha_{NH_3}^j$	แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแอมโมเนีย (kW/m ² °C)
	k_i	แทน ค่าการนำความร้อนของน้ำแข็ง (kW/m°C)
	k_{Tube}	แทน ค่าการนำความร้อนของท่อทำน้ำแข็งหลอด (kW/m°C)
	r_{OT}	แทน รัศมีพื้นผิวภายนอกของท่อทำน้ำแข็งหลอด (m)
	r_{IT}	แทน รัศมีพื้นผิวภายในของท่อทำน้ำแข็งหลอด (m)
	$r_{IC,t}^j$	แทน รัศมีพื้นผิวภายในของน้ำแข็งหลอดที่เวลาเริ่มต้น (m)

3.2.5 แบบจำลองของท่อทำน้ำแข็งหลอดด้านสารทำความเย็น

3.2.5.1 สารทำความเย็นสถานะของเหลว

สร้างปริมาตรควบคุม สำหรับท่อทำน้ำแข็งหลอดด้านสารทำความเย็น เมื่อระบบคือ สารทำความเย็นเหลวอิมิตัวภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด แสดงดังรูปที่ 3.5

ตลอดกระบวนการทำความเย็น มีสมมุติฐานให้สารทำความเย็นเหลวอิมิตัวรับความร้อนจากภาระการทำความเย็นจนเกิดการระเหยภายใต้ความดันอิมิตัวคงที่ จึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาอัตราการระเหยของสารทำความเย็นตลอดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความเย็น



รูปที่ 3.5 ปริมาตรควบคุมสารทำความเย็นเหลวอิมิตัวภายในหอน้ำแข็งหลอด

1) สมดุลมวล เพื่อหาอัตราการระเหยโดยมวลของสารทำความเย็น โดยพิจารณาให้ สารทำความเย็นเหลวอิมิตัวมีระดับคงที่ตลอดกระบวนการ ($\Delta m_{\text{sys}} = 0$)

$$\dot{m}_{\text{NH}_3, \text{expan}} = \dot{m}_{\text{NH}_3, \text{evap}} = \dot{m}_{\text{NH}_3} \quad (3-29)$$

2) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ เพื่อหามวลของสารทำความเย็นที่ระเหยและอัตราการระเหยโดยมวลของสารทำความเย็น ดังสมการที่ (3-30) และ (3-31) ตามลำดับ โดยพิจารณาให้

- ไม่พิจารณาความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่เข้าและออกจากระบบ เนื่องจากการไหลแบบคงตัวจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและความแตกต่างของความสูงที่เข้าและออกจากระบบมีค่าน้อยมาก
- พลังงานที่เข้าสู่ระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ไหลเข้าสู่ระบบและความร้อนที่ถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ ไม่มีงานถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ
- พลังงานที่ออกจากระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ออกจากระบบ ไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนออกจากระบบ
- ระบบอยู่ภายใต้สภาวะคงตัว เนื่องจากสารทำความเย็นรับความร้อนภายใต้ความดันอิมิตัวคงที่ และมวลสารทำความเย็นถูกรักษาในระดับคงที่

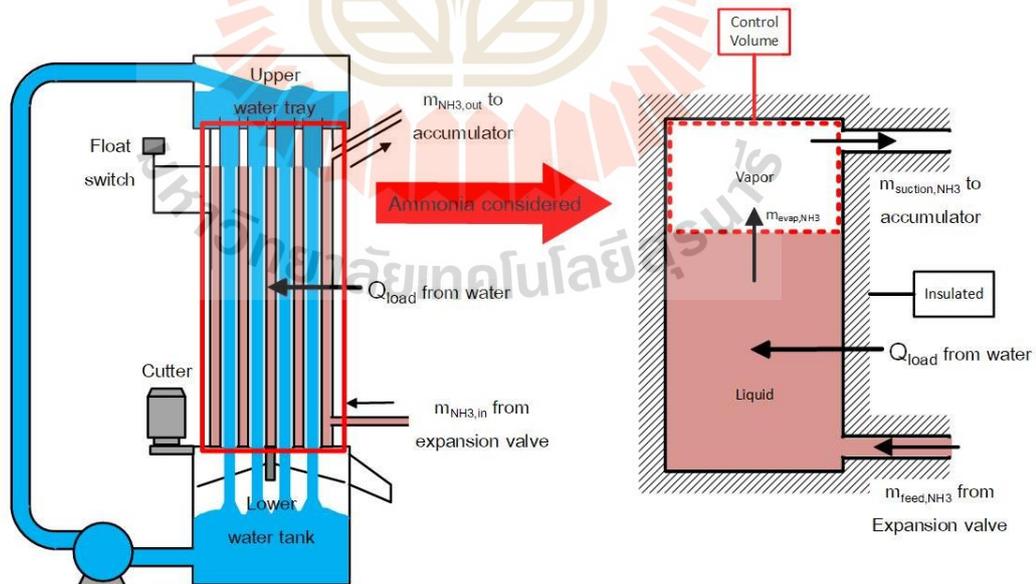
จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบ อีกทั้งไม่มีความแตกต่างของพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ของระบบ

$$m_{\text{NH}_3} = \frac{\sum_{j=1}^n Q_{\text{Load}}^j}{(h_{g,\text{NH}_3} - h_{f,\text{NH}_3})} \quad (3-30)$$

$$\dot{m}_{\text{NH}_3} = \frac{\sum_{j=1}^n \dot{Q}_{\text{Load}}^j}{(h_{g,\text{NH}_3} - h_{f,\text{NH}_3})} \quad (3-31)$$

3.2.5.2 สารทำความเย็นสถานะไอ

สร้างปริมาณควบคุม สำหรับหอทำน้ำแข็งหลอดด้านสารทำความเย็น เมื่อระบบคือ สารทำความเย็นสถานะไอภายในหอทำน้ำแข็งหลอดและแอกคิวมูเลเตอร์ ซึ่งมีปริมาตรคงที่ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ปริมาตรควบคุมสารทำความเย็นสถานะไอภายในหอทำน้ำแข็งหลอดและแอกคิวมูเลเตอร์

ตลอดกระบวนการทำความเย็น สารทำความเย็นเหลวเกิดการระเหยเป็นไอ อิ่มตัวเข้าสู่ปริมาตรควบคุม จากนั้นสารทำความเย็นในปริมาตรควบคุมจะถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอ ภายใต้อัตราการดูดโดยปริมาตรคงที่ จึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาสถานะของสารทำความเย็นภายในปริมาตรควบคุมและสารทำความเย็นที่ถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอ ตลอดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำความเย็น นำไปสู่แนวทางการกำหนดอัตราการดูดสารทำความเย็นโดยปริมาตรที่เหมาะสมกับอัตราการระเหยของสารทำความเย็นที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการ โดยมีสมมติฐานให้สารทำความเย็นที่ถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอและสารทำความเย็นภายในระบบเป็นสถานะเดียวกัน เนื่องจากพิจารณาให้สารทำความเย็นดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ทั้งหมด

1) สมดุลมวลจากปริมาตรควบคุม เพื่อหาปริมาณจำเพาะของสารทำความเย็นที่ถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอ โดยพิจารณาให้

- มวลสารทำความเย็นที่เข้าสู่ระบบคือ มวลแอมโมเนียที่เกิดจากการระเหย
- มวลสารทำความเย็นที่ออกจากระบบคือ มวลแอมโมเนียที่ถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอ
- มวลสารทำความเย็นที่ไหลผ่านปริมาตรควบคุมเป็นการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow) ส่งผลให้มวลภายในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง

$$v_{\text{NH}_3, \text{suct}} = \frac{\left[(\nabla_{\text{NH}_3, t+\Delta t}) + (\Delta t) (\dot{\nabla}_{\text{NH}_3, \text{suct}}) \right]}{\left[(m_{\text{NH}_3, \text{evap}}) + \left(\frac{\nabla_{\text{NH}_3, t}}{v_{\text{NH}_3, t}} \right) \right]} \quad (3-32)$$

2) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ เพื่อหาเอนทาลปีจำเพาะของสารทำความเย็นที่ถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอ โดยพิจารณาให้

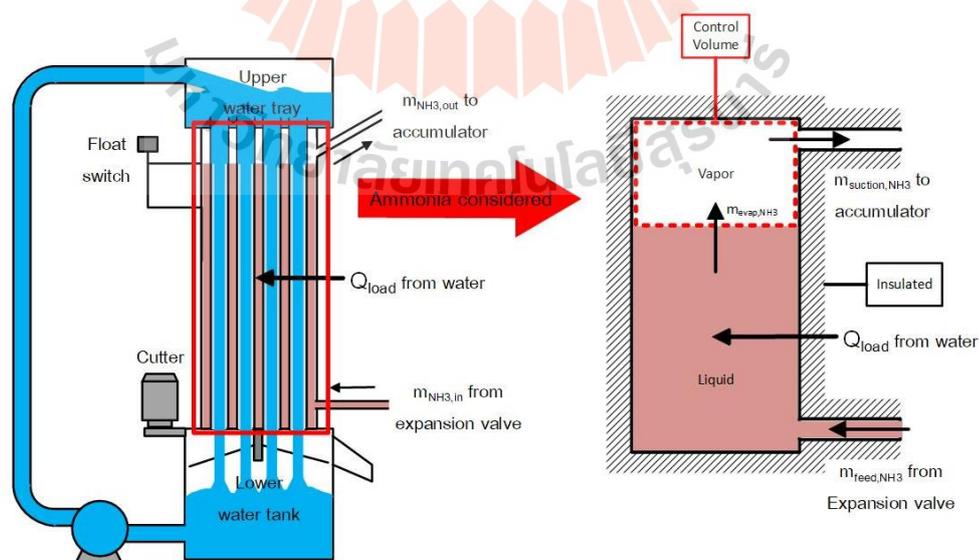
- ไม่พิจารณาความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่เข้าและออกจากระบบ เนื่องจากไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและความแตกต่างของความสูงที่เข้าและออกจากระบบมีค่าน้อยมาก
- พลังงานที่เข้าสู่ระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ไหลเข้าสู่ระบบ ไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ

- พลังงานที่ออกจากระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ออกจากระบบ ไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนออกจากระบบ
- ระบบอยู่นิ่ง ไม่มีความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ ขณะเดียวกันเกิดความแตกต่างของมวลสารทำความเย็นที่เข้าและออกจากระบบ รวมไปถึงสถานะของสารทำความเย็นเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ

$$h_{\text{NH}_3, \text{suct}} = \frac{v_{\text{NH}_3, \text{suct}}}{\Delta t \dot{V}_{\text{NH}_3, \text{suct}}} \left[\left(m_{\text{NH}_3, \text{evap}} h_{\text{NH}_3, \text{evap}} \right) + \left(\frac{V_{\text{NH}_3, t} u_{\text{NH}_3, t}}{v_{\text{NH}_3, t}} \right) \right] - \left[\frac{\left(V_{\text{NH}_3, t+\Delta t} u_{\text{NH}_3, t+\Delta t} \right)}{\Delta t \dot{V}_{\text{NH}_3, \text{suct}}} \right] \quad (3-33)$$

3.2.5.3 สารทำความเย็นรวมภายในหอทำน้ำแข็งหลอด

สร้างปริมาตรควบคุม สำหรับหอทำน้ำแข็งหลอดด้านสารทำความเย็น เมื่อระบบคือ สารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัวและสถานะไอภายในหอทำน้ำแข็งหลอดและแอดคิพมูลเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ปริมาตรควบคุมสารทำความเย็นรวมภายในหอทำน้ำแข็งหลอดและแอดคิพมูลเตอร์

สารทำความเย็นในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะตลอดกระบวนการทำความเย็น จากนั้นเครื่องอัดไอจึงดูดสารทำความเย็นที่สถานะต่าง ๆ เพื่อทำการอัดเพิ่มความดันที่ทำงานภายใต้วัฏจักรอัดไอ จึงสร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาพลังงานภายในจำเพาะของสารทำความเย็นภายในแอกคิวมูเลเตอร์ที่ถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอ โดยมีสมมติฐานให้สารทำความเย็นที่ถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอและสารทำความเย็นภายในระบบเป็นสถานะเดียวกัน เนื่องจากพิจารณาให้สารทำความเย็นดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

1) สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์ เพื่อหาพลังงานภายในของสารทำความเย็นที่ถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอ โดยพิจารณาให้

- ไม่พิจารณาความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่เข้าและออกจากระบบ เนื่องจากไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและความแตกต่างของความสูงที่เข้าและออกจากระบบมีค่าน้อยมาก

- พลังงานที่เข้าสู่ระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ไหลเข้าสู่ระบบและความร้อนที่ถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ ไม่มีงานถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ

- พลังงานที่ออกจากระบบ คือ พลังงานโดยมวลที่ไหลออกจากระบบ ไม่มีงานและความร้อนถ่ายโอนออกจากระบบ

- ระบบอยู่นิ่ง ไม่มีความแตกต่างของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ ขณะเดียวกันเกิดความแตกต่างของมวลสารทำความเย็นที่เข้าและออกจากระบบ รวมไปถึงสถานะของสารทำความเย็นสถานะไอเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ

$$u_{\text{NH}_3, \text{suct}} = \frac{v_{\text{NH}_3, \text{suct}}}{V_{\text{NH}_3, t+\Delta t}} \left[\left(m_{\text{NH}_3, \text{expan}} h_{\text{NH}_3, \text{expan}} \right) + \left(\sum_{j=1}^n Q_{\text{Load}}^j \right) - \left(\frac{\dot{V}_{\text{NH}_3, \text{suct}} h_{\text{NH}_3, \text{suct}} \Delta t}{v_{\text{NH}_3, \text{suct}}} \right) + \left(\frac{V_{\text{NH}_3, t} u_{\text{NH}_3, t}}{v_{\text{NH}_3, t}} \right) \right] \quad (3-34)$$

โดยที่	\dot{Q}_{Load}^j	แทน ภาระการทำความเย็น (kW)
	$h_{\text{NH}_3, \text{evap}}$	แทน เอนทาลปีจำเพาะของแอมโมเนียที่ระเหย (kJ/kg)
	$h_{\text{NH}_3, \text{suct}}$	แทน เอนทาลปีจำเพาะของแอมโมเนียถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอ (kJ/kg)
	h_{g, NH_3}	แทน เอนทาลปีจำเพาะของแอมโมเนียสถานะไออิ่มตัว (kJ/kg)

h_{f,NH_3}	แทน เอนทาลปีจำเพาะของแอมโมเนียสถานะของเหลวอิ่มตัว (kJ/kg)
$V_{NH_3,suct}$	แทน ปริมาตรจำเพาะของแอมโมเนียถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอ (m ³ /kg)
$u_{NH_3,suct}$	แทน พลังงานภายในจำเพาะของแอมโมเนียถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอ (kJ/kg)
$\dot{m}_{NH_3,evap}$	แทน อัตราการระเหยโดยมวลของแอมโมเนีย (kg/s)
$m_{NH_3,evap}$	แทน มวลของแอมโมเนียระเหย (kg)
$\dot{m}_{NH_3,expan}$	แทน อัตราการเติมแอมโมเนียโดยมวลจากวาล์วลดความดัน (kg/s)
$m_{NH_3,expan}$	แทน มวลของแอมโมเนียที่เติมจากวาล์วลดความดัน (kg)
\dot{m}_{NH_3}	แทน อัตราการไหลโดยมวลของแอมโมเนีย (kg/s)
$\dot{V}_{NH_3,suct}$	แทน อัตราการดูดแอมโมเนียโดยปริมาตรของเครื่องอัดไอ (m ³ /s)
$V_{NH_3,t+\Delta t}$	แทน ปริมาตรของแอมโมเนียในระบบที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป (m ³)
$V_{NH_3,t}$	แทน ปริมาตรของแอมโมเนียในระบบที่เวลาเริ่มต้น (m ³)
$u_{NH_3,t}$	แทน พลังงานภายในจำเพาะของแอมโมเนียในระบบที่เวลาเริ่มต้น (kJ/kg)
$V_{NH_3,t}$	แทน ปริมาตรจำเพาะของแอมโมเนียในระบบที่เวลาเริ่มต้น (m ³ /kg)

3.2.6 แบบจำลองของเครื่องอัดไอชนิดลูกสูบ

3.2.6.1 อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวล

จากการสมดุลมวลที่ปริมาตรควบคุมในรูปที่ 3.6 ทำให้ทราบปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็นที่ถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอ หากพิจารณาจากอัตราการดูดสารทำความเย็นโดยปริมาตรของเครื่องอัดไอ จึงนำไปสู่อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวล ดังนี้

$$\dot{m}_{NH_3,suct} = \frac{\dot{V}_{NH_3,suct}}{V_{NH_3,suct}} \quad (3-35)$$

3.2.6.2 สภาวะของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ

สภาวะของสารทำความเย็นที่เข้าสู่เครื่องอัดไอเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการทำความเย็น จึงจำเป็นจะต้องทราบความดันสารทำความเย็น ค่าคุณภาพสารทำความเย็น (Quality) และอุณหภูมิสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ โดยพิจารณาจากสภาวะของ

สารทำความเย็นภายในแอกคิวมูเลเตอร์ ซึ่งมีสมมุติฐานให้สถานะของสารทำความเย็นภายในแอกคิวมูเลเตอร์เหมือนกับด้านดูดของเครื่องอัดไอ

1) ความดันสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ

ความดันสารทำความเย็นด้านดูด พิจารณาได้จากความสามารถของเครื่องอัดไอ (Compressor Capacity) ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็งนิยมใช้เครื่องอัดความเร็วรอบคงที่ ดังนั้นเมื่อความแตกต่างของความดันในเครื่องอัดไอน้อยลงส่งผลให้อัตราการไหลของสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดไอนี้มีค่ามากขึ้น ในทางกลับกันหากความแตกต่างของความดันในเครื่องอัดไอนี้มากขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการไหลของสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดไอนี้มีค่าน้อยลง ด้วยเหตุนี้จึงพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความดันในเครื่องอัดไอกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดไออยู่ในรูปกราฟสมรรถนะของเครื่องอัดไอ โดยมีสมมุติฐานให้ความดันด้านจ่ายของเครื่องอัดมีค่าคงที่

$$\Delta P_{\text{Comp}} = f(\dot{m}_{\text{NH}_3, \text{Suct}}) \quad (3-36)$$

ความแตกต่างของความดันภายในเครื่องอัดไอ คือ ความแตกต่างของความดันด้านดูดและด้านจ่ายของเครื่องอัดไอ พิจารณาความดันด้านดูดของเครื่องอัดไอได้ดังนี้

$$P_{\text{Suct}} = P_{\text{Disc}} - \Delta P_{\text{Comp}} \quad (3-37)$$

เมื่อพิจารณาความดันของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอหรือความดันสารทำความเย็นภายในแอกคิวมูเลเตอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรก เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำและสารทำความเย็น จึงส่งผลให้อัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอน้อยกว่าอัตราการระเหยของสารทำความเย็นเข้าสู่แอกคิวมูเลเตอร์ซึ่งระเหยภายใต้ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ ทำให้ความหนาแน่นของสารทำความเย็นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งสารทำความเย็นภายในแอกคิวมูเลเตอร์เข้าใกล้จุดอิ่มตัวและมีโอกาสเป็นของผสม (Liquid Vapor Mixture) จึงจำเป็นต้องพิจารณาค่าคุณภาพของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอหรือภายในแอกคิวมูเลเตอร์ ขณะเดียวกันแอกคิวมูเลเตอร์ติดตั้งสูงกว่าหอทำน้ำแข็งตลอด ทำให้สารทำความเย็นบางส่วนเมื่อกลั่นตัวเป็นของเหลวแล้ว จึงไหลลงกลับไปยังหอทำน้ำแข็งตลอด เพื่อป้องกันสารทำความเย็นเหลวเข้าสู่เครื่องอัดไอ

2) ค่าคุณภาพของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ

ค่าคุณภาพของสารทำความเย็น เป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงสถานะของสารทำความเย็นที่อยู่ในช่วงระหว่างของเหลวอิ่มตัว (Saturated Liquid) และไออิ่มตัว (Saturated Vapor) พิจารณาได้จากคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นที่สภาวะนั้น ๆ ร่วมกับคุณสมบัติที่สถานะของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว เช่น ค่าเอนทาลปีจำเพาะ (Specific Enthalpy) ค่าพลังงานภายในจำเพาะ (Specific Internal Energy) และค่าปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) ซึ่งนำค่าพลังงานภายในจำเพาะมาพิจารณาร่วมกับความดันสารทำความเย็น ดังนี้

$$x_{\text{NH}_3, \text{suct}} = \frac{u_{\text{NH}_3, \text{suct}} - u_{\text{NH}_3, \text{f@P}_{\text{suct}}}}{u_{\text{NH}_3, \text{g@P}_{\text{suct}}} - u_{\text{NH}_3, \text{f@P}_{\text{suct}}}} \quad (3-38)$$

3) อุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ

อุณหภูมิของสารทำความเย็น พิจารณาโดยการแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงของสารทำความเย็นอิ่มตัว และช่วงไอร้อนยิ่งยวด ดังนี้

- ช่วงสารทำความเย็นอิ่มตัว ประกอบไปด้วย สถานะของสารทำความเย็นอยู่ในช่วงของเหลวอิ่มตัว ของผสมและไออิ่มตัว ซึ่งอุณหภูมิของสารทำความเย็นเป็นฟังก์ชันของความดันสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ ดังนี้

$$T_{\text{NH}_3, \text{suct}} = f(P_{\text{NH}_3, \text{suct}}) \quad (3-39)$$

- ช่วงไอร้อนยิ่งยวด อุณหภูมิของสารทำความเย็นไอร้อนยิ่งยวด เป็นฟังก์ชันของความดันสารทำความเย็นด้านดูดกับพลังงานภายในจำเพาะสารทำความเย็นด้านดูด ดังนี้

$$T_{\text{NH}_3, \text{suct}} = f(P_{\text{NH}_3, \text{suct}}, u_{\text{NH}_3, \text{suct}}) \quad (3-40)$$

โดยที่	ΔP_{Comp}	แทน ความแตกต่างความดันด้านดูดและด้านจ่ายของเครื่องอัดไอ (kPa)
	P_{Suct}	แทน ความดันด้านดูดของเครื่องอัดไอ (kPa)
	P_{Disc}	แทน ความดันด้านจ่ายของเครื่องอัดไอ (kPa)

$T_{\text{NH}_3, \text{suct}}$	แทน อุณหภูมิของแอมโมเนียด้านดูดของเครื่องอัดไอ ($^{\circ}\text{C}$)
$X_{\text{NH}_3, \text{suct}}$	แทน ค่าคุณภาพของแอมโมเนียด้านดูดของเครื่องอัดไอ
$U_{\text{NH}_3, \text{g@P}_{\text{suct}}}$	แทน พลังงานภายในจำเพาะของแอมโมเนียสถานะไออิ่มตัวด้านดูดของเครื่องอัดไอ (kJ/kg)
$U_{\text{NH}_3, \text{f@P}_{\text{suct}}}$	แทน พลังงานภายในจำเพาะของแอมโมเนียสถานะของเหลวอิ่มตัวด้านดูดของเครื่องอัดไอ (kJ/kg)

3.3 การจำลองระบบทางความร้อน

3.3.1 การจำแนกตัวแปรในการวิเคราะห์

จากแบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อน ได้แก่ ท่อทำน้ำแข็งหลอด ถังน้ำเย็นด้านล่าง หอทำน้ำแข็งหลอดด้านน้ำและด้านสารทำความเย็น พิจารณาช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด จำแนกตัวแปรเป็น 3 กลุ่มคือ ตัวแปรอิสระ ตัวแปรควบคุมและตัวแปรตาม ได้ดังนี้

1) ตัวแปรอิสระ

- ระยะเวลา
- ความดันของสารทำความเย็นด้านดูด
- อุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูด

2) ตัวแปรควบคุม

- ความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต
- ขนาดมิติของหอทำน้ำแข็งหลอด
- กำลังการผลิตของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด
- ความยาวน้ำแข็งหลอดที่ก่อตัวภายในท่อเท่ากันทั้งหมด
- ปริมาณน้ำป้อนเข้าสู่หอทำน้ำแข็งหลอด
- ค่าการนำความร้อนของท่อทำน้ำแข็งหลอด
- ค่าการนำความร้อนของน้ำแข็งหลอด
- พลังงานภายในจำเพาะของน้ำแข็งหลอด
- อุณหภูมิพื้นผิวด้านในของน้ำแข็งหลอดเท่ากันตลอดทั้งความยาว
- อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของท่อทำน้ำแข็งเท่ากันตลอดทั้งความยาวท่อ
- น้ำไหลในท่อแนวดิ่งภายใต้ความดันบรรยากาศ
- ความเร็วในการไหลของน้ำในท่อทำน้ำแข็งหลอด

- ความดันอิมตัวของสารทำความเย็นเหลวภายในหอทำน้ำแข็งหลอด
- อัตราการดูดโดยปริมาตรของเครื่องอัดไอ
- ปริมาตรของสารทำความเย็นสถานะไอแอกคิวมูลเตอร์
- ปริมาตรของสารทำความเย็นสถานะไอในหอทำน้ำแข็งหลอด
- ปริมาตรของสารทำความเย็นสถานะของเหลวในหอทำน้ำแข็งหลอด

3) ตัวแปรตาม

- ภาระการทำความเย็น
- อัตราการระเหยสารทำความเย็นโดยมวล
- อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวล
- อุณหภูมิของน้ำ (ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ)
- มวลน้ำแข็งหลอด (ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด)
- ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอด (ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด)

3.3.2 ระบบสมการจากแบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของกระบวนการทำความเย็น

จากการวิเคราะห์กระบวนการทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดนำไปสู่ระบบสมการจากการสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อน เพื่อหาระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาแน่นของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต ภาระการทำความเย็น ความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ถูกดูดด้วยเครื่องอัดไอภายใต้ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น ทำให้ทราบถึงอัตราการดูดโดยปริมาตรของเครื่องอัดไอที่เหมาะสมกับอัตราการระเหยของสารทำความเย็น เครื่องอัดไอจึงสามารถควบคุมความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็นให้กระบวนการทำความเย็นทำงานได้จนถึงสิ้นสุดกระบวนการ

พิจารณาระบบสมการในกระบวนการทำความเย็นออกเป็น 2 ช่วงตามหลักการถ่ายโอนความร้อนที่แตกต่างกัน ระบบสมการในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำดังแสดงในตารางที่ 3.1 และระบบสมการในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดดังแสดงในตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ

อุปกรณ์ที่วิเคราะห์	ฟังก์ชัน	ความสัมพันธ์
ท่อทำน้ำแข็งหลอด	$f_1^j = U_d A^j - \frac{1}{\left\{ \frac{1}{2\pi r_{IT} dz^j \alpha_w^j} + \frac{\ln(r_{OT}/r_{IT})}{2\pi dz^j k_{Tube}^j} \right\} + \left\{ \frac{1}{2\pi r_{OT} dz^j \alpha_{NH_3}^j} \right\}} = 0$	$f_1^{j=1} = f(T_{w,in}^1)$ หรือ $f_1^{1 \leftarrow j \rightarrow n} = f(f_2^{j-1})$
	$f_2^j = T_{w,out}^j - \frac{\left\{ U_d A^j \left(T_{NH_3}^j - \frac{T_{w,in}^j}{2} \right) + \frac{m_w^j}{\Delta t} \left(c_{p,w} T_{w,in}^j \right) \right\}}{\left\{ \left(\frac{U_d A^j}{2} \right) + \left(\frac{m_w^j c_{p,w}}{\Delta t} \right) \right\}} = 0$	$f_2^j = f \left(\begin{matrix} f_1^j, \\ \Delta t, \\ T_{w,in}^j \end{matrix} \right)$
	$f_3^j = Q_{Load}^j - m_w^j \left[c_{p,w} \left(T_{w,in}^j - T_{w,out}^j \right) + (K P^j) \right] = 0$	$f_3^j = f \left(f_2^j, T_{w,in}^j \right)$
	$f_4^j = \dot{Q}_{Load}^j - U_d A^j \left(T_{w,avg}^j - T_{NH_3}^j \right) = 0$	$f_4^j = f \left(\begin{matrix} f_1^j, f_2^j, \\ T_{w,in}^j \end{matrix} \right)$
หอทำน้ำแข็งหลอด ด้านน้ำ	$f_5 = T_{w,t+\Delta t} - T_{w,t} + \left(\frac{\sum_{j=1}^n Q_{Load}^j}{m_{w,sys} c_{p,w}} \right) = 0$	$f_5 = f \left(f_3^{j=1 \rightarrow n} \right)$
ถังน้ำด้านล่างใน หอทำน้ำแข็งหลอด	$f_6 = \Delta t - \frac{m_{w,tank} c_{p,w} \left(T_{w,t+\Delta t} - T_{w,t} \right)}{\dot{m}_{w,p,w} \left(T_{w,in} - T_{w,out} \right)} = 0$	$f_6 = f \left(f_2^n, f_5 \right)$
หอทำน้ำแข็งหลอด ด้านสารทำความ เย็นสถานะ ของเหลว	$f_7 = m_{NH_3, evap} - \frac{\sum_{j=1}^n Q_{Load}^j}{\left(h_{NH_3, evap} - h_{NH_3, expan} \right)} = 0$	$f_7 = f \left(f_3^{j=1 \rightarrow n} \right)$
	$f_8 = \dot{m}_{NH_3, evap} - \frac{\sum_{j=1}^n \dot{Q}_{Load}^j}{\left(h_{NH_3, evap} - h_{NH_3, expan} \right)} = 0$	$f_8 = f \left(f_4^{j=1 \rightarrow n} \right)$
หอทำน้ำแข็งหลอด ด้านสารทำความ เย็นสถานะไอ	$f_9 = v_{NH_3, suct} - \frac{\left[\left(v_{NH_3, t+\Delta t} \right) + \left(\Delta t \dot{v}_{NH_3, suct} \right) \right]}{\left[\left(m_{NH_3, evap} \right) + \left(\frac{v_{NH_3, t}}{v_{NH_3, t}} \right) \right]} = 0$	$f_9 = f \left(f_4^{j=1 \rightarrow n} \right)$

ตารางที่ 3.1 ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ (ต่อ)

อุปกรณ์ที่วิเคราะห์	ฟังก์ชัน	ความสัมพันธ์
หอทำน้ำแข็งหลอด ด้านสารทำความ เย็นสถานะไอ	$f_{10} = h_{\text{NH}_3, \text{suct}} - \frac{v_{\text{NH}_3, \text{suct}}}{\Delta t \dot{V}_{\text{NH}_3, \text{suct}}} \left[\left(m_{\text{NH}_3, \text{evap}} h_{\text{NH}_3, \text{evap}} \right) + \left(\frac{v_{\text{NH}_3, \text{t}} u_{\text{NH}_3, \text{t}}}{v_{\text{NH}_3, \text{t}}} \right) \right]$ $+ \frac{\left[v_{\text{NH}_3, \text{t}+\Delta t} u_{\text{NH}_3, \text{t}+\Delta t} \right]}{\Delta t \dot{V}_{\text{NH}_3, \text{suct}}} = 0$	$f_{10} = f \left(\begin{matrix} f_6 \\ f_7 \\ f_9 \\ P_{\text{NH}_3} \\ T_{\text{NH}_3} \end{matrix} \right)$
หอทำน้ำแข็งหลอด ด้านสารทำความ เย็น	$f_{11} = u_{\text{NH}_3, \text{suct}} - \frac{v_{\text{NH}_3, \text{suct}}}{v_{\text{NH}_3, \text{t}+\Delta t}} \left[\left(m_{\text{NH}_3, \text{expan}} h_{\text{NH}_3, \text{expan}} \right) - \left(\frac{\dot{V}_{\text{suct}} h_{\text{NH}_3, \text{suct}} \Delta t}{v_{\text{NH}_3, \text{suct}}} \right) + \left(\sum_{j=1}^n Q_{\text{Load}}^j \right) + \left(\frac{v_{\text{NH}_3, \text{t}} u_{\text{NH}_3, \text{t}}}{v_{\text{NH}_3, \text{t}}} \right) \right] = 0$	$f_{11} = f \left(\begin{matrix} f_6, f_7, \\ f_9, f_{10} \end{matrix} \right)$
เครื่องอัดไอชนิด ลูกสูบ	$f_{12} = \dot{m}_{\text{NH}_3, \text{suct}} - \frac{\dot{V}_{\text{NH}_3, \text{suct}}}{v_{\text{NH}_3, \text{suct}}} = 0$	$f_{12} = f(f_9)$
	$f_{13} = \Delta P_{\text{comp}} - f(\dot{m}_{\text{NH}_3, \text{suct}}) = 0$	$f_{13} = f(f_{12})$
	$f_{14} = P_{\text{NH}_3, \text{suct}} - (P_{\text{NH}_3, \text{Disc}} - \Delta P_{\text{comp}}) = 0$	$f_{14} = f(f_{13})$
	$f_{15} = x_{\text{NH}_3, \text{suct}} - \left(\frac{u_{\text{NH}_3, \text{suct}} - u_{\text{NH}_3, f@P_{\text{NH}_3}}}{u_{\text{NH}_3, g@P_{\text{NH}_3}} - u_{\text{NH}_3, f@P_{\text{NH}_3}}} \right) = 0$	$f_{15} = f \left(\begin{matrix} f_{11} \\ f_{14} \end{matrix} \right)$
	$f_{16} = T_{\text{NH}_3, \text{suct}} - f(P_{\text{NH}_3, \text{suct}}, u_{\text{NH}_3, \text{suct}}) = 0$	$f_{16} = f(f_{11}, f_{14})$

ตารางที่ 3.2 ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานในช่วงการก่อดวงของน้ำแข็งหลอด

อุปกรณ์ที่วิเคราะห์	ฟังก์ชัน	ความสัมพันธ์
ท่อทำน้ำแข็งหลอด	$F_1^j = U_d A^j - \frac{1}{\left[\frac{\ln(r_{IT}/r_{IC,t}^j)}{2\pi dz k_i} + \frac{\ln(r_{OT}/r_{IT})}{2\pi dz k_{Tube}} \right] + \left[\frac{1}{2\pi r_{OT} dz \alpha_{NH_3}^j} \right]} = 0$	$F_1^j = f(r_{IC,t}^j)$
	$F_2^j = \dot{Q}_{Load}^j - U_d A^j (T_w - T_{NH_3}) = 0$	$F_2^j = f(F_1^j)$
	$F_3^j = \Delta m_i^j - \frac{\left[\Delta t U_d A^j (T_w - T_{NH_3}) + \frac{m_{w,in}^j}{2} (v_{w,out}^2 - v_{w,in}^2) \right]}{\left[(u_w - u_i) + (gz^j) + \left(\frac{v_{w,out}^j}{2} \right)^2 \right]} = 0$	$F_3^j = f(F_1^j, \Delta t)$
	$F_4^j = Q_{Load}^j - m_{w,in}^j [KP^j] - \Delta m_i^j \left[u_w - u_i + \frac{(v_{w,out}^j)^2}{2} \right] = 0$	$F_4^j = f(F_3^j)$
	$F_5^j = \Delta r_i^j - \sqrt{\frac{\Delta m_i^j}{\rho_i \pi dz}} = 0$	$F_5^j = f(F_3^j)$
หอทำน้ำแข็งหลอด ด้านน้ำ	$F_6 = \sum_{j=1}^n \Delta m_i^j - \frac{\sum_{j=1}^n Q_{Load}^j}{(u_w - u_i)} = 0$	$F_6 = f(F_4^{j=1 \rightarrow n})$
	$F_7 = \Delta r_i - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \Delta m_i^j}{\rho_i \pi z}} = 0$	$F_7 = f(F_6)$
ถังน้ำด้านล่างในหอ ทำน้ำแข็งหลอด	$F_8 = \Delta t - \frac{u_w \left(\sum_{j=1}^n \Delta m_i^j \right)}{h_w (\dot{m}_{w,in} - \dot{m}_{w,out})} = 0$	$F_8 = f(F_6)$
หอทำน้ำแข็งหลอด ด้านสารทำความเย็น สถานะของเหลว	$F_9 = m_{NH_3} - \frac{\sum_{j=1}^n Q_{Load}^j}{(h_{g,NH_3} - h_{f,NH_3})} = 0$	$F_9 = f(F_4^{j=1 \rightarrow n})$

ตารางที่ 3.2 ระบบสมการจากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานในช่วงการก่อดตัวของน้ำแข็งหลอด (ต่อ)

อุปกรณ์ที่วิเคราะห์	ฟังก์ชัน	ความสัมพันธ์
หอทำน้ำแข็งหลอด ด้านสารทำความเย็น สถานะของเหลว	$F_{10} = \dot{m}_{\text{NH}_3} - \frac{\sum_{j=1}^n \dot{Q}_{\text{Load}}^j}{(h_{g,\text{NH}_3} - h_{f,\text{NH}_3})} = 0$	$F_{10} = f(F_2^{j=1 \rightarrow n})$
หอทำน้ำแข็งหลอด ด้านสารทำความเย็น สถานะไอ	$F_{11} = v_{\text{NH}_3,\text{suct}} - \frac{\left[(\dot{V}_{\text{NH}_3,t+\Delta t}) + (\Delta t \dot{V}_{\text{NH}_3,\text{suct}}) \right]}{\left[(m_{\text{NH}_3,\text{evap}}) + \left(\frac{\dot{V}_{\text{NH}_3,t}}{v_{\text{NH}_3,t}} \right) \right]} = 0$	$F_{11} = f(F_8, F_9)$
	$F_{12} = h_{\text{NH}_3,\text{suct}} - \frac{v_{\text{NH}_3,\text{suct}}}{\Delta t \dot{V}_{\text{NH}_3,\text{suct}}} \left[(m_{\text{NH}_3,\text{evap}} h_{\text{NH}_3,\text{evap}}) + \left(\frac{\dot{V}_{\text{NH}_3,t} u_{\text{NH}_3,t}}{v_{\text{NH}_3,t}} \right) \right] + \frac{\left[\dot{V}_{\text{NH}_3,t+\Delta t} u_{\text{NH}_3,t+\Delta t} \right]}{\Delta t \dot{V}_{\text{NH}_3,\text{suct}}} = 0$	$F_{12} = f \left(\begin{array}{c} F_8 \\ , F_9 \\ , F_{11} \\ , P_{\text{NH}_3} \\ , T_{\text{NH}_3} \end{array} \right)$
หอทำน้ำแข็งหลอด ด้านสารทำความเย็น	$F_{13} = u_{\text{NH}_3,\text{suct}} - \frac{v_{\text{NH}_3,\text{suct}}}{\dot{V}_{\text{NH}_3,t+\Delta t}} \left[\frac{(m_{\text{NH}_3,\text{expan}} h_{\text{NH}_3,\text{expan}}) - \left(\frac{\dot{V}_{\text{suct}} h_{\text{NH}_3,\text{suct}} \Delta t}{v_{\text{NH}_3,\text{suct}}} \right)}{v_{\text{NH}_3,\text{suct}}} + \left(\sum_{j=1}^n \dot{Q}_{\text{Load}}^j \right) + \left(\frac{\dot{V}_{\text{NH}_3,t} u_{\text{NH}_3,t}}{v_{\text{NH}_3,t}} \right) \right] = 0$	$F_{13} = f \left(\begin{array}{c} F_8 \\ , F_9 \\ , F_{11} \\ , F_{12} \end{array} \right)$
เครื่องอัดไอชนิด ลูกสูบ	$F_{14} = \dot{m}_{\text{NH}_3,\text{suct}} - \frac{\dot{V}_{\text{NH}_3,\text{suct}}}{v_{\text{NH}_3,\text{suct}}} = 0$	$F_{14} = f(F_{11})$
	$F_{15} = \Delta P_{\text{comp}} - f(\dot{m}_{\text{NH}_3,\text{suct}}) = 0$	$F_{15} = f(F_{14})$
	$F_{16} = P_{\text{NH}_3,\text{suct}} - (P_{\text{NH}_3,\text{Disc}} - \Delta P_{\text{comp}}) = 0$	$F_{16} = f(F_{15})$
	$F_{17} = x_{\text{NH}_3,\text{suct}} - \left(\frac{u_{\text{NH}_3,\text{suct}} - u_{\text{NH}_3,f@P_{\text{NH}_3}}}{u_{\text{NH}_3,g@P_{\text{NH}_3}} - u_{\text{NH}_3,f@P_{\text{NH}_3}}} \right) = 0$	$F_{17} = f \left(\begin{array}{c} F_{13} \\ , F_{16} \end{array} \right)$
	$F_{18} = T_{\text{NH}_3,\text{suct}} - f(P_{\text{NH}_3,\text{suct}}, u_{\text{NH}_3,\text{suct}}) = 0$	$F_{18} = f \left(\begin{array}{c} F_{13} \\ , F_{16} \end{array} \right)$

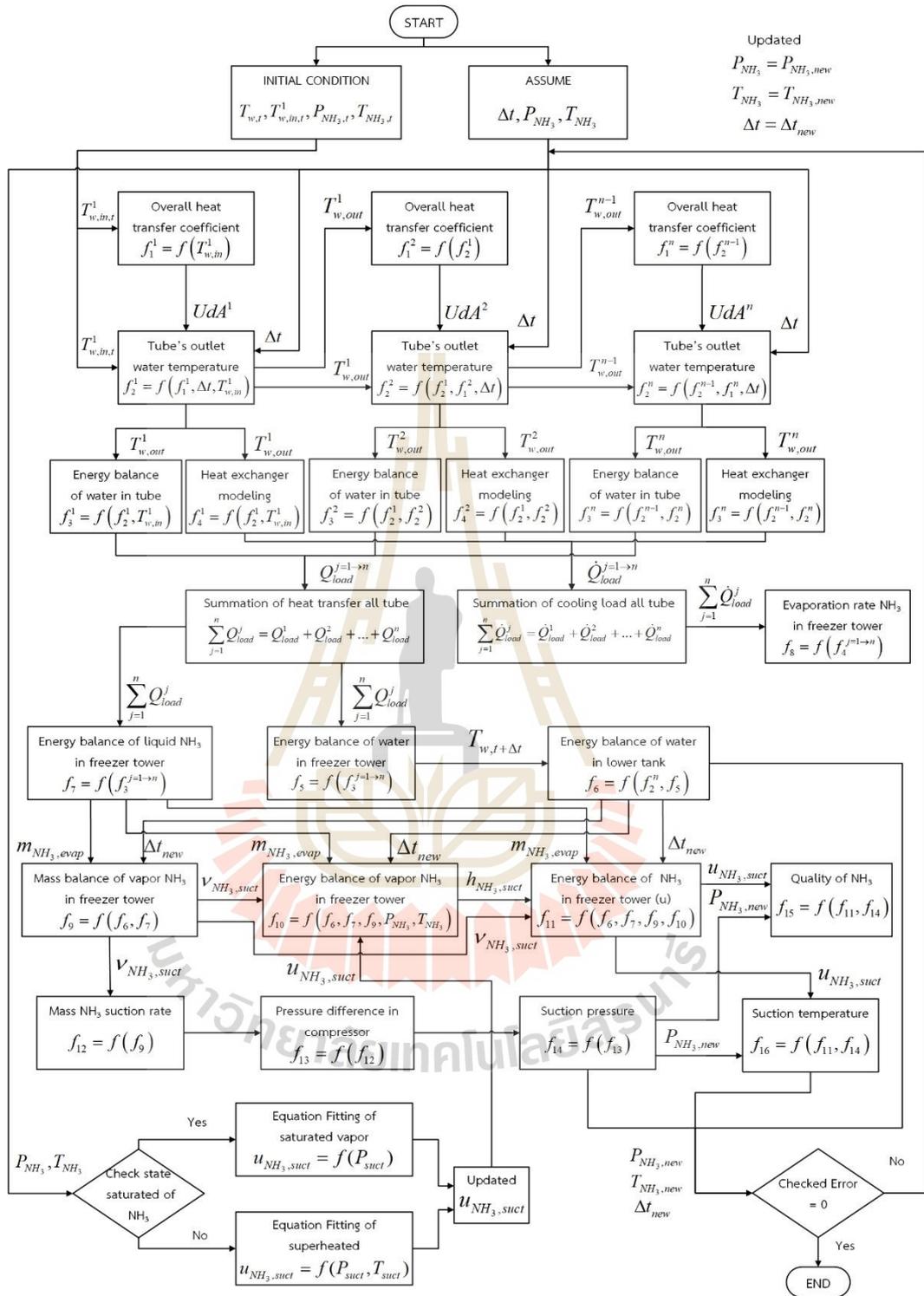
3.3.3 ระบบสมการจากแบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของกระบวนการทำความเย็น

จากแบบจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนจำเป็นต้องทราบระยะเวลา ความดันของสารทำความเย็นด้านดูด อุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูด เพื่อหาภาระการทำความเย็น มวลของสารทำความเย็นที่ระเหย มวลของสารทำความเย็นที่ถูกดูด อุณหภูมิของน้ำที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป (ในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ) มวลน้ำแข็งหลอตและความหนาแน่นน้ำแข็งหลอตที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป (ในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอต) จึงจำเป็นต้องทำการจำลองระบบเพื่อแก้ระบบสมการ ซึ่งวิธีการจำลองระบบทางความร้อน (Thermal Simulation) มีหลายวิธี ดังนี้

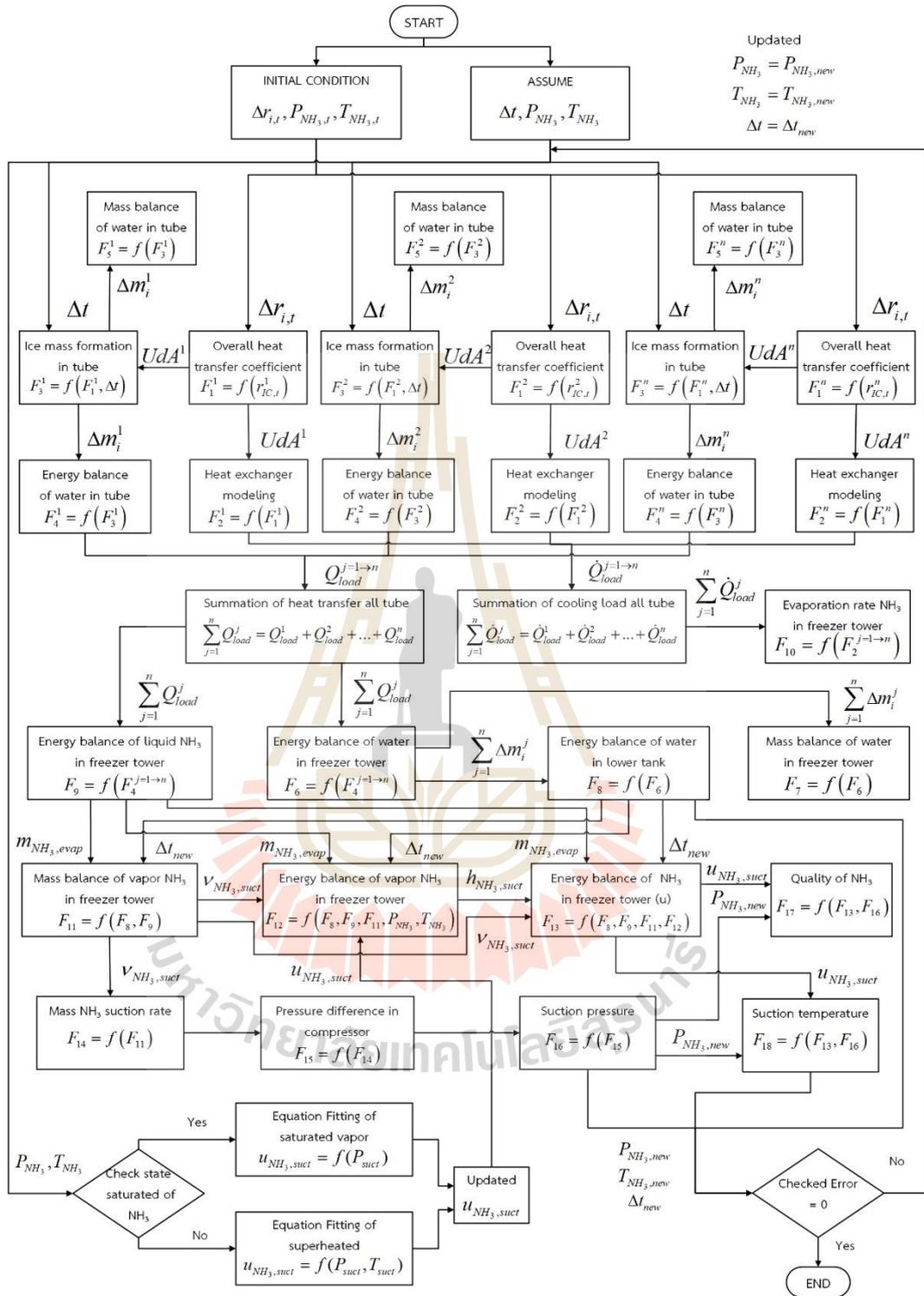
วิธีการนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Simulation) เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับระบบที่มีสภาวะคงตัว (Steady state) และระบบสมการสามารถหาอนุพันธ์ได้ไม่ยาก ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้เวลาในการลู่ออกค่าคำตอบเร็วมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ และไม่จำเป็นต้องสร้างลำดับขั้นหรือแผนผังการคำนวณ (Information flow diagram) แต่หากระบบสมการมีฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) มักจะทำให้เกิดการลู่ออกจากคำตอบ

วิธีการแทนค่าลำดับ (Sequential Simulation) เป็นวิธีการที่จะต้องแทนค่าตามลำดับขั้น โดยการป้อนผลลัพธ์ของสมการก่อนหน้าเพื่อใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์ของสมการถัดไป จะคำนวณแบบลำดับไปจนถึงสมการสุดท้าย ซึ่งจะต้องเรียงลำดับสมการในการคำนวณให้สัมพันธ์กับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในระบบสมการ จำเป็นจะต้องสร้างแผนผังการคำนวณ (Information flow diagram) ซึ่งจะไม่เหมาะสมกับระบบที่มีสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) เนื่องจากจะเกิดการเบี่ยงเบนของคำตอบ

วิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง (Successive Substitution) เป็นวิธีการที่จะต้องสุ่มตัวแปรอิสระแทนค่าลงไปในระบบสมการแล้วได้ผลลัพธ์เป็นตัวแปรอิสระค่าใหม่ จากนั้นนำค่าใหม่กลับไปแทนค่าในระบบสมการ โดยจะทำซ้ำต่อเนื่องจนกว่าค่าตัวแปรอิสระที่ได้ใหม่จะไม่มี การเปลี่ยนแปลง จำเป็นจะต้องสร้างแผนผังการคำนวณ (Information flow diagram) ซึ่งระบบที่ทำการศึกษาวิจัยเป็นระบบที่มีสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอิสระอยู่ทุกช่วงเวลาจนถึงสุดกระบวนการทำความเย็น วิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่องจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับปัญหามากที่สุด จากนั้นทำการสร้างแผนผังและแก้ระบบสมการด้วยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงตามหลักการถ่ายโอนความร้อนที่แตกต่างกันได้แก่ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอต แสดงดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 ดังนี้



รูปที่ 3.8 แผนภาพความสัมพันธ์ของระบบสมการในช่วงการลดอุณหภูมิ
 ด้วยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3.9 แผนภาพความสัมพันธ์ของระบบสมการในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด
ด้วยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลของการศึกษาวิจัย

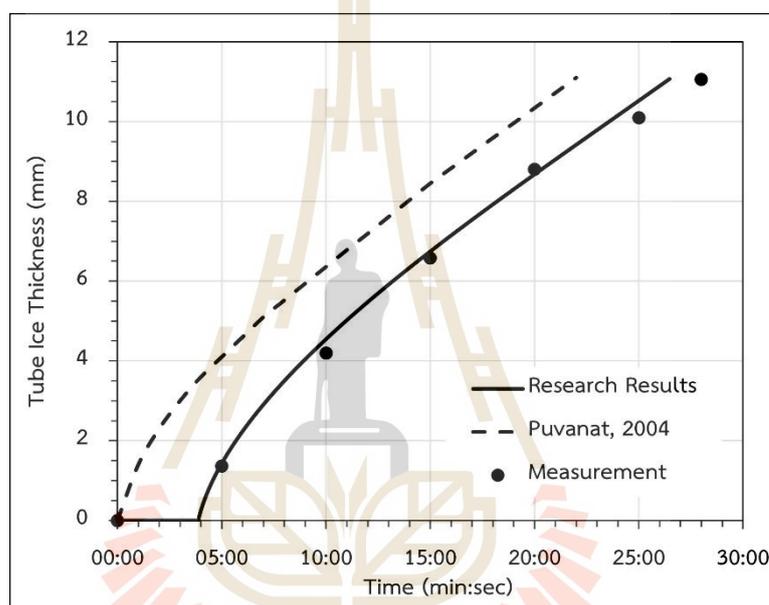
ในบทนี้จะทำการวิเคราะห์หาระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต ภาระการทำความเย็น อัตราการระเหยของสารทำความเย็น ความดัน และอุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอภายใต้ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น เพื่อเป็นเครื่องมือในการกำหนดอัตราการดูดของเครื่องอัดไอที่เหมาะสม โดยในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ดังกล่าว จากนั้นนำข้อมูลเงื่อนไขการผลิตมาใช้ในการจำลองพร้อมทั้งคำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองระบบโดยใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์

การผลิตน้ำแข็งหลอดให้ได้ความหนาแน่นไปตามต้องการนั้นจำเป็นจะต้องปรับตั้งเวลาของกระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดให้เหมาะสมกับอุณหภูมิน้ำป้อน จากบทที่ 3 การจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็นเพื่อหาระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น จึงพิจารณาอุณหภูมิน้ำป้อนและกำลังการผลิตเครื่องทำน้ำแข็งหลอดจากข้อมูลการตรวจวัดในอดีตของภูวนาท (2547) ที่ทำการศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งหลอด กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิตเต็มพิกัด 30 ตันต่อวันและอุณหภูมิน้ำป้อน 25 องศาเซลเซียส โดยนำข้อมูลการตรวจวัดความหนาแน่นของน้ำแข็งหลอดที่ก่อตัวภายในท่อมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ความหนาแน่นของน้ำแข็งหลอดที่ก่อตัวในท่อจากการจำลองระบบ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองระบบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลลัพธ์นี้กับผลลัพธ์ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดจากแบบจำลองงานวิจัยดังกล่าว ดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 ข้อมูลการตรวจวัดความหนาแน่นน้ำแข็งที่แสดงนั้นเกิดจากการตรวจวัดความหนาแน่นของน้ำแข็งหลอดที่ก่อตัวภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดทุก 5 นาที กระทั่งสิ้นสุดกระบวนการทำความเย็น โดยมีความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้เป็น 11.06 มิลลิเมตรและระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นเป็น 28 นาที เมื่อทำการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ผลิตดังกล่าวเพื่อหาระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นพร้อมทั้งเปรียบเทียบความหนาแน่นของน้ำแข็งหลอดที่ก่อตัวตลอดกระบวนการทำความเย็น พบว่า ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นที่ได้จากการจำลองเป็น 26 นาที 30 วินาที คลาดเคลื่อนจากระยะเวลา

ที่ได้จากการตรวจวัด 5.36% ในขณะที่ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นที่ได้จากแบบจำลองของ (ภูวนาท, 2547) เป็น 22 นาที คลาดเคลื่อนจากระยะเวลาที่ได้จากการตรวจวัด 21.43% เห็นได้ชัดว่า การจำลองระบบนี้สามารถทำนายผลลัพธ์ของระยะเวลาในกระบวนการทำความเย็นได้ใกล้เคียงกับระยะเวลาที่ได้จากการตรวจวัดมากขึ้นถึง 16.07% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองในอดีต เนื่องจากการจำลองระบบนี้ได้พิจารณาช่วงการลดอุณหภูมิน้ำที่มีสมมุติฐานให้ไม่มีน้ำแข็งก่อตัวขึ้นภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดตลอดกระบวนการทำความเย็น

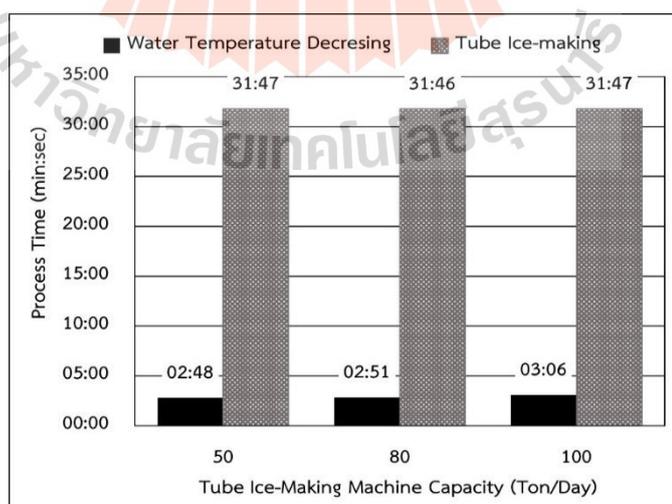
จากการจำลองนี้ เมื่ออุณหภูมิน้ำป้อน 25 องศาเซลเซียส พบว่า ระยะเวลาในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำเป็น 4 นาที ซึ่งคิดเป็น 15.09% ของระยะเวลาทั้งหมดในกระบวนการทำความเย็น จึงกล่าวได้ว่า ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำมีนัยสำคัญต่อกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด ส่วนในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดนั้นได้พิจารณาพลังงานการไหลของมวลน้ำภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดและมีสมมุติฐานให้น้ำแข็งก่อตัวขึ้นในท่อที่อยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศเนื่องจากน้ำไหลภายในท่อด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้การจำลองระบบในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดนี้ให้ผลลัพธ์ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ก่อตัวสอดคล้องกับความหนาแน่นน้ำแข็งจากการตรวจวัด

4.2 การวิเคราะห์การจำลองระบบโดยใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์

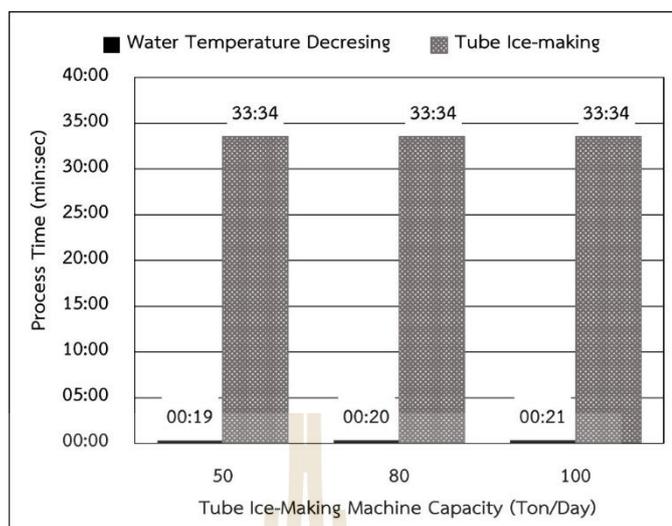
จากระบบสมการของกระบวนการทำความเย็นในบทที่ 3 ทำการจำลองระบบทางความร้อนวิธีแทนค่าอย่างต่อเนื่อง เพื่อหาผลลัพธ์ของการจำลองภายใต้ความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ น้ำ ความหนาของน้ำแข็งหลอด ภาระการทำความเย็น อัตราการระเหยของสารทำความเย็น อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวล ความดันและอุณหภูมิด้านดูดของเครื่องอัดไอที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น การจำลองระบบใช้ข้อมูลเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 80 และ 100 ตันต่อวัน เนื่องจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็งหลอดนิยมใช้เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิตดังกล่าว ซึ่งทำการจำลองระบบจำนวน 2 รอบการผลิต ได้แก่ รอบผลิตที่ 1 และรอบผลิตที่ 2 ของวัน ตามเงื่อนไขการผลิตน้ำแข็งหลอด ดังแสดงในภาคผนวก ค โดยสามารถพิจารณาเปรียบเทียบการผลิตที่ 2 ของวันเป็นตัวแทนของรอบการผลิตลำดับถัดไปจนกระทั่งสิ้นสุดการผลิตของวันได้ เนื่องจากรอบการผลิตที่ 2 เป็นต้นไปได้รับอิทธิพลของกระบวนการละลายน้ำแข็งของรอบการผลิตก่อนหน้า ในขณะที่รอบการผลิตที่ 1 ไม่มีอิทธิพลจากกระบวนการละลายน้ำแข็ง

4.2.1 การวิเคราะห์ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น

จากการวิเคราะห์กระบวนการทำความเย็น เมื่อการจำลองระบบแบ่งกระบวนการทำความเย็นออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงการลดอุณหภูมิ น้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด จากบทที่ 3 จึงทำการจำลองระบบเพื่อหาระยะเวลาในช่วงการลดอุณหภูมิ น้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ได้ผลลัพธ์ระยะเวลาของรอบการผลิตที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ระยะเวลาในช่วงการลดอุณหภูมิ น้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด รอบการผลิตที่ 1



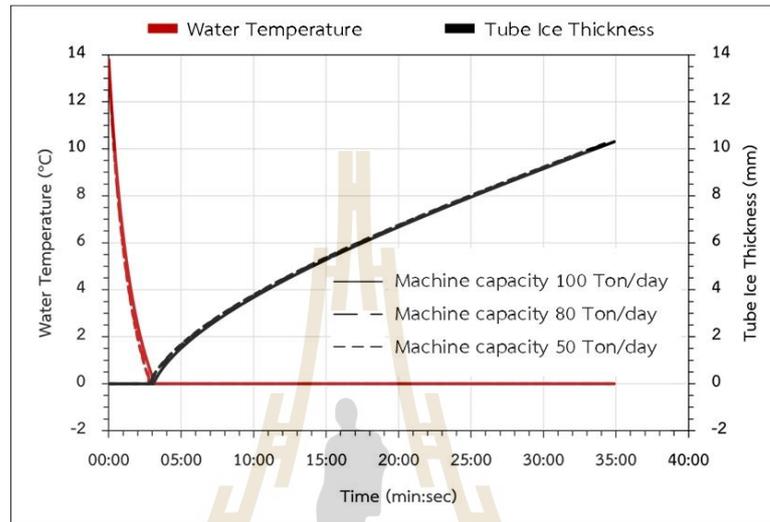
รูปที่ 4.3 ระยะเวลาในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด รอบการผลิตที่ 2

จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำใช้อุณหภูมิน้ำเริ่มต้นเท่ากันทุกกำลังการผลิต พบว่า เมื่อกำลังการผลิตของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการลดอุณหภูมิน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเพียง 1-3 วินาที จนกล่าวได้ว่า ใช้ระยะเวลาในการลดอุณหภูมิน้ำเท่ากัน เนื่องจากกำลังการผลิตของเครื่องสูงขึ้นเกิดจากการเพิ่มจำนวนท่อทำน้ำแข็งหลอด ทำให้พื้นที่การถ่ายโอนความร้อนจากน้ำไปยังสารทำความเย็นเพิ่มขึ้นและสอดคล้องกับปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นตามกำลังการผลิตด้วย และในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดทั้ง 2 รอบการผลิต พบว่า เครื่องทำน้ำแข็งหลอดทุกกำลังการผลิตใช้ระยะเวลาในการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดเท่ากัน เนื่องจากมีสมมุติฐานให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นเท่ากันทุกกำลังการผลิตและน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งหลอดภายใต้อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสรวมไปถึงเครื่องทุกกำลังการผลิตใช้ท่อทำน้ำแข็งหลอดขนาดเดียวกัน ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อพื้นที่จากน้ำไปยังสารทำความเย็นเท่ากันทุกกำลังการผลิตของเครื่อง อัตราการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดจนกระทั่งได้ความหนาตามต้องการจึงเท่ากันทุกกำลังการผลิตด้วย ดังนั้นระยะเวลาในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดจึงเท่ากันในทุกกำลังการผลิต

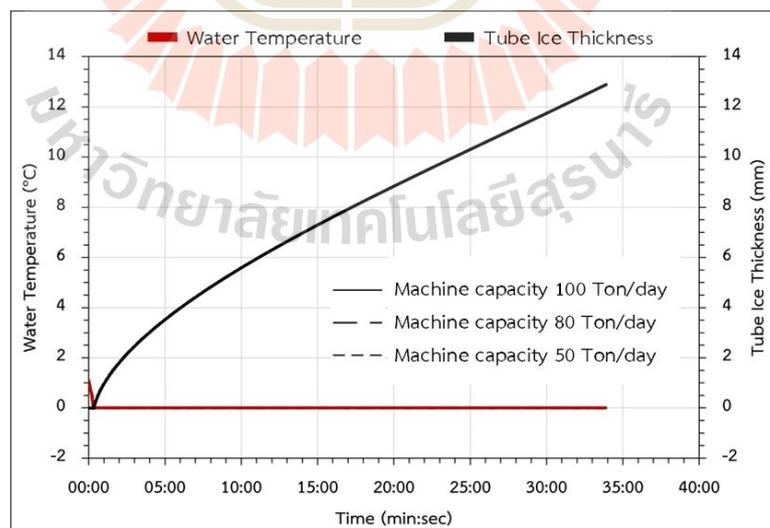
4.2.2 การวิเคราะห์ผลอุณหภูมิน้ำและความหนาของน้ำแข็งหลอดในกระบวนการทำความเย็น

จากการวิเคราะห์กระบวนการทำความเย็น เมื่อการจำลองระบบแบ่งกระบวนการทำความเย็นออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด จากบทที่ 3 จึงทำการจำลองระบบในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดเพื่อหา

อุณหภูมิน้ำและความหนาน้ำแข็งหลอดที่เปลี่ยนแปลงตลอดการทำความเย็นในรอบการผลิตที่ 1 และรอบการผลิตที่ 2 ของวัน ผลลัพธ์การจำลองอุณหภูมิน้ำและความหนาน้ำแข็งหลอดตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1 และรอบการผลิตที่ 2 ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 อุณหภูมิน้ำและความหนาน้ำแข็งหลอดตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1



รูปที่ 4.5 อุณหภูมิน้ำและความหนาน้ำแข็งหลอดตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2

จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ พบว่า ผลลัพธ์และแนวโน้มการลดอุณหภูมิน้ำใกล้เคียงกันทุกกำลังการผลิต เนื่องจากการจำลองใช้อุณหภูมิน้ำป้อนเท่ากันทุกกำลังการผลิตและมีสมมติฐานให้สารทำความเย็นรับความร้อนภายใต้ความดันและอุณหภูมิคงที่ โดยความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำและสารทำความเย็นมีอิทธิพลโดยตรงต่อการถ่ายโอนความร้อน ดังนั้นในช่วงแรกมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำและสารทำความเย็นมากจึงถ่ายโอนความร้อนได้ดี ทำให้อุณหภูมิน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่ในช่วงท้ายมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำและสารทำความเย็นน้อยจึงถ่ายโอนความร้อนได้ยากขึ้น ทำให้อุณหภูมิน้ำลดลงช้ากว่าช่วงแรก และส่วนช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด พบว่า ผลลัพธ์และแนวโน้มการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดใกล้เคียงกันทุกกำลังการผลิต เนื่องจากการจำลองมีสมมติฐานให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำและสารทำความเย็นมีค่าคงที่ ในขณะที่เดียวกันน้ำแข็งก่อตัวภายในท่อและเพิ่มความหนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้การถ่ายโอนความร้อนจากน้ำไปสู่สารทำความเย็นในช่วงนี้พิจารณาได้จากความต้านทานความร้อนจากความหนาของน้ำแข็งที่เกาะผิวภายในท่อ ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ในช่วงแรกน้ำแข็งได้ก่อตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความหนาของน้ำแข็งมีค่าน้อย ในขณะที่ช่วงท้ายน้ำแข็งก่อตัวได้ช้าลงเป็นผลมาจากน้ำแข็งหลอดมีความหนามากกว่าในช่วงแรก

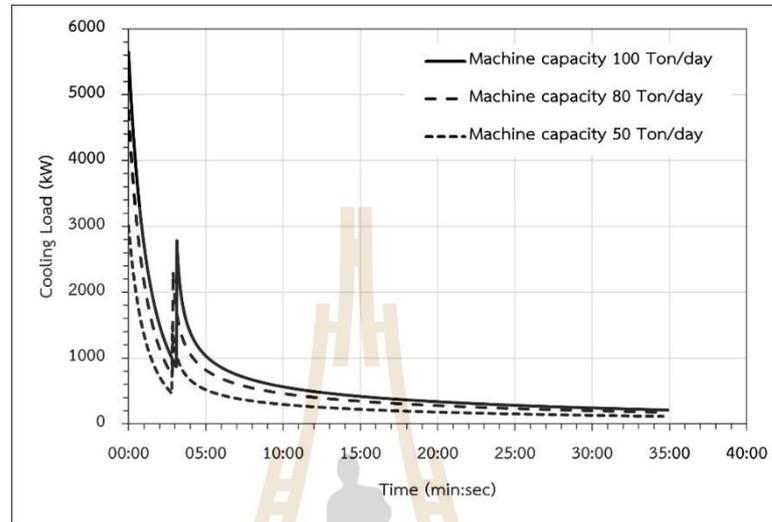
4.2.3 การวิเคราะห์ผลภาระการทำความเย็นในกระบวนการทำความเย็น

การทำความเย็นน้ำภายในหอทำน้ำแข็งหลอด เพื่อลดอุณหภูมิน้ำและเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งหลอดจนกระทั่งน้ำแข็งหลอดมีความหนาเป็นไปตามต้องการ เกิดการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำไปสู่สารทำความเย็น อัตราความร้อนที่สารทำความเย็นได้รับนี้เรียกว่า ภาระการทำความเย็น ซึ่งเป็นภาระจากการรับความร้อนของสารทำความเย็น ทำการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น รอบการผลิตที่ 1 และรอบการผลิตที่ 2 ของวัน ได้ผลลัพธ์ภาระการทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1 และรอบการผลิตที่ 2 ดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ

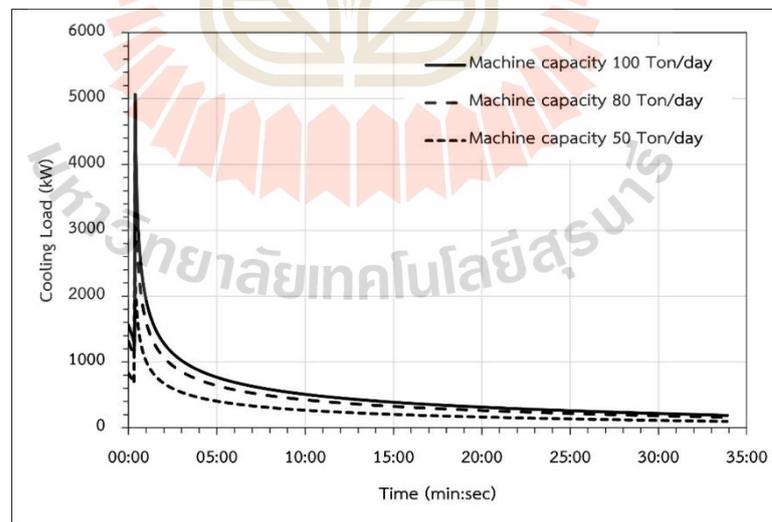
จากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แนวโน้มภาระการทำความเย็นเป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกกำลังการผลิต โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ ช่วงรอยต่อระหว่างการลดอุณหภูมิน้ำและการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด และช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ดังนี้

ช่วงการลดอุณหภูมิน้ำรอบการผลิตที่ 1 ภาระการทำความเย็นสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นการลดอุณหภูมิน้ำ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำและสารทำความเย็น จากนั้นภาระการทำความเย็นลดลงอย่างรวดเร็วจนเข้าสู่ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ในทางกลับกันรอบการผลิตที่ 2 ไม่เกิดภาระการทำความเย็นสูงสุดที่ช่วงเริ่มต้น ถึงแม้ความแตกต่างอุณหภูมิน้ำกับสารทำความเย็นมากกว่าช่วงน้ำแข็งหลอดก่อตัว เนื่องจากช่วงเริ่มต้นการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดความ

ต้านทานความร้อนของน้ำแข็งมีค่าน้อยจากความหนาน้ำแข็งที่น้อยมากและการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของน้ำเมื่อเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งตลอดเกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ปริมาณมาก



รูปที่ 4.6 ภาระการทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1



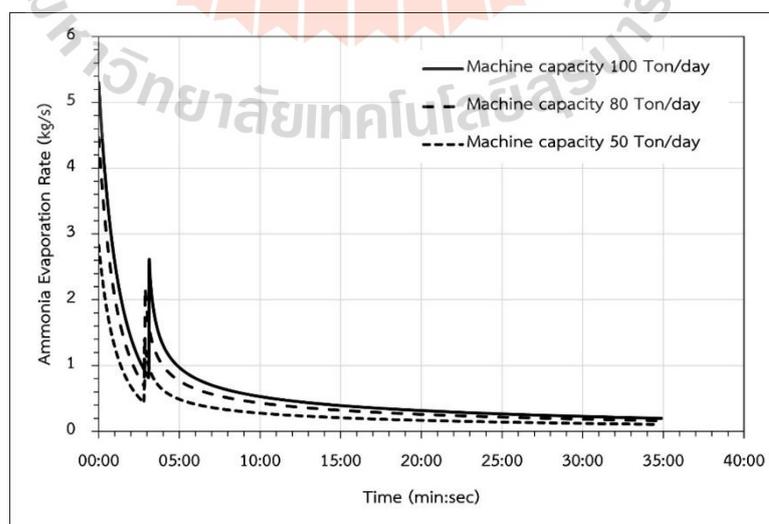
รูปที่ 4.7 ภาระการทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2

ช่วงรอยต่อระหว่างการลดอุณหภูมิน้ำและการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด มีสมมุติฐานให้น้ำมีอุณหภูมิเท่ากับผิวน้ำแข็งหลอดที่ 0 องศาเซลเซียส ทำให้ไม่มีความต้านทานความร้อนจากการพาความร้อนของน้ำรวมไปถึงความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนผ่านน้ำแข็งที่ความหนาแน่นน้อยมาก ทำให้สามารถถ่ายโอนความร้อนจากน้ำไปยังสารทำความเย็นได้มาก ส่งผลให้ในช่วงนี้ภาระการทำความเย็นจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ภาระการทำความเย็นจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดกระบวนการทำความเย็น เป็นผลมาจากความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนผ่านน้ำแข็งหลอดที่มีความหนาเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง โดยตลอดช่วงดังกล่าวนี้เกิดการถ่ายโอนความร้อนภายใต้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำและสารทำความเย็นคงที่ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของน้ำจากการเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งเกาะที่ผิวท่อและเพิ่มความหนาต่อเนื่องจนสิ้นสุดกระบวนการทำความเย็น

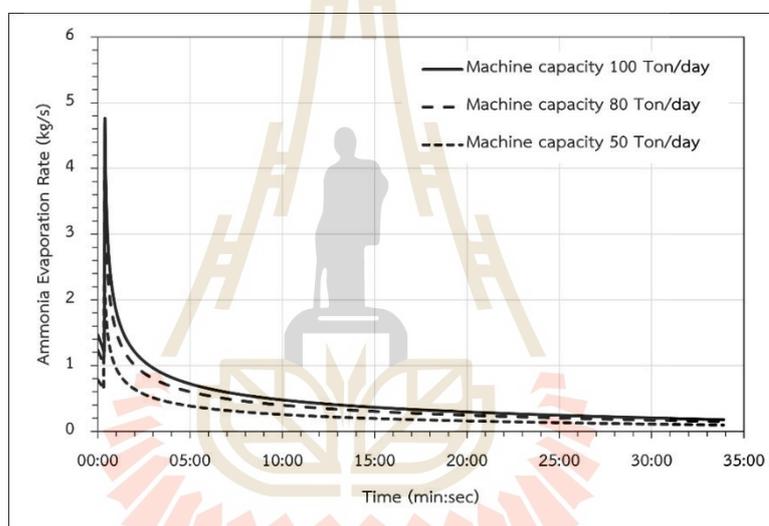
4.2.4 การวิเคราะห์ผลอัตราการระเหยสารทำความเย็นในกระบวนการทำความเย็น

สารทำความเย็นเหลวรับความร้อนภายใต้ความดันและอุณหภูมิคงที่ ส่งผลให้สารทำความเย็นเหลวอิ่มตัวเกิดการระเหยเป็นไออิ่มตัว ในขณะเดียวกันภาระการทำความเย็นเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ส่งผลให้อัตราการระเหยของสารทำความเย็นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทำการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น ได้ผลลัพธ์การจำลองอัตราการระเหยของสารทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1 และรอบการผลิตที่ 2 ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 อัตราการระเหยสารทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1

จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 เมื่อการศึกษาวิจัยนี้มีสมมุติฐานให้สารทำความเย็นเหลวรับความร้อนและเกิดการระเหยภายใต้ความดันคงที่ ซึ่งสารทำความเย็นมีความดันอิ่มตัวและอุณหภูมิอิ่มตัวที่เป็นไปตามมาตรฐานของกระบวนการผลิตน้ำแข็ง ดังนั้นเมื่อภาวะการทำความเย็นเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงส่งผลให้อัตราการระเหยของสารทำความเย็นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เห็นได้จากแนวโน้มของเส้นกราฟในรูปที่ 4.8 เหมือนกับเส้นกราฟในรูปที่ 4.6 และแนวโน้มของเส้นกราฟในรูปที่ 4.9 เหมือนกับเส้นกราฟในรูปที่ 4.7 จึงกล่าวได้ว่า เมื่อสารทำความเย็นรับภาวะการทำความเย็นภายใต้ความดันคงที่ อัตราการระเหยของสารทำความเย็นจะเป็นแปรผันตามภาวะการทำความเย็น



รูปที่ 4.9 อัตราการระเหยสารทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2

เพราะฉะนั้น หากต้องการนำอัตราการระเหยของสารทำความเย็นไปใช้ในการนำเสนอแนวทางการกำหนดอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอ จึงจำเป็นต้องพิจารณาภาวะการทำความเย็นให้ถี่ถ้วน โดยเฉพาะภาวะการทำความเย็นสูงสุดที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำความเย็น จากการวิเคราะห์ภาวะการทำความเย็น แสดงให้เห็นว่า ภาวะการทำความเย็นสูงสุดมีแนวโน้มเกิดขึ้นในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิน้ำป้อน รวมไปถึงเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นการก่อตัวของน้ำแข็งตลอดเมื่ออุณหภูมิน้ำป้อนมีค่าใกล้เคียง 0 องศาเซลเซียส แต่เกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากอุณหภูมิน้ำป้อนมักใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ในขณะที่เดียวกันจากการวิเคราะห์ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นในรอบการผลิตที่ 1 ที่อุณหภูมิน้ำป้อนสูงกว่า

รอบที่ 2 ก็ส่งผลไปยังระยะเวลาในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำของกระบวนการทำความเย็นด้วย ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อระยะเวลาและภาระการทำความเย็นในกระบวนการทำความเย็นในหัวข้อถัดไป

4.3 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อกระบวนการทำความเย็น

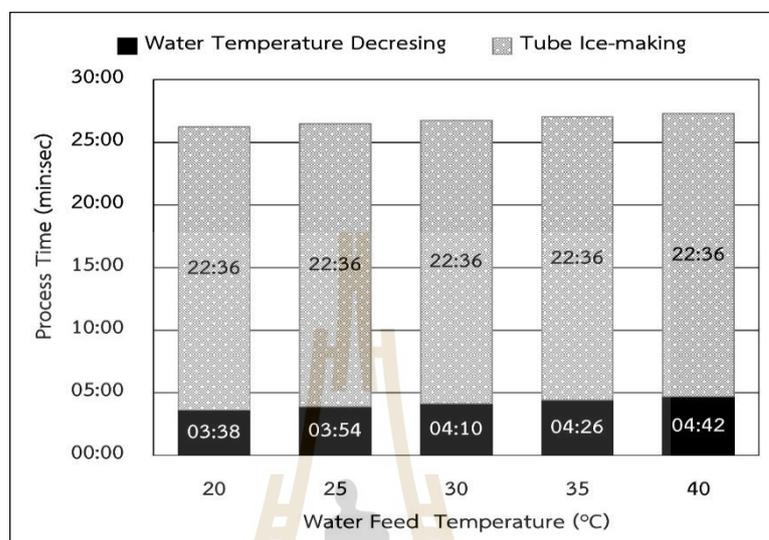
กระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด อุณหภูมิน้ำป้อนเกิดการเบี่ยงเบนทุกรอบการผลิตจาก 2 ปัจจัย ได้แก่ สิ่งแวดล้อมโดยรอบและการลดอุณหภูมิน้ำป้อนด้วยน้ำเย็นทิ้งจากการละลายน้ำแข็ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการทำความเย็นทำให้ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นที่ถูกตั้งไว้ของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดไม่เหมาะสมกับความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต รวมไปถึงส่งผลกระทบต่อภาระการทำความเย็นและอัตราการระเหยของสารทำความเย็น ในหัวข้อนี้จึงทำการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อระยะเวลาในกระบวนการทำความเย็น ภาระการทำความเย็น และอัตราการระเหยของสารทำความเย็น โดยมีกรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 30 ตันต่อวัน ความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต 11.06 มิลลิเมตร และศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำป้อนจำนวน 5 อุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิ 20 25 30 35 และ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิน้ำในสิ่งแวดล้อมที่มีช่วงอุณหภูมิครอบคลุมทุกฤดูกาลในประเทศไทย

4.3.1 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น

การผลิตน้ำแข็งหลอดความหนาที่ต้องการ เครื่องทำน้ำแข็งหลอดถูกตั้งเวลากระบวนการทำความเย็นไว้คงที่ทุกรอบการผลิตภายใต้อุณหภูมิน้ำป้อนค่าหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิน้ำป้อนเกิดการเบี่ยงเบนจึงส่งผลให้ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นไม่เหมาะสม ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น ทั้งในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงน้ำแข็งหลอดก่อตัว จึงจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็นจาก 5 อุณหภูมิ น้ำป้อน ได้ผลลัพธ์ระยะเวลาในช่วงลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ดังรูปที่ 4.10

จากรูปที่ 4.10 ช่วงการลดอุณหภูมิ พิจารณาเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิตเดิม เมื่ออุณหภูมิน้ำป้อนสูงขึ้น โดยมีสมมุติฐานให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นคงที่ การลดอุณหภูมิ น้ำจากอุณหภูมิน้ำป้อนไปยังอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จำเป็นจะต้องใช้ระยะเวลามากขึ้นตามไปด้วย เห็นได้จาก อุณหภูมิน้ำป้อนสูงขึ้น 5 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ระยะเวลาในช่วงลดอุณหภูมิน้ำเพิ่มขึ้น 16 วินาที ในขณะที่ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด มีสมมุติฐานให้น้ำแข็งหลอดก่อตัวที่อุณหภูมิ น้ำ 0 องศาเซลเซียสและสารทำความเย็นที่รับความร้อนมีอุณหภูมิคงที่ตลอดช่วงการก่อตัวของน้ำแข็ง พร้อมทั้งพิจารณาเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิตเดิม กล่าวคือ พื้นที่การถ่ายโอนความร้อนคงที่ ทำให้อัตราการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดจนกระทั่งได้ความหนาตามต้องการจึงเท่ากันในทุกอุณหภูมิ น้ำ

ป้อน ทำให้การก่อตัวของน้ำแข็งหลอดใช้ระยะเวลาเท่ากันในทุกอุณหภูมิน้ำป้อนด้วย จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิน้ำป้อนที่เพิ่มสูงขึ้นไม่มีอิทธิพลต่อระยะเวลาในการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด

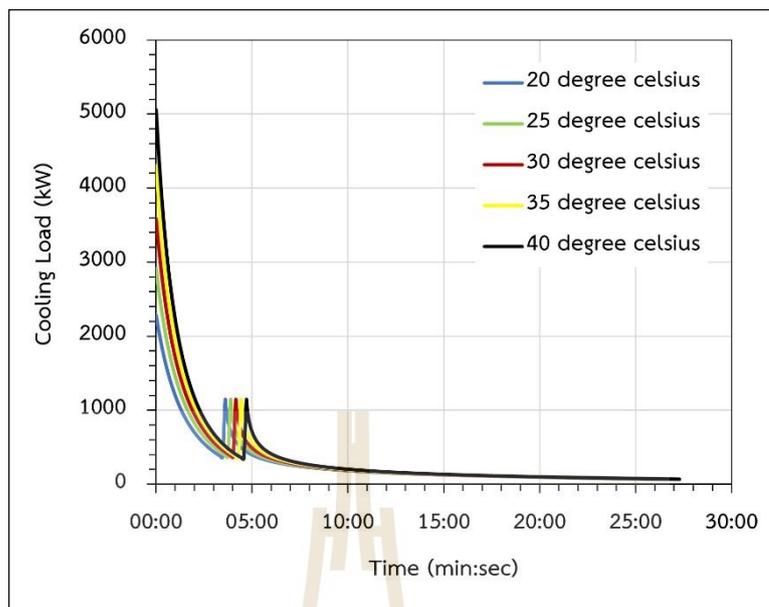


รูปที่ 4.10 ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นที่อุณหภูมิน้ำป้อนค่าต่าง ๆ

ดังนั้น หากพิจารณาระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น เห็นได้ชัดว่า ระยะเวลาในการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดมีส่วนประมาณ 80 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เดียวกันการผลิตน้ำแข็งหลอดทุกรอบการผลิตใน 1 วัน อุณหภูมิน้ำป้อนยังเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก รวมไปถึงเมื่อพิจารณาอุณหภูมิน้ำป้อนที่มีช่วงอุณหภูมิครอบคลุมทุกฤดูกาลตลอดทั้งปีแล้ว ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นเปลี่ยนแปลงเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ จากเหตุผลที่กล่าวมานี้ จึงสรุปได้ว่า อิทธิพลของอุณหภูมิน้ำป้อนไม่มีผลต่อระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น

4.3.2 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อภาระการทำความเย็นของกระบวนการทำความเย็น

เนื่องจากสารทำความเย็นเหลวอุณหภูมิต่ำรับความร้อนภายใต้ความดันคงที่และน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งหลอดที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสตลอดกระบวนการ หากพิจารณาแบบจำลองในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิน้ำป้อนมีผลกระทบต่อช่วงการลดอุณหภูมิและทำให้เกิดภาระการทำความเย็นสูงสุดขึ้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อภาระการทำความเย็น ทำการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น ได้ผลลัพธ์ของภาระการทำความเย็นในช่วงการลดอุณหภูมิและช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ภาระการทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นที่อุณหภูมิน้ำป้อนค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.11 ช่วงลดอุณหภูมิน้ำ เมื่ออุณหภูมิน้ำป้อนที่เพิ่มสูงขึ้นภายใต้สมมุติฐานให้อุณหภูมิสารทำความเย็นคงที่ ทำให้น้ำและสารทำความเย็นมีความแตกต่างของอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นภาระการทำความเย็นสูงสุดจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ช่วงการก่อดำของน้ำแข็งตลอดภาระการทำความเย็นเท่ากันทุกอุณหภูมิน้ำป้อน จึงกล่าวได้ว่าอิทธิพลของอุณหภูมิน้ำป้อนไม่มีผลต่อภาระการทำความเย็น เนื่องจากมีสมมุติฐานให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสและสารทำความเย็นรับความร้อนภายใต้อุณหภูมิกคงที่ ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำและสารทำความเย็นคงที่ตลอดกระบวนการ

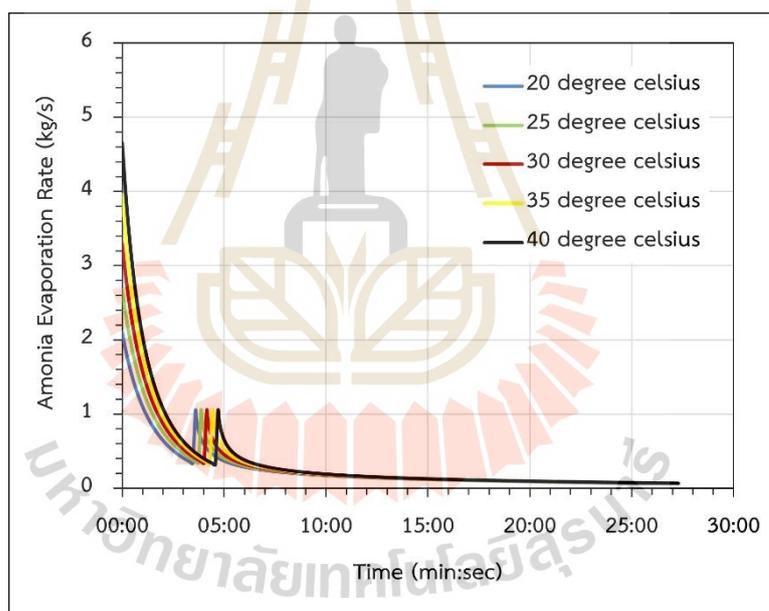
จากการวิเคราะห์ดังกล่าว สรุปได้ว่า อุณหภูมิน้ำป้อนไม่มีอิทธิพลต่อภาระการทำความเย็นในช่วงการก่อดำของน้ำแข็งตลอด ขณะที่อุณหภูมิน้ำป้อนมีผลต่อภาระการทำความเย็นสูงสุดในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ ส่งผลให้อัตราการระเหยสูงสุดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เมื่ออุณหภูมิน้ำป้อนเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากมีสมมุติฐานให้สารทำความเย็นเหลวอุณหภูมิต่ำรับความร้อนภายใต้อุณหภูมิกคงที่ตลอดกระบวนการ

4.3.3 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิน้ำป้อนต่ออัตราการระเหยสารทำความเย็นของกระบวนการทำความเย็น

สมมุติฐานให้สารทำความเย็นเหลวอุณหภูมิต่ำรับความร้อนจนเกิดการระเหยเป็นไออิมตัวภายใต้อุณหภูมิกคงที่ตลอดกระบวนการ ส่งผลให้อัตราการระเหยเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

เมื่อภาระการทำความเย็นเกิดการเปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลของอุณหภูมิน้ำป้อน ทำการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น ได้ผลลัพธ์ของอัตราการระเหยของสารทำความเย็นในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำและช่วงการก่อดวงน้ำแข็งหลอด ดังรูปที่ 4.12

จากรูปที่ 4.12 มีสมมุติฐานให้สารทำความเย็นเหลวอุณหภูมิได้รับความร้อนจนเกิดการระเหยเป็นไออิมตัวภายใต้อุณหภูมิคงที่ตลอดกระบวนการ จากการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อภาระการทำความเย็นจึงทราบว่า อุณหภูมิน้ำป้อนมีผลกระทบต่อภาระการทำความเย็นส่งผลให้อุณหภูมิน้ำป้อนมีผลกระทบต่ออัตราการระเหยของสารทำความเย็นตามไปด้วย โดยเฉพาะภาระการทำความเย็นสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะเริ่มต้นกระบวนการ ทำให้อัตราการระเหยของสารทำความเย็นสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงดังกล่าวด้วย และเมื่อภาระการทำความเย็นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้อัตราการระเหยของสารทำความเย็นเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.12 อัตราการระเหยสารทำความเย็นตลอดกระบวนการทำความเย็นที่อุณหภูมิน้ำป้อนค่าต่างๆ

จากการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อกระบวนการทำความเย็น ทำให้ทราบว่า อุณหภูมิน้ำป้อนไม่มีอิทธิพลต่อระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นและภาระการทำความเย็นในช่วงการก่อดวงน้ำแข็งหลอด แต่มีผลต่อภาระการทำความเย็นและอัตราการระเหยของสารทำความเย็นในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ ซึ่งอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอจะต้องมีความเหมาะสมกับอัตราการระเหยสารทำความเย็น ในหัวข้อถัดไปจึงทำการวิเคราะห์ผลอัตราการดูด

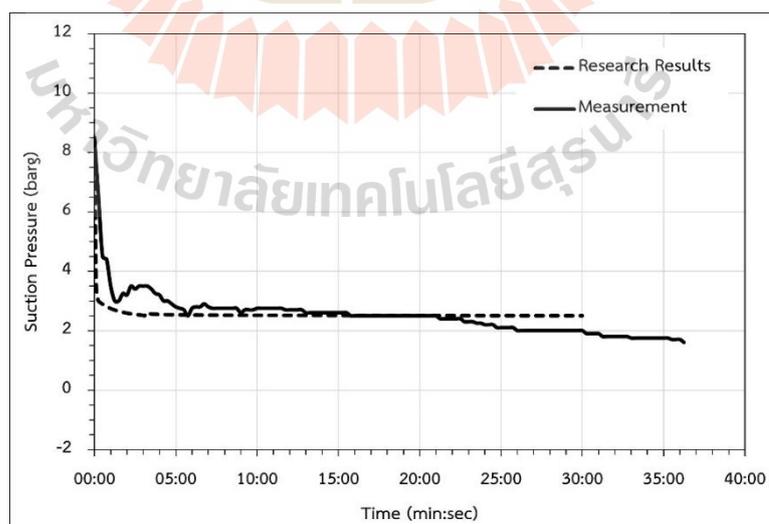
ของเครื่องอัดไอ ประกอบไปด้วย การวิเคราะห์อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวล ความดันและอุณหภูมิด้านดูดของเครื่องอัดไอ

4.4 การวิเคราะห์ผลอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอ

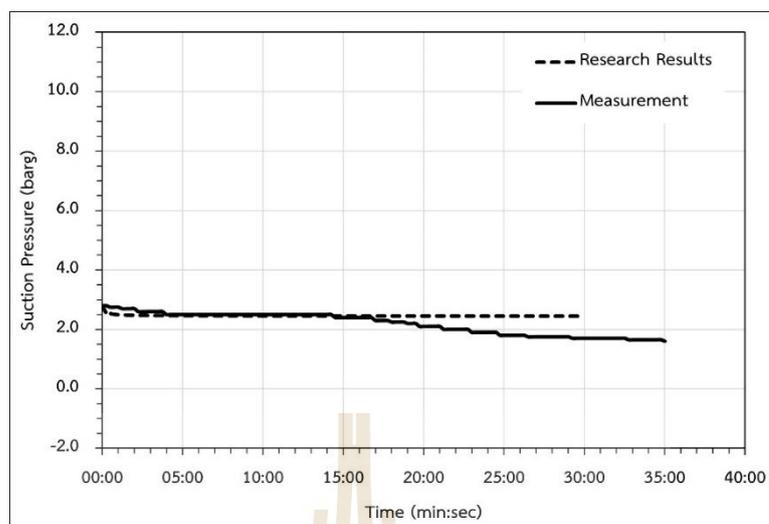
เครื่องทำน้ำแข็งหลอดในอุตสาหกรรมผลิตน้ำแข็งหลอดนิยมใช้เครื่องอัดไอชนิดลูกสูบที่มีอัตราการดูดโดยปริมาตรคงที่ (Constant Volume Flow Rate) และความเร็วรอบคงที่ (Fixed Speed) การศึกษาวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการกำหนดอัตราการดูดของเครื่องอัดไอ โดยการวิเคราะห์อัตราการดูดของเครื่องอัดไอที่ติดตั้งกับเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 80 และ 100 ตันต่อวัน พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแนวทางการกำหนดอัตราการดูดของเครื่องอัดไอ ดังนี้

4.4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแนวทางการกำหนดอัตราการดูดของเครื่องอัดไอ

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแนวทางการกำหนดอัตราการดูดของเครื่องอัดไอ ได้ทำการตรวจวัดความดันด้านดูดของเครื่องอัดไอขณะเครื่องทำน้ำแข็งหลอดทำงานภายใต้กระบวนการทำความเย็น จากนั้นทำการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็นเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังผลิต 100 ตัน/วัน ได้ผลลัพธ์ความดันสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอเทียบกับความดันด้านดูดจากการตรวจวัดของรอบการผลิตที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ความดันของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็นเปรียบเทียบกับความดันด้านดูดจากการตรวจวัด รอบการผลิตที่ 1



รูปที่ 4.14 ความดันของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็น
เปรียบเทียบกับความดันด้านดูดจากการตรวจวัด รอบการผลิตที่ 2

จากรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 เมื่อตรวจวัดความดันที่แสดงในมาตรวัดความดันด้านดูดของเครื่องอัดไอ ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมยังนิยมใช้มาตรวัดความดันแบบเข็ม โดยค่าความละเอียดของมาตรวัดความดันที่อ่านนั้นอยู่ที่ 0.5 bar เป็นค่าความละเอียดที่เพียงพอต่อการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม ผลจากการตรวจวัดที่ได้จากการอ่านมาตรวัดความดัน พบว่า รอบการผลิตที่ 1 ความดันของสารทำความเย็นด้านดูด ณ ช่วงเริ่มต้นมีค่าสูงสุดและอุณหภูมิใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมโดยรอบเครื่องทำน้ำแข็งหลอด เนื่องจากเป็นรอบการผลิตแรกของวันและเครื่องทำน้ำแข็งหลอดถูกปิดการทำงานเป็นเวลาหลายชั่วโมง ขณะเดียวกันส่วนรอบการผลิตที่ 2 ความดันของสารทำความเย็นด้านดูด ณ ช่วงเริ่มต้นจะเป็นความดันสุดท้ายจากกระบวนการละลายในรอบการผลิตก่อนหน้า

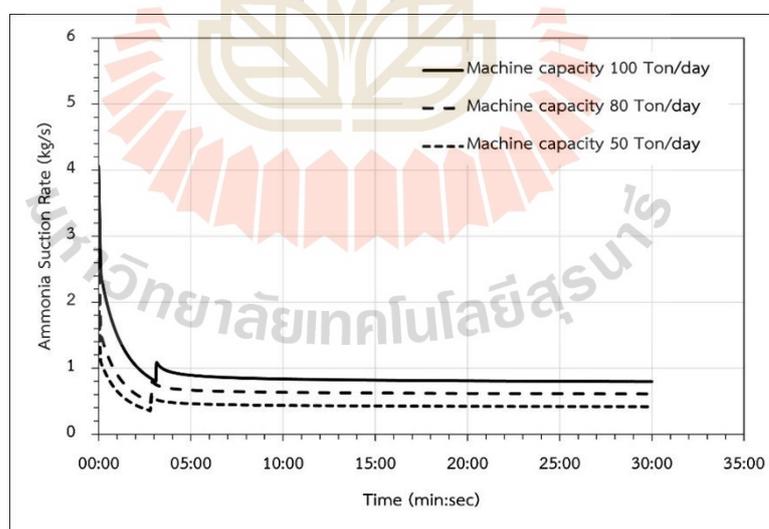
ช่วง 20 นาทีแรกนั้นความดันด้านดูดลดลงอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มคงที่ ต่อจากนั้นความดันมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดกระบวนการ โดยในช่วง 5 นาทีสุดท้ายของกระบวนการนั้นคือ ช่วงรอยต่อก่อนเข้าสู่กระบวนการละลายน้ำแข็ง เครื่องทำน้ำแข็งหลอดจะหยุดการเติมสารทำความเย็นอุณหภูมิต่ำเข้าสู่หอทำน้ำแข็งหลอด เพื่อสะสมสารทำความเย็นอุณหภูมิสูงในถังเก็บสารทำความเย็นเหลว สำหรับใช้ในการละลายน้ำแข็งรวมถึงลดปริมาณสารทำความเย็นเหลวอุณหภูมิต่ำในหอทำน้ำแข็งหลอด ส่งผลให้อัตราการระเหยของสารทำความเย็นลดลงเนื่องจากพื้นที่การถ่ายโอนลดลง ทำให้ความดันสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอลดลงตามไปด้วย

ดังนั้นการจำลองความดันสารทำความเย็นในด้านดูดของเครื่องอัดไอ จึงสิ้นสุดการจำลองเมื่อหยุดการเติมสารทำความเย็นอุณหภูมิต่ำเข้าสู่หอทำน้ำแข็งหลอด ซึ่งหมายถึงสิ้นสุดกระบวนการทำความเย็น

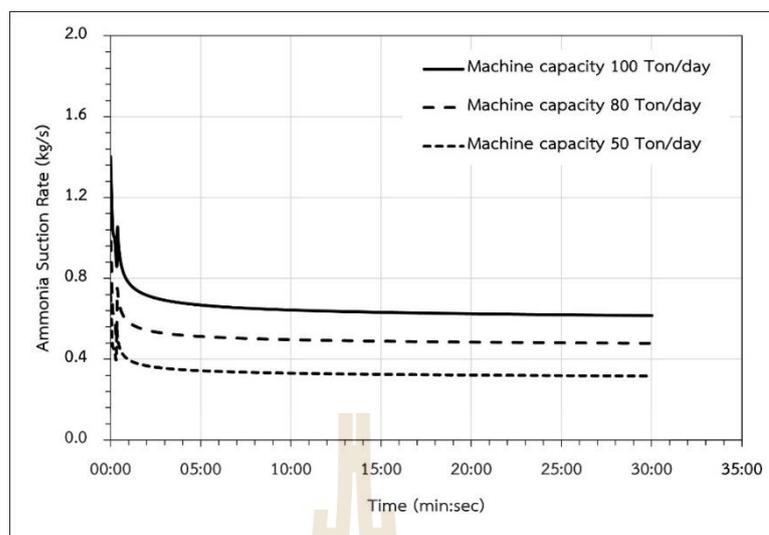
เมื่อนำผลลัพธ์การจำลองความดันเทียบกับค่าความดันจากการตรวจวัดโดยการอ่านมาตรวัดความดันแบบเข็ม พบว่า ผลลัพธ์จากการจำลองมีความแม่นยำเป็นที่น่าพึงพอใจ ซึ่งการจำลองนี้มีสมมุติฐานให้สารทำความเย็นไออิมตัวที่เข้าสู่แอกคิวมูเลเตอร์มีสถานะคงตัว เนื่องจากสารทำความเย็นเหลวอุณหภูมิต่ำเกิดการระเหยภายใต้ความดันคงที่ รวมไปถึงให้สถานะของสารทำความเย็นที่เปลี่ยนแปลงไปภายในแอกคิวมูเลเตอร์คือสถานะเดียวกับสารทำความเย็นในด้านดูดของเครื่องอัดไอ เนื่องด้วยสารทำความเย็นทุกอนุภาคในระบบเป็นสารเนื้อเดียวกัน

4.4.2 การวิเคราะห์ผลอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอ

ในการวิเคราะห์อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวลของเครื่องอัดไอ การจำลองนี้ ได้สร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพื่อหาปริมาณจำเพาะของสารทำความเย็นร่วมกับใช้อัตราการดูดโดยปริมาตรของเครื่องอัดไอ ทำให้ทราบถึงอัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวลตลอดกระบวนการ จำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น ได้ผลลัพธ์อัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอรอบผลิตที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวลของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1



รูปที่ 4.16 อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวลของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2

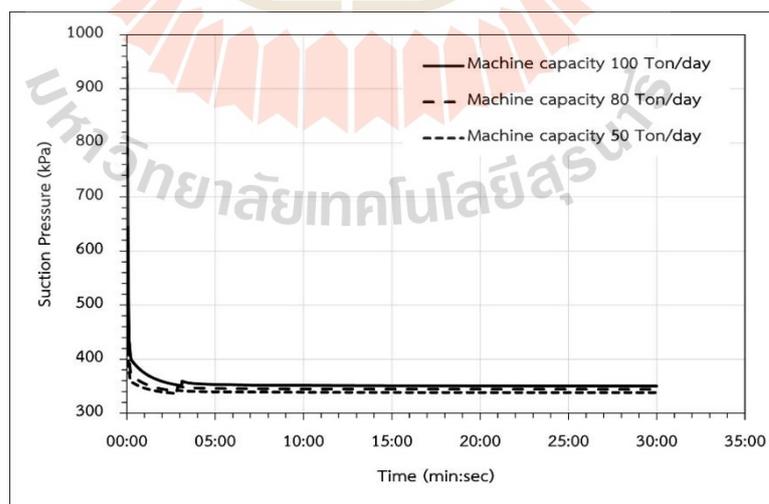
จากรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวลของเครื่องอัดไอสูงสุดเกิดขึ้นขณะเริ่มต้นกระบวนการเช่นเดียวกับอัตราการระเหยของสารทำความเย็น และเมื่อเข้าสู่ช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งตลอดอัตราการดูดสารทำความเย็นมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากอัตราการระเหยของสารทำความเย็นมีค่าสูงขึ้น จากนั้นอัตราการดูดจึงลดลงต่อเนื่องจนสิ้นสุดกระบวนการทำความเย็น เห็นได้ชัดว่า อัตราการระเหยของสารทำความเย็นส่งผลโดยตรงต่ออัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวลและมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันตลอดกระบวนการ เนื่องจากแบบจำลองของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดนี้พิจารณาเครื่องอัดไอที่มีอัตราการดูดโดยปริมาตรคงที่ รวมไปถึงปริมาตรควบคุมสารทำความเย็นที่พิจารณาภายในแอกคิวมูเลเตอร์และหอทำน้ำแข็งหลอดด้านไอสารทำความเย็นนั้นจะมีปริมาตรคงที่ด้วย อัตราการระเหยที่ใช้ในการวิเคราะห์อัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวลนี้จะนำไปสู่ความดันด้านดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอในหัวข้อถัดไป

4.4.3 การวิเคราะห์ผลความดันสารทำความเย็นในด้านดูดของเครื่องอัดไอ

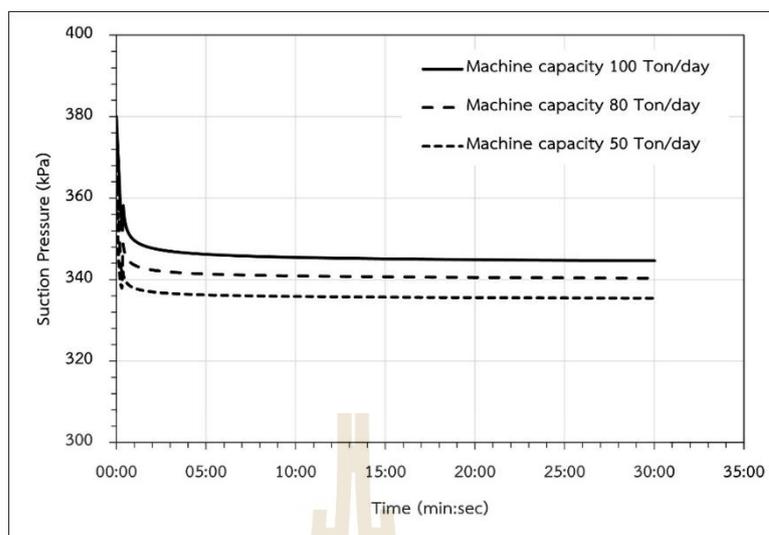
ในการวิเคราะห์ความดันสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ การจำลองนี้ได้สร้างแบบจำลองเพื่อหาความดันสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ โดยนำข้อมูลจากการตรวจวัดความแตกต่างระหว่างความดันด้านดูดกับด้านจ่ายที่เครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็นมาสร้างแบบจำลองร่วมกับข้อมูลจากการจำลองอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอซึ่งมีสมมุติฐานให้เท่ากับอัตราการระเหยสารทำความเย็น เนื่องจากไม่สามารถตรวจวัดอัตราการ

ดูดโดยมวลของเครื่องอัดไอดีและจากการตรวจวัดความดันด้านดูดพบว่า ช่วงเวลาส่วนใหญ่ความดันเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนกล่าวได้ว่า ใกล้เคียงสภาวะคงตัวและการไหลคงตัว จึงสามารถประเมินให้อัตราการระเหยสารทำความเย็นเท่ากับอัตราการดูดโดยมวลของเครื่องอัดไอดี จากนั้นนำผลลัพธ์ความแตกต่างความดันระหว่างด้านดูดกับด้านจ่าย ไปใช้ในการกำหนดความดันด้านดูด สมมุติฐานให้ความดันด้านจ่ายคงที่ตามข้อมูลที่ปรากฏของเครื่องอัดไอดี ทำการจำลองระบบ ได้ผลลัพธ์ความดันสารทำความเย็นด้านดูดรอบการผลิตที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ผลลัพธ์จากการจำลองความดันของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอดี โดยความดันของสารทำความเย็นด้านดูดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงแรก มีอิทธิพลมาจากพลังงานโดยมวลที่ออกจากระบบมากกว่าพลังงานโดยมวลที่เข้าสู่ระบบ ส่งผลให้พลังงานภายในระบบมีแนวโน้มลดลง ความดันภายในระบบซึ่งเทียบเท่ากับความดันด้านดูด จึงลดลงเช่นเดียวกัน เห็นได้จาก อัตราการดูดสารทำความเย็นออกจากระบบมากกว่าอัตราการระเหยของสารทำความเย็นเข้าสู่ระบบ รวมไปถึงเอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ถูกดูดออกจากระบบมีค่ามากกว่าสภาวะของสารทำความเย็นที่ระเหยเข้าสู่ระบบ เนื่องจากเอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ระเหยเข้าสู่ระบบมีค่าคงที่ และช่วงเวลาที่ 5 เป็นต้นไป ค่าความดันของสารทำความเย็นด้านดูดนั้นลดลงเล็กน้อยตามเวลา จนกล่าวได้ว่าเข้าใกล้สภาวะคงตัว สังเกตได้จากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความดันในช่วงดังกล่าว เนื่องจากพลังงานภายในระบบเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตามเวลาและพลังงานโดยมวลที่เข้าสู่ระบบจากการอัดการระเหยของสารทำความเย็นใกล้เคียงค่าคงที่



รูปที่ 4.17 ความดันของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอดีตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1



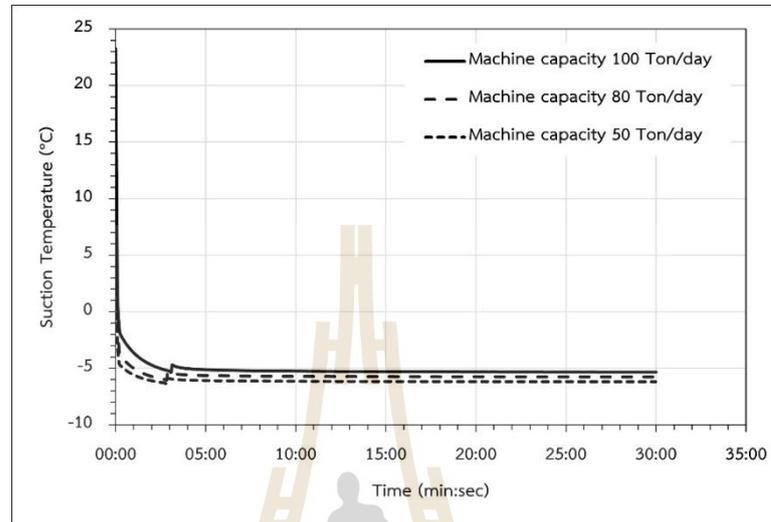
รูปที่ 4.18 ความดันของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2

จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ผลลัพธ์จากการจำลองความดันของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ โดยความดันของสารทำความเย็นด้านดูดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงแรก มีอิทธิพลมาจากพลังงานโดยมวลที่ออกจากระบบมากกว่าพลังงานโดยมวลที่เข้าสู่ระบบ ส่งผลให้พลังงานภายในระบบมีแนวโน้มลดลง ความดันภายในระบบซึ่งเทียบเท่ากับความดันด้านดูดจึงลดลงเช่นเดียวกัน เห็นได้จาก อัตราการดูดสารทำความเย็นออกจากระบบมากกว่าอัตราการระเหยของสารทำความเย็นเข้าสู่ระบบ รวมไปถึงเอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ถูกดูดออกจากระบบมีค่ามากกว่าสถานะของสารทำความเย็นที่ระเหยเข้าสู่ระบบ เนื่องจากเอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ระเหยเข้าสู่ระบบมีค่าคงที่ และช่วงเวลาที่ 5 เป็นต้นไป ค่าความดันของสารทำความเย็นด้านดูดนั้นลดลงเล็กน้อยตามเวลา จนกล่าวได้ว่าเข้าใกล้สภาวะคงตัว สังเกตได้จากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความดันในช่วงดังกล่าว เนื่องจากพลังงานภายในระบบเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตามเวลาและพลังงานโดยมวลที่เข้าสู่ระบบจากการอัตราการระเหยของสารทำความเย็นใกล้เคียงค่าคงที่

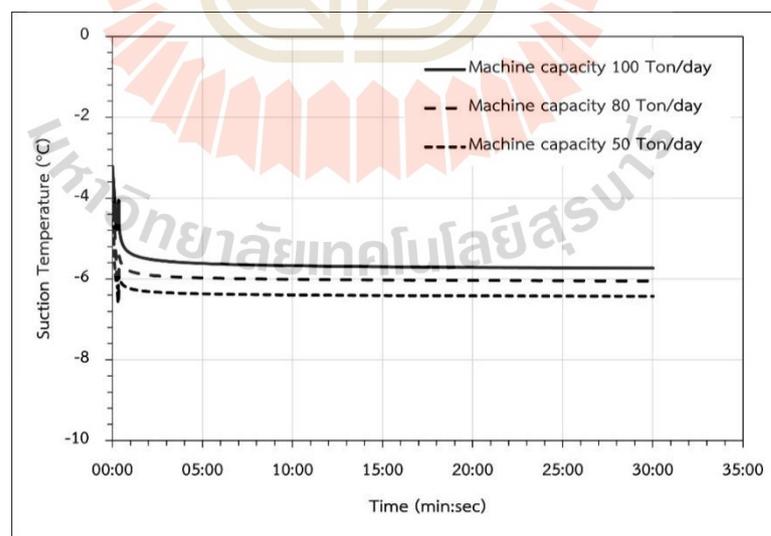
4.4.4 การวิเคราะห์ผลอุณหภูมิของสารทำความเย็นในด้านดูดของเครื่องอัดไอ

ในการวิเคราะห์อุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ การจำลองได้สร้างแบบจำลองเพื่อหาเอนทาลปีและนำไปสู่พลังงานภายในจำเพาะของสารทำความเย็น จากนั้นพิจารณาความดันสารทำความเย็นด้านดูดร่วมกับพลังงานภายในจำเพาะของสารทำความเย็นด้านดูด เพื่อหา

อุณหภูมิสารทำความเย็น จำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น ได้ผลลัพธ์ของอุณหภูมิสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอรอบการผลิตที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 อุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1



รูปที่ 4.20 อุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอตลอดกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2

จากรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ผลลัพธ์จากการจำลองอุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ โดยรอบการผลิตที่ 1 อุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูดเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมโดยรอบเครื่องทำน้ำแข็งหลอด เนื่องจากเป็นรอบการผลิตแรกของวันและเครื่องทำน้ำแข็งหลอดถูกปิดการทำงานเป็นเวลาหลายชั่วโมง ส่วนรอบการผลิตที่ 2 อุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูดเริ่มต้นจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิสุดท้ายจากกระบวนการละลายในรอบการผลิตก่อนหน้า จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเข้าใกล้อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำความเย็นเหลวที่ประมาณ -6 องศาเซลเซียส เนื่องจากสารทำความเย็นอุณหภูมิคงที่ระเหยเข้าสู่ปริมาตรควบคุม ทำให้สารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำความเย็นเหลว



บทที่ 5

การจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นเพื่อการประหยัดพลังงาน

ในบทนี้มีจุดประสงค์เพื่อแสดงถึงการจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นจากการกำหนดความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการ ซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้พลังงานและน้ำแข็งหลอดยังคงลักษณะที่เหมาะสมต่อการจัดจำหน่าย

5.1 อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าของโรงงาน

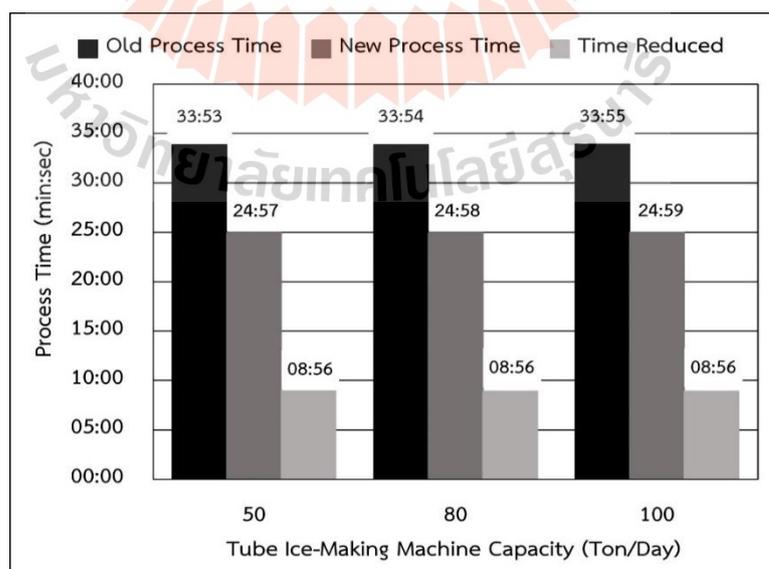
ในปัจจุบันโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอด คิดค่าพลังงานไฟฟ้าแบบอัตราตามช่วงเวลาการใช้งาน (Time of use rate : TOU) เนื่องจากค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยในช่วง Off-Peak ถูกกว่าแบบอัตราตามช่วงเวลาของวัน (Time of day rate : TOD) โดยช่วงเวลาใน Off-Peak คือ วันจันทร์ - ศุกร์ เวลา 22:00 – 09:00 น. วันเสาร์ – อาทิตย์และวันหยุดราชการ เวลา 00:00 – 24:00 น. ซึ่งกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดจะดำเนินการอยู่ในช่วง Off-Peak ทั้งหมด เนื่องจากการผลิตน้ำแข็งหลอดมีต้นทุนส่วนใหญ่มาจากค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยมีการกำหนดอัตราค่าไฟฟ้า ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าตามช่วงเวลาการใช้ (TOU)

ช่วงแรงดันที่ใช้งาน	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง)	
	On Peak	Off Peak
ตั้งแต่ 69 kV ขึ้นไป	4.1283	2.6107
22 – 23 kV (PEA) 12 -24 kV (MEA)	4.2097	2.6295
ต่ำกว่า 22 kV (PEA) ต่ำกว่า 12 kV (MEA)	4.3555	2.6627

5.2 กรณีศึกษาการจัดการระยะเวลากระบวนการทำความเย็นที่สะท้อนสู่การใช้พลังงานในกระบวนการทำความเย็น

จากข้อมูลการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็นภายใต้เงื่อนไขในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดดั่งภาคผนวก ค ทำให้ทราบถึงระยะเวลาของการทำความเย็นภายใต้ความหนาน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต ในขณะเดียวกันให้ความหนาน้ำแข็งหลอดของรอบการผลิตที่ 2 เป็นตัวแทนของทุกรอบการผลิตยกเว้นรอบการผลิตแรก เนื่องจากรอบการผลิตที่ 1 ไม่มีอิทธิพลของกระบวนการละลายน้ำแข็ง โดยในรอบการผลิตที่ 1 น้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้มีความหนาน้อยที่สุด แต่เป็นความหนาที่เป็นไปตามความต้องการผลิตและความต้องการของผู้บริโภคแล้ว ในขณะเดียวกันรอบการผลิตที่ 2 เป็นต้นไปน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้มีความหนามากกว่ารอบการผลิตที่ 1 ดังนั้น แนวทางการจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นจึงใช้การปรับลดความหนาของน้ำแข็งหลอดที่ผลิตในรอบการผลิตที่ 2 เป็นต้นไปเท่ากับความหนาน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้ในรอบการผลิตที่ 1 เพื่อลดระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นของรอบการผลิตที่ 2 เป็นต้นไปซึ่งเป็นรอบการผลิตส่วนใหญ่ของวัน จึงทำการจำลองกระบวนการทำความเย็นเพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ของรอบการผลิตที่ 2 เป็นต้นไป ภายใต้ความหนาน้ำแข็งหลอดเท่ากับรอบการผลิตที่ 1 ได้ผลลัพธ์ระยะเวลากระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 80 และ 100 ตันต่อวัน พร้อมทั้งแสดงระยะเวลากระบวนการทำความเย็นที่ลดลงได้ ดังรูปที่ 5.1 ดังนี้



รูปที่ 5.1 ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นจากการจัดการกระบวนการทำความเย็น

จากรูปที่ 5.1 พบว่า ภายใต้ภายใต้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดเท่ากับรอบการผลิตที่ 1 ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2 เป็นต้นไปนั้นลดลง 8 นาที 56 วินาที คิดเป็น 26.35 เปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาเดิมในกระบวนการทำความเย็น ซึ่งเครื่องทำน้ำแข็งหลอดทุกกำลังการผลิตลดระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นได้เท่ากัน เนื่องจากมีขนาดท่อทำน้ำแข็งหลอดและอุณหภูมิสารทำความเย็นเท่ากัน หากพิจารณาอัตราการใช้พลังงานของกระบวนการทำความเย็นมีค่าคงที่ ในขณะที่ระยะเวลากระบวนการทำความเย็นลดลง ทำให้ค่ากิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) ในกระบวนการทำความเย็นมีปริมาณการใช้ลดลง ซึ่งเป็นแนวทางการประหยัดพลังงานของกระบวนการทำความเย็นที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

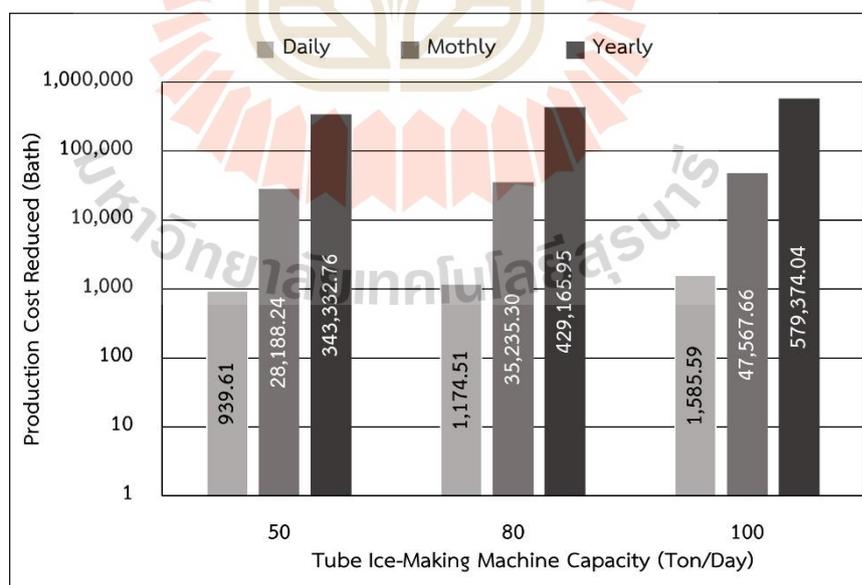
5.3 กรณีศึกษาการประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าจากการจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น

จากผลลัพธ์การจำลองระยะเวลากระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2 เป็นต้นไป ภายใต้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดของรอบการผลิตที่ 1 แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลากระบวนการทำความเย็นลดลง 26.35 เปอร์เซ็นต์ หากพิจารณาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าคงที่ ภายใต้จำนวนรอบการผลิตคงเดิม 15 รอบต่อวัน (Daily) โดยไม่พิจารณาการรอบการผลิตที่ 1 ของวัน กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 80 และ 100 ตันต่อวัน ดังตารางที่ 5.2 ทำการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าโดยใช้อัตราค่าไฟฟ้าตาม TOU ช่วง Off-Peak คือ 2.6295 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง ได้ผลลัพธ์การประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้ายวัน รายเดือนและรายปีจากการจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น ดังรูปที่ 5.2

จากตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.2 ผลลัพธ์ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดทุกกำลังการผลิต พบว่า การจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นเพื่อการประหยัดพลังงานเครื่องทำน้ำแข็งหลอดทุกกำลังการผลิตสามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 26.35 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าเดิมในกระบวนการทำความเย็น โดยเครื่องทำน้ำแข็งหลอดที่มีกำลังผลิตสูงสามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าเครื่องที่มีกำลังการผลิตต่ำ เนื่องจากเครื่องที่มีกำลังผลิตสูงนั้นมีอัตราการใช้พลังงานที่สูงกว่าเครื่องที่มีกำลังการผลิตต่ำกว่า ภายใต้จำนวนรอบและระยะเวลาที่ลดลงเท่ากันทุกกำลังการผลิต รวมไปถึงค่าพลังงานไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงเท่ากันเนื่องด้วยใช้อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าแบบ TOU ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นเพื่อการประหยัดพลังงาน สามารถลดระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นและลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 26.35 เปอร์เซ็นต์ต่อรอบการผลิต จึงเป็นแนวทางที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็งหลอดได้ เพื่อลดต้นทุนจากค่าพลังงานไฟฟ้า ลดระยะเวลาการผลิตและลดระยะเวลาการทำงานลงได้

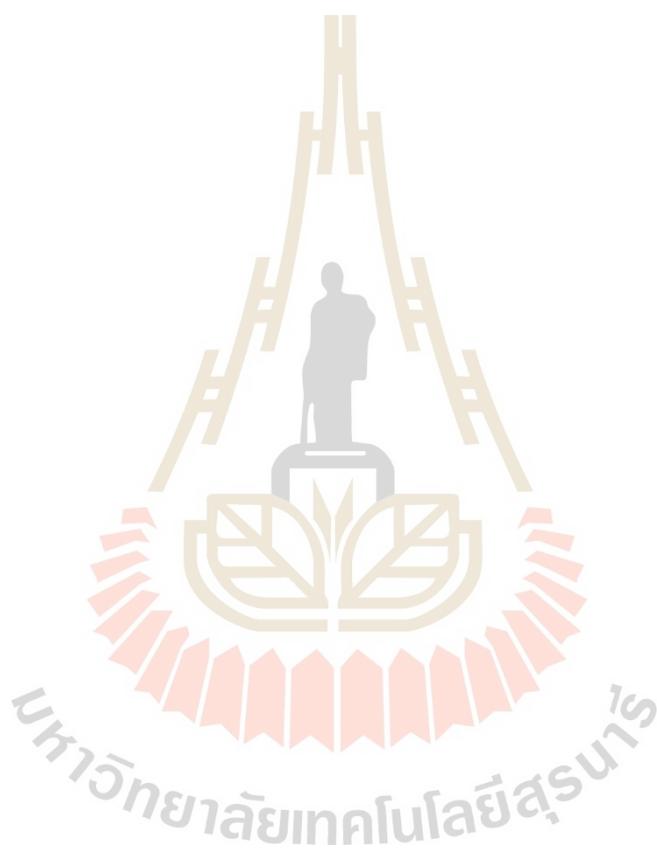
ตารางที่ 5.2 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า จำนวนรอบการผลิตและกิโลวัตต์ชั่วโมงที่ลดลง

เครื่องทำน้ำแข็งหลอด		กำลังการผลิต (ตัน/วัน)		
		50	80	100
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า	กิโลวัตต์	160	200	270
จำนวนรอบการผลิต	รอบ/วัน	15	15	15
	รอบ/เดือน	450	450	450
	รอบ/ปี	5481	5481	5481
กิโลวัตต์ชั่วโมงที่ลดลง (กิโลวัตต์ชั่วโมงเดิมที่ใช้)	กิโลวัตต์ชั่วโมง/รอบ	23.8 (90.4)	29.8 (113.0)	40.2 (152.6)
	กิโลวัตต์ชั่วโมง/วัน	357.3 (1355.3)	446.7 (1695.0)	603.0 (2289.4)
	กิโลวัตต์ชั่วโมง/เดือน	10720.0 (40660.0)	13400.0 (50850.0)	18090.0 (68681.3)
	กิโลวัตต์ชั่วโมง/ปี	130569.6 (495238.8)	163212.0 (619353.0)	220336.2 (836537.6)



รูปที่ 5.2 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงจากการจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น

ข้อเสนอแนะของการศึกษาวิจัย คือ การปรับลดระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2 ของวันเป็นต้นไปภายใต้ความหนาน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้เท่ากับควมหนาน้ำแข็งหลอดของรอบการผลิตที่ 1 จะทำให้กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อรอบการผลิตลดลงถึง 26.35 เปอร์เซ็นต์ของกิโลวัตต์ชั่วโมงเดิม สามารถลดต้นทุนการผลิตจากค่าพลังงานไฟฟ้าลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาวิจัย

6.1 สรุปผลการวิเคราะห์ภาระการทำความเย็นโดยใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์

แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานที่สร้างขึ้นเป็นระบบสมการเพื่อการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดของกรณีศึกษา ได้แก่ เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 80 และ 100 ตันต่อวัน โดยการจำลองด้วยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง (Successive Substituting) ซึ่งเป็นวิธีการจำลองระบบที่มีประสิทธิภาพของกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด เห็นได้จาก ผลลัพธ์ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ก่อตัวจากการจำลองเป็นไปในทิศทางเดียวกับข้อมูลจากการตรวจวัดความหนาแน่นน้ำแข็งที่ก่อตัวภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดของงานวิจัยในอดีต พร้อมทั้งสามารถทำนายระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาแน่นของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิตได้ รวมไปถึงภาระการทำความเย็นภายใต้ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของภาระการทำความเย็นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการ เมื่อทำการวิเคราะห์หิอทธิพลของอุณหภูมิน้ำป้อนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงถูกรอบการผลิตซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการทำความเย็น ซึ่งให้เห็นว่า อุณหภูมิน้ำป้อนไม่มีอิทธิพลต่อระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นภายใต้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต แต่มีอิทธิพลต่อภาระการทำความเย็นสูงสุด และจากการวิเคราะห์ภาระการทำความเย็นภายใต้ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น นำไปสู่อัตราการระเหยของสารทำความเย็นซึ่งเป็นแนวทางการกำหนดอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอที่เหมาะสมโดยพิจารณาอัตราการระเหยดังกล่าวตลอดจนอัตราการดูดสารทำความเย็นและสร้างแบบจำลองเฉพาะของเครื่องอัดไอเพื่อหาสภาวะของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เห็นได้ชัดว่า สามารถทำนายพฤติกรรมความดันสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอได้อย่างแม่นยำสอดคล้องกับข้อมูลจากการตรวจวัด สะท้อนให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของแนวทางการกำหนดอัตราการดูดสารทำความเย็นที่เหมาะสมกับอัตราการระเหยของสารทำความเย็น ในขณะที่เดียวกันสามารถนำแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น ไปใช้สำหรับการจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นเพื่อประหยัดพลังงานได้

6.2 สรุปผลการจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นเพื่อการประหยัดพลังงาน

จากการใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น สำหรับการจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น โดยการลดระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 2 เป็นไปต้นไปภายใต้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดเท่ากับรอบการผลิตที่ 1 ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยที่สุดและน้ำแข็งหลอดยังคงลักษณะเป็นไปตามความต้องการของผู้บริโภค พบว่า เครื่องทำน้ำแข็งหลอดทุกกำลังการผลิตสามารถลดระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นได้ถึง 26.35 เปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาเดิม ส่งผลให้สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าลงได้ 26.35 เปอร์เซ็นต์ตามไปด้วย เนื่องจากเครื่องทำน้ำแข็งหลอดมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าคงที่ตลอดกระบวนการ จึงสรุปได้ว่า การจัดการระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นโดยการลดระยะเวลาของรอบการผลิตที่ 2 เป็นต้นไปซึ่งผลิตน้ำแข็งหลอดภายใต้ความหนาแน่นเดียวกับรอบการผลิตที่ 1 เป็นแนวทางที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็งหลอดได้ เพื่อลดต้นทุนจากค่าพลังงานไฟฟ้า ลดระยะเวลาการผลิตและลดระยะเวลาการทำงานลงได้

6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคต

6.3.1 การออกแบบหามิติขนาดของท่อทำน้ำแข็งหลอดที่เหมาะสมเพื่อการประหยัดพลังงานสำหรับเครื่องทำน้ำแข็งหลอด 50 80 และ 100 ตันต่อวัน ซึ่งมีปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาได้แก่ จำนวนท่อทำน้ำแข็งหลอด ความยาวของท่อทำน้ำแข็งหลอด เป็นต้น

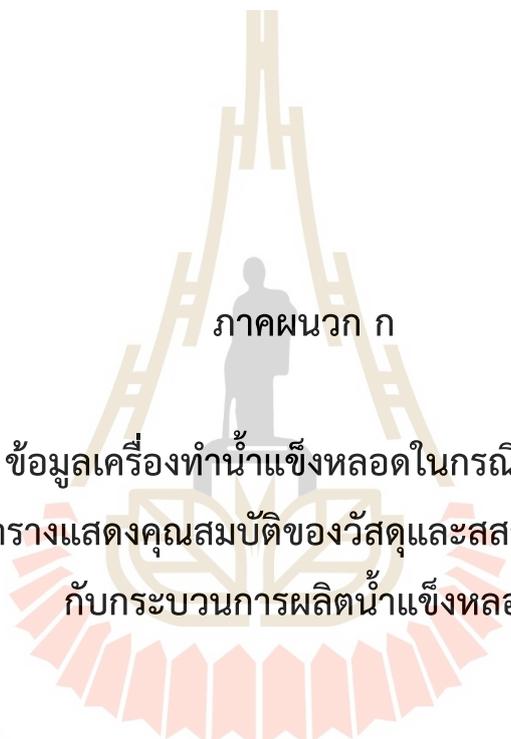
6.3.2 การศึกษาการใช้เครื่องอัดไอแบบปรับอัตราการไหลสารทำความเย็นอัตโนมัติ (Variable Refrigerant Flow) สำหรับการผลิตน้ำแข็งหลอดเพื่อการประหยัดพลังงาน

6.3.3 อิทธิพลของรูปร่างน้ำแข็งหลอดต่อระยะเวลาและภาระการทำความเย็นของกระบวนการทำความเย็น โดยมีน้ำแข็งหลอด 2 รูปร่างที่จำหน่ายแพร่หลายในปัจจุบันได้แก่ รูปร่างสี่เหลี่ยมและทรงกระบอก

รายการอ้างอิง

- ณัฐดนัย พรรณเจริณวงษ์, ฉัตรชัย เบญจปิยะพร, รพีพัฒน์ ลาตศรีทา และสุกัญญา ทองโยธี. (2556). การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการแข็งตัวของน้ำแข็งหลอด. *วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 9(3), 63-80.
- ธีรวัฒน์ คลับคล้าย และธีระชาติ พรพิบูลย์. (2556). แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาล. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 32(5), 606-616.
- ธีระชาติ พรพิบูลย์. (2558). *เทอร์โมไดนามิกส์*.
- ธีระชาติ พรพิบูลย์. (2560). การศึกษาวิจัยภาระการทำควมเย็นในการผลิตน้ำแข็งซองและการปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองเพื่อการประหยัดพลังงาน.
- นันทวัฒน์ ไพรัชเวทย์. (2548). การศึกษาเชิงเลขของผลกระทบของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ออัตราการผลิตน้ำแข็งหลอด วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภูวนาท กาบคำ. (2547). การศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งหลอด วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศศิธร พยัคฆ์ทอง และธีระชาติ พรพิบูลย์. (2560). การวิเคราะห์หาปริมาณไอน้ำที่เหมาะสมสำหรับหม้อฆ่าเชื้อแรงดันสูงในกระบวนการสเตอริไลเซชันเพื่อการประหยัดพลังงาน. *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13* (หน้า 1283-1289), โรงแรม ดิเอ็มเพลส เชียงใหม่.
- Arora, C. P. (2009). *Refrigeration and Air Conditioning*. McGraw Hill Education (India) Private Limited.
- Dossat, R. J. (1984). *Principles of Refrigeration 2ND Edition Si Version Sea*. John Wiley & Sons Canada, Limited.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
- Özışık, 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.
- Sonntag, R. E., Borgnakke, C., & Van Wylen, G. J. (2003). *Fundamentals of Thermodynamics*. Wiley.
- 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* (3 ed.). McGraw-Hill.
- Stoecker, W. F. (1998). *Industrial Refrigeration Handbook*. McGraw-Hill Education.
- Stoecker, W. F., & Jones, J. W. (1982). *Refrigeration and Air Conditioning*. McGraw-Hill.
- Tangthieng, C. (2010). Effect of Production Time on Energy Use of a Tube-Ice Making Tower. *Science & Technology Asia*, 1-9.
- Wu, H., Jouhara, H., Tassou, S., & Karayiannis, T. (2012). Modelling of energy flows in potato crisp frying processes. *Applied Energy*, 89(1), 81-88.



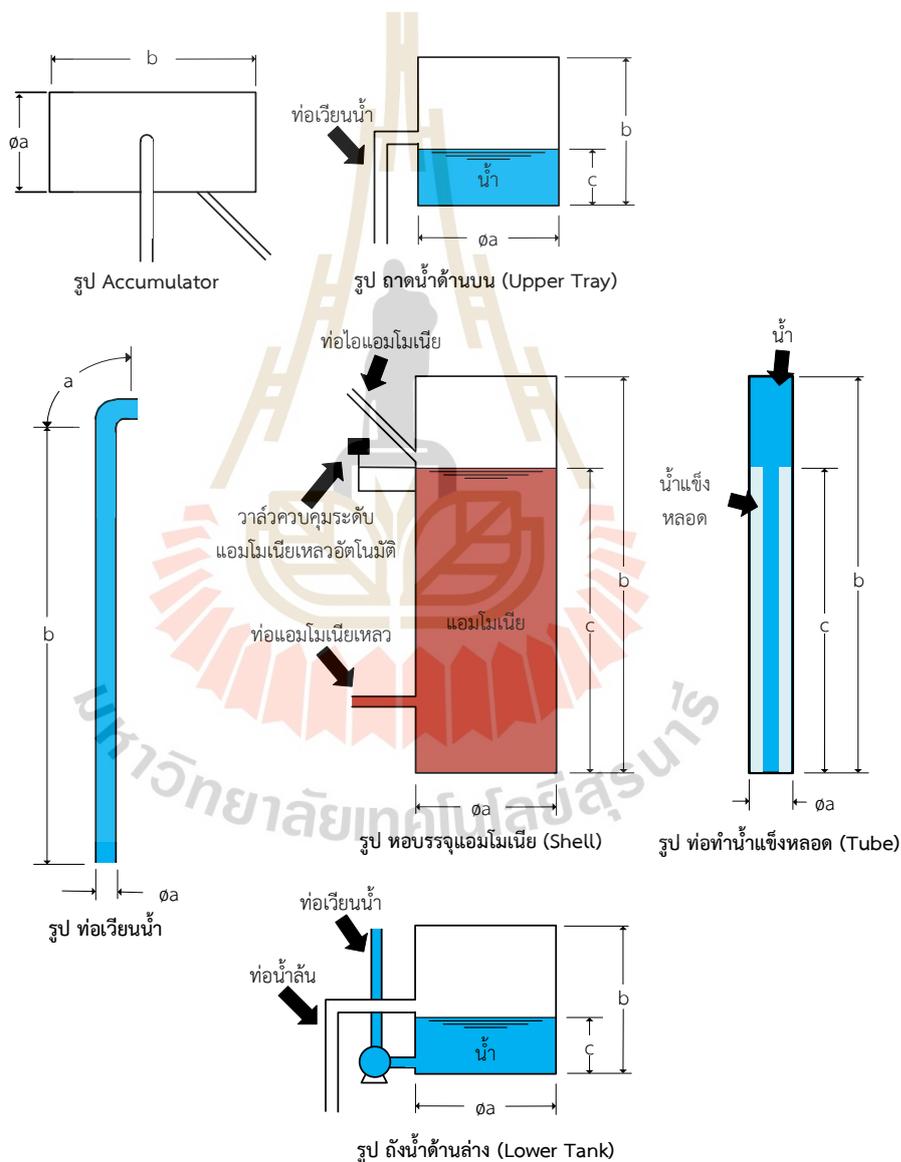
ภาคผนวก ก

ข้อมูลเครื่องทำน้ำแข็งหลอดในกรณีศึกษา
และตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุและสสารที่เกี่ยวข้อง
กับกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 ข้อมูลเครื่องทำน้ำแข็งหลอดในกรณีศึกษาวิจัย

การจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด จำเป็นต้องใช้ข้อมูลอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด ได้แก่ หอทำน้ำแข็งหลอด แอคคิวมูเลเตอร์ และเครื่องอัดไอ โดยเครื่องทำน้ำแข็งหลอดในกรณีศึกษา ประกอบไปด้วย เครื่องทำน้ำแข็งหลอด กำลังการผลิต 50 80 และ 100 ตันต่อวัน ซึ่งอุปกรณ์ในเครื่องทำน้ำแข็งหลอด ดังรูปที่ ก.1.1 และ ข้อมูลเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 80 และ 100 ตันต่อวัน ดังตารางที่ ก.1.1 ก.1.2 และ ก.1.3 ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ ก.1.1 ขนาดพิกัดเครื่องทำน้ำแข็งหลอดในกรณีศึกษา

ตารางที่ ก.1.1 ข้อมูลเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 ตันต่อวัน

อุปกรณ์	รายการ	หน่วย	รายละเอียด
ท่อทำน้ำแข็ง หลอด (Tube)	วัสดุท่อ	-	สแตนเลส AISI 304
	พื้นผิวภายนอก	-	เรียบ
	พื้นผิวภายใน	-	เรียบ
	จำนวนท่อ	-	540
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	mm	41
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	mm	38
	ความยาวท่อ (b)	m	4
	ความยาวช่วงเกิดน้ำแข็ง (c)	m	3.2
หอบรรจุสารทำ ความเย็น (Shell)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	1.25
	ความสูงของหอบรรจุ (b)	m	4
	ระดับความสูงสารทำความเย็น (c)	m	3.2
Accumulator	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	1.1
	ความยาว (b)	m	2.3
ถาดน้ำด้านบน	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	1.3
	ความสูงของถาดน้ำ (b)	m	0.4
	ความสูงของระดับน้ำที่ถาดน้ำ (c)	m	0.127
ถังน้ำเย็นด้านล่าง	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	1.6
	ความสูงของถังน้ำด้านล่าง (b)	m	1.7
	ความสูงของระดับน้ำในถังน้ำ (c)	m	0.55
ท่อเวียนน้ำ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	mm	103.6 (4" Class 8.5)
	ความยาวท่อตรง (b)	m	6.9
เครื่องอัดไอ	รุ่น	-	GEA GRASSO 612
	อัตราการดูดสารทำความเย็น	m ³ /h	796
	อัตราการทำความเย็น	kW	363
	อุณหภูมิด้านดูด	°C	-10
	อุณหภูมิด้านจ่าย	°C	40
	ลูกสูบ	-	6

ตารางที่ ก.1.2 ข้อมูลเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 80 ตันต่อวัน

อุปกรณ์	รายการ	หน่วย	รายละเอียด
ท่อทำน้ำแข็ง หลอด (Tube)	วัสดุท่อ	-	สแตนเลส AISI 304
	พื้นผิวภายนอก	-	เรียบ
	พื้นผิวภายใน	-	เรียบ
	จำนวนท่อ	-	821
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	mm	41
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	mm	38
	ความยาวท่อ (b)	m	4
	ความยาวช่วงเกิดน้ำแข็ง (c)	m	3.3
หอบรรจุสารทำ ความเย็น (Shell)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	1.57
	ความสูงของหอบรรจุ (b)	m	4
	ระดับความสูงสารทำความเย็น (c)	m	3.3
Accumulator	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	1.45
	ความยาว (b)	m	2.7
ถาดน้ำด้านบน	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	1.54
	ความสูงของถาดน้ำ (b)	m	0.508
	ความสูงของระดับน้ำที่ถาดน้ำ (c)	m	0.127
ถังน้ำเย็นด้านล่าง	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	1.85
	ความสูงของถังน้ำด้านล่าง (b)	m	2.1
	ความสูงของระดับน้ำในถังน้ำ (c)	m	0.75
ท่อเวียนน้ำ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	mm	127.02 (5" Class 8.5)
	ความยาวท่อตรง (b)	m	7.377
เครื่องอัดไอ	รุ่น	-	KIRLOSKAR KCX-9, 340.400
	อัตราการดูดสารทำความเย็น	m ³ /h	1194.3
	อัตราการทำความเย็น	kW	627.56
	อุณหภูมิด้านดูด	°C	-10
	อุณหภูมิด้านจ่าย	°C	40
	ลูกสูบ	-	9

ตารางที่ ก.1.3 ข้อมูลเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตันต่อวัน

อุปกรณ์	รายการ	หน่วย	รายละเอียด
ท่อทำน้ำแข็ง หลอด (Tube)	วัสดุท่อ	-	สแตนเลส AISI 304
	พื้นผิวภายนอก	-	เรียบ
	พื้นผิวภายใน	-	เรียบ
	จำนวนท่อ	-	1013
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	mm	41
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	mm	38
	ความยาวท่อ (b)	m	4
	ความยาวช่วงเกิดน้ำแข็ง (c)	m	3.2
หอบรรจุสารทำ ความเย็น (Shell)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	1.71
	ความสูงของหอบรรจุ (b)	m	4
	ระดับความสูงสารทำความเย็น (c)	m	3.2
Accumulator	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	1.25
	ความยาว (b)	m	3.35
ถาดน้ำด้านบน	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	1.8
	ความสูงของถาดน้ำ (b)	m	0.38
	ความสูงของระดับน้ำที่ถาดน้ำ (c)	m	0.127
ถังน้ำเย็นด้านล่าง	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	m	2
	ความสูงของถังน้ำด้านล่าง (b)	m	1.95
	ความสูงของระดับน้ำในถังน้ำ (c)	m	0.85
ท่อเวียนน้ำ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (a)	mm	127.02 (5" Class 8.5)
	ความยาวท่อตรง (b)	m	7.377
เครื่องอัดไอ	รุ่น	-	GEA GRASSO V1800
	อัตราการดูดสารทำความเย็น	m ³ /h	1592
	อัตราการทำความเย็น	kW	917
	อุณหภูมิด้านดูด	°C	-10
	อุณหภูมิด้านจ่าย	°C	35
	ลูกสูบ	-	10

ก.2 ตารางคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ ก.2.1 คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำบริสุทธิ์ (R-718) สำหรับค่าปริมาตรจำเพาะ

Temperature (°C)	Saturated Pressure (kPa)	Specific Volume (m ³ /kg)		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g
0.01	0.6113	0.001000	206.131	206.132
5	0.8721	0.001000	147.117	147.118
10	1.2276	0.001000	106.376	106.377
15	1.7050	0.001001	77.924	77.925
20	2.3390	0.001002	57.7887	57.7897
25	3.1690	0.001003	43.3583	43.3593
30	4.2460	0.001004	32.8922	32.8932
35	5.6280	0.001006	25.2148	25.2158
40	7.3840	0.001008	19.5219	19.5229
45	9.5930	0.001010	15.2571	15.2581
50	12.3500	0.001012	12.0308	12.0318

ตารางที่ ก.2.2 คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำบริสุทธิ์ (R-718) สำหรับค่าพลังงานภายใน
จำเพาะ

Temperature (°C)	Saturated Pressure (kPa)	Specific Internal Energy (kJ/kg)		
		Sat. Liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. Vapor u_g
0.01	0.6113	0	2375.33	2375.33
5	0.8721	20.97	2361.27	2382.24
10	1.2276	41.99	2347.16	2389.15
15	1.7050	62.98	2333.06	2396.04
20	2.3390	83.94	2318.98	2402.91
25	3.1690	104.86	2304.90	2409.76
30	4.2460	125.77	2290.81	2416.58
35	5.6280	146.65	2276.71	2423.36
40	7.3840	167.53	2262.57	2430.11
45	9.5930	188.41	2248.40	2436.81
50	12.3500	209.30	2234.17	2443.47

ตารางที่ ก.2.3 คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำบริสุทธิ์ (R-718) สำหรับค่าเอนทาลปีจำเพาะ

Temperature (°C)	Saturated Pressure (kPa)	Specific Enthalpy (kJ/kg)		
		Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g
0.01	0.6113	0	2501.35	2501.35
5	0.8721	20.98	2489.57	2510.54
10	1.2276	41.99	2477.75	2519.74
15	1.7050	62.98	2465.93	2528.91
20	2.3390	83.94	2454.12	2538.06
25	3.1690	104.87	2442.30	2547.17
30	4.2460	125.77	2430.48	2556.25
35	5.6280	146.66	2418.62	2565.28
40	7.3840	167.54	2406.72	2574.26
45	9.5930	188.42	2394.77	2583.19
50	12.3500	209.31	2382.75	2592.06



ตารางที่ ก.2.4 คุณสมบัติทางความร้อนและพลศาสตร์ของไหลของน้ำบริสุทธิ์ (R-718)

Temperature (°C)	Saturated Pressure (kPa)	Dynamic Viscosity (Pa·s)	Kinematic Viscosity (m ² /s)	Specific Heat (kJ/kg·K)	Thermal Conductivity (W/m·K)	Prandtl Number (-)
0.01	0.6113	0.001792	1.79×10 ⁻⁶	4.220	0.5610	13.47
5	0.8721	0.001518	1.52×10 ⁻⁶	4.205	0.5705	11.19
10	1.2276	0.001306	1.31×10 ⁻⁶	4.196	0.5800	9.45
15	1.7050	0.001138	1.14×10 ⁻⁶	4.189	0.5893	8.09
20	2.3390	0.001002	1.00×10 ⁻⁶	4.184	0.5984	7.00
25	3.1690	0.000890	8.93×10 ⁻⁷	4.182	0.6072	6.13
30	4.2460	0.000797	8.01×10 ⁻⁷	4.180	0.6155	5.41
35	5.6280	0.000719	7.24×10 ⁻⁷	4.180	0.6233	4.82
40	7.3840	0.000653	6.58×10 ⁻⁷	4.180	0.6306	4.33
45	9.5930	0.000596	6.02×10 ⁻⁷	4.180	0.6373	3.91
50	12.3500	0.000547	5.53×10 ⁻⁷	4.182	0.6436	3.55



ก.3 ตารางคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำแข็งที่ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ ก.3.1 คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำแข็งที่ความดันบรรยากาศ สำหรับค่าปริมาตรจำเพาะ

Temperature (°C)	Saturated Pressure (kPa)	Specific Volume (m ³ /kg)		
		Sat. Solid v_i	Evap. v_{ig}	Sat. Vapor v_g
-16	0.1510	0.0010881	206.152	785.907
-14	0.1815	0.0010884	206.314	658.824
-12	0.2176	0.0010888	241.662	553.803
-10	0.2601	0.0010891	283.798	466.757
-8	0.3102	0.0010894	334.138	394.414
-6	0.3689	0.0010898	394.413	334.139
-4	0.4376	0.0010901	466.756	283.799
-2	0.5177	0.0010905	553.802	241.663
0	0.6108	0.0010908	658.824	206.315
0.01	0.6113	0.0010908	785.906	206.153

ตารางที่ ก.3.2 คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำแข็งที่ความดันบรรยากาศ สำหรับค่าพลังงานภายในจำเพาะ

Temperature (°C)	Saturated Pressure (kPa)	Specific Internal Energy (kJ/kg)		
		Sat. Solid u_i	Evap. u_{ig}	Sat. Vapor u_g
-16	0.1510	-336.14	2719.2	2353.1
-14	0.1815	-362.16	2718.0	2355.9
-12	0.2176	-358.14	2716.8	2358.7
-10	0.2601	-354.09	2715.5	2361.4
-8	0.3102	-350.02	2714.2	2364.2
-6	0.3689	-345.91	2712.9	2367.0
-4	0.4376	-341.78	2711.5	2369.8
-2	0.5177	-337.61	2710.2	2372.5
0	0.6108	-333.42	2708.7	2375.3
0.01	0.6113	-333.40	2708.7	2375.3



ก.4 ตารางคุณสมบัติของแอมโมเนีย (R-717)

ตารางที่ ก.4.1 คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของแอมโมเนีย (R-717) สำหรับค่าปริมาตรจำเพาะ

Temperature (°C)	Saturated Pressure (kPa)	Specific Volume (m ³ /kg)		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g
-30	119.5	0.001476	0.961914	0.96339
-25	151.6	0.001490	0.769700	0.77119
-20	190.2	0.001504	0.621836	0.62334
-15	236.3	0.001519	0.506861	0.50838
-10	290.9	0.001534	0.416546	0.41808
-5	354.9	0.001550	0.344930	0.34648
0	429.6	0.001566	0.287634	0.28920
5	515.9	0.001583	0.241407	0.24299
10	615.2	0.001600	0.203810	0.20541
15	728.6	0.001619	0.173001	0.17462
20	857.5	0.001638	0.147582	0.14922
25	1003.2	0.001658	0.126472	0.12813
30	1167.0	0.001680	0.108810	0.11049
35	1350.4	0.001702	0.093968	0.09567
40	1554.9	0.001725	0.081405	0.08313
45	1782.0	0.001750	0.070730	0.07248
50	2033.1	0.001777	0.061593	0.06337
55	2310.1	0.001804	0.053746	0.05555
60	2614.4	0.001834	0.046966	0.04880
65	2947.8	0.001866	0.041094	0.04296
70	3312.0	0.001900	0.035970	0.03787
75	3709.0	0.001937	0.031473	0.03341
80	4140.5	0.001978	0.027532	0.02951

ตารางที่ ก.4.2 คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของแอมโมเนีย (R-717) สำหรับค่าพลังงานภายใน
จำเพาะ

Temperature (°C)	Saturated Pressure (kPa)	Specific Internal Energy (kJ/kg)		
		Sat. Liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. Vapor u_g
-30	119.5	44.08	1244.82	1288.90
-25	151.6	66.36	1227.94	1294.30
-20	190.2	88.76	1210.74	1299.50
-15	236.3	111.30	1193.20	1304.50
-10	290.9	133.96	1175.24	1309.20
-5	354.9	156.76	1156.94	1313.70
0	429.6	179.69	1138.31	1318.00
5	515.9	202.77	1119.23	1322.00
10	615.2	225.99	1099.71	1325.70
15	728.6	249.36	1079.74	1329.10
20	857.5	272.89	1059.31	1332.20
25	1003.2	296.59	1038.41	1335.00
30	1167.0	320.46	1016.94	1337.40
35	1350.4	344.50	994.90	1339.40
40	1554.9	368.74	972.26	1341.00
45	1782.0	393.19	948.91	1342.10
50	2033.1	417.87	924.83	1342.70
55	2310.1	442.79	899.91	1342.70
60	2614.4	467.99	874.11	1342.10
65	2947.8	493.51	847.39	1340.90
70	3312.0	519.39	819.51	1338.90
75	3709.0	545.70	790.40	1336.10
80	4140.5	572.50	759.90	1332.40

ตารางที่ ก.4.3 คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของแอมโมเนีย (R-717) สำหรับค่าเอนทาลปีจำเพาะ

Temperature (°C)	Saturated Pressure (kPa)	Specific Enthalpy (kJ/kg)		
		Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g
-30	119.5	44.26	1359.74	1404.00
-25	151.6	66.58	1344.62	1411.20
-20	190.2	89.05	1328.95	1418.00
-15	236.3	111.66	1312.94	1424.60
-10	290.9	134.41	1296.39	1430.80
-5	354.9	157.31	1279.39	1436.70
0	429.6	180.36	1261.84	1442.20
5	515.9	203.58	1243.72	1447.30
10	615.2	226.97	1225.03	1452.00
15	728.6	250.54	1205.76	1456.30
20	857.5	274.30	1185.90	1460.20
25	1003.2	298.25	1165.25	1463.50
30	1167.0	322.42	1143.88	1466.30
35	1350.4	346.80	1121.80	1468.60
40	1554.9	371.43	1098.77	1470.20
45	1782.0	396.31	1074.89	1471.20
50	2033.1	421.48	1050.02	1471.50
55	2310.1	446.96	1024.04	1471.00
60	2614.4	472.79	996.91	1469.70
65	2947.8	499.01	968.49	1467.50
70	3312.0	525.69	938.71	1464.40
75	3709.0	552.88	907.22	1460.10
80	4140.5	580.69	873.91	1454.60

ตารางที่ ก.4.4 คุณสมบัติทางความร้อนและพลศาสตร์ของไหลของแอมโมเนีย (R-717) สำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนขณะเดือด

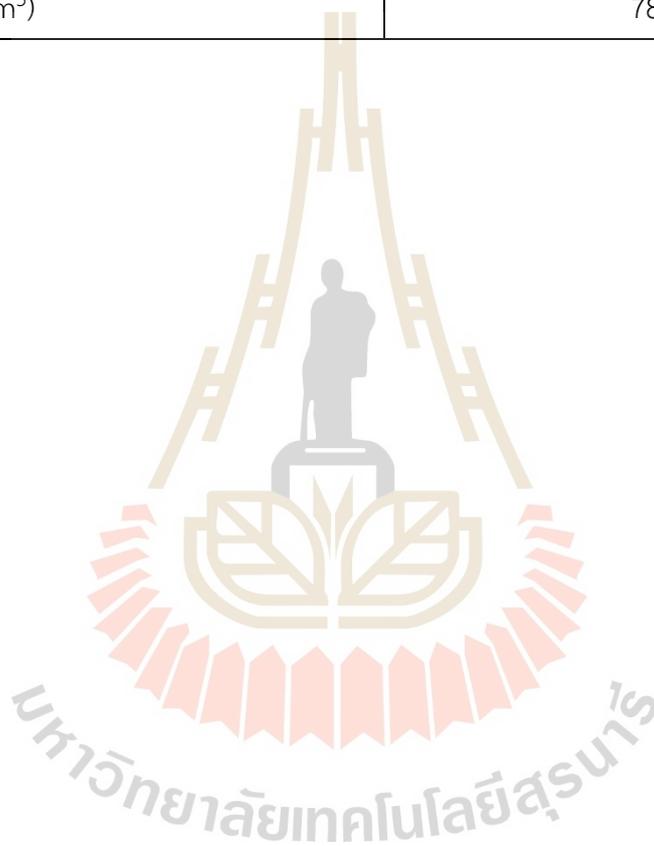
Temperature (°C)	Saturated Pressure (kPa)	Thermal Conductivity (W/m·K)	Dynamic Viscosity (Pa·s)	Kinematic Viscosity (m ² /s)	Surface Tension (N/m)
		k_f	μ_f	ν_f	σ
-16	0.22630	0.609	0.000204	3.09×10^{-7}	0.0385
-14	0.24637	0.603	0.000199	3.03×10^{-7}	0.0377
-12	0.26782	0.596	0.000195	2.97×10^{-7}	0.0370
-10	0.29071	0.590	0.000190	2.92×10^{-7}	0.0363
-8	0.31513	0.584	0.000186	2.86×10^{-7}	0.0357
-6	0.34114	0.578	0.000182	2.81×10^{-7}	0.0350
-4	0.36880	0.572	0.000178	2.76×10^{-7}	0.0343
-2	0.39819	0.565	0.000174	2.71×10^{-7}	0.0336
0	0.42938	0.559	0.000170	2.66×10^{-7}	0.0329



ก.5 ตารางคุณสมบัติของวัสดุท่อทำน้ำแข็งหลอด

ตารางที่ ก.5.1 คุณสมบัติของวัสดุท่อทำน้ำแข็งหลอด

Material	AISI 304 STAINLESS STEEL
Thermal Conductivity (W/m·K)	15.09
Specific Heat (kJ/kg·K)	0.48
Density (kg/m ³)	7800





ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขณะเดือด
ช่วงการเกิดฟองของแอมโมเนีย

ข.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนขณะเดือดช่วงการเกิดฟองของแอมโมเนีย

กระบวนการทำความเย็นในการผลิตน้ำแข็งหลอด เกิดการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำผ่านท่อไปสู่สารทำความเย็น ส่งผลให้สารทำความเย็นที่รับความร้อนนั้นเดือดและเกิดการระเหย ซึ่งเป็นการเดือดในช่วงเกิดฟอง (Nucleate Boiling) จึงจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนขณะเดือดช่วงการเกิดฟอง

ในหัวข้อจึงแสดงตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนขณะเดือดช่วงการเกิดฟอง เมื่อสารทำความเย็นเป็นแอมโมเนีย อุณหภูมิอิ่มตัว -6 องศาเซลเซียส โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (2-13) และ (2-14) มาช่วยในการแก้ปัญหา ดังนี้

พิจารณาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขณะเดือดช่วงการเกิดฟองของแอมโมเนีย จากความสัมพันธ์ในสมการ (2-13) ดังนี้

$$\frac{\alpha_{nb}d}{k_f} = 0.0546 \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\dot{q}_{load}d}{k_f T_{sat}} \right) \right]^{-0.67} \left(\frac{h_{fg}d^2}{v_f^2} \right)^{0.248} \left(\frac{\rho_f - \rho_g}{\rho_f} \right)^{-4.33} \quad (2-23)$$

เมื่อ d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองที่แยกตัวออกจากผิวด้านนอกของท่อ หาได้จากสมการที่ (2-14)

$$d = 0.0146\beta \left[\frac{2\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (2-24)$$

ทำการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงไปในสมการที่ (2-14) โดยใช้ค่ามุมสัมผัส (β) คงที่ อยู่ที่ 35° ซึ่งวิธีใช้ได้ทั้งสารจำพวกไฮโดรคาร์บอน สารพวกแอลกอฮอล์และสารทำละลายต่าง ๆ สำหรับการเดือดที่ผิวด้านนอกของท่อ

$$d = 0.0146(35) \left[\frac{2(34.96 \times 10^{-3})}{9.81(646.7 - 2.78)} \right]^{1/2}$$

จะได้

$$d = 1.7 \times 10^{-3} \text{ m}$$

จากนั้นพิจารณาเทอมด้านขวาของสมการ (2-13) และแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{1/2} \right]^{0.67} = \left[\left(\frac{2.78}{646.7} \right)^{1/2} \right]^{0.67} = 0.1611$$

$$\left(\frac{h_{fg} d^2}{v_f^2} \right)^{0.248} = \left(\frac{(1283.17 \times 10^3)(1.7 \times 10^{-3})^2}{(2.8096 \times 10^{-7})^2} \right)^{0.248} = 2458.27$$

$$\left(\frac{\rho_f - \rho_g}{\rho_f} \right)^{-4.33} = \left(\frac{646.7 - 2.78}{646.7} \right)^{-4.33} = 1.0188$$

นำค่าที่คำนวณได้กลับไปแทนลงในสมการที่ (2-13) ได้ตั้งสมการ (ข-1) ดังนี้

$$\frac{\alpha_{nb} d}{k_f} = (0.0546)(0.1611)(2458.27)(1.0188) \left(\frac{\dot{q}_{load} d}{k_f T_{sat}} \right)^{0.67}$$

$$\frac{\alpha_{nb} d}{k_f} = 22.03 \left(\frac{\dot{q}_{load} d}{k_f T_{sat}} \right)^{0.67} \quad (\text{ข-1})$$

พิจารณาร้อยการถ่ายโอนความร้อนต่อพื้นที่ที่ตั้งสมการที่ (ข-2) ดังนี้

$$\dot{q}_{\text{load}} = \alpha_{\text{nb}} \Delta T \quad (\text{ข-2})$$

โดยที่ ความแตกต่างของอุณหภูมิคือ ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวภายนอกของท่อ และสารทำความเย็น ดังสมการที่ (ข-3) ดังนี้

$$\Delta T = T_{\text{OT}} - T_{\text{sat}} \quad (\text{ข-3})$$

แทนสมการ (ข-2) และ (ข-3) ลงไปในสมการ (ข-1) ได้ดังนี้

$$\frac{\alpha_{\text{nb}} d}{k_f} = 22.03 \left(\frac{\alpha_{\text{nb}} \Delta T \cdot d}{k_f T_{\text{sat}}} \right)^{0.67}$$

จัดรูปสมการได้ดังสมการ (ข-4) ดังนี้

$$\alpha_{\text{nb}} = 3.9902 \times 10^6 \left(\frac{\Delta T}{T_{\text{sat}}} \right)^{2.0303} \quad (\text{ข-4})$$

ดังนั้น จึงได้ $C = 3.9902 \times 10^6$ เป็นตัวแปรที่รวมค่าคุณสมบัติของสารทำความเย็นที่ อุณหภูมิอิ่มตัว ที่ -6 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาพื้นผิวท่อที่ถ่ายโอนความร้อนไปยังสารทำความ เย็น เป็นท่อพื้นผิวเรียบ (Smooth Pipe) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (ข-5) ดังนี้

$$C_s = \frac{C}{T_{\text{sat}}^{2.0303}} \quad (\text{ข-5})$$

แทนสมการ (ข-5) ลงในสมการ (ข-4) และจัดรูปสมการได้ดังสมการ (ข-6) ดังนี้

$$\alpha_{\text{nb}} = \frac{C}{T_{\text{sat}}^{2.0303}} (\Delta T)^{2.0303} \quad (\text{ข-6})$$

แทนค่า $C = 3.9902 \times 10^6$ และ $T_{\text{sat}} = 267\text{K}$ ลงในสมการ (ข-6) และจัดรูปสมการ ได้ดังสมการ (ข-7) ดังนี้

$$\alpha_{\text{nb}} = 47.2551(\Delta T)^{2.0303} \quad (\text{ข-7})$$

พิจารณาการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำผ่านท่อทำน้ำแข็งหลอดไปยังสารทำความเย็น ได้ดังสมการที่ (ข-8) ดังนี้

$$\dot{Q} = \frac{2\pi(T_w - T_{\text{sat}})}{\left[\left(\frac{1}{\alpha_w r_{\text{IT}}} \right) + \left(\frac{1}{k_{\text{Tube}}} \ln \left(\frac{r_{\text{OT}}}{r_{\text{IT}}} \right) \right) + \left(\frac{1}{\alpha_{\text{nb}} r_{\text{OT}}} \right) \right]} \quad (\text{ข-8})$$

พิจารณาสมดุลความร้อนที่พื้นผิวภายนอกของท่อทำน้ำแข็งหลอด ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (ข-9) ดังนี้

$$\frac{T_{\text{OT}} - T_{\text{sat}}}{\left(\frac{1}{\alpha_{\text{nb}} r_{\text{OT}}} \right)} = \frac{T_w - T_{\text{OT}}}{\left[\left(\frac{1}{\alpha_w r_{\text{IT}}} \right) + \left(\frac{1}{k_{\text{Tube}}} \ln \left(\frac{r_{\text{OT}}}{r_{\text{IT}}} \right) \right) \right]} \quad (\text{ข-9})$$

แทนสมการ (ข-7) ลงในสมการ (ข-9) และจัดรูปสมการ ได้ดังสมการที่ (ข-10) ดังนี้

$$\left[\left(\frac{1}{\alpha_w r_{\text{IT}}} \right) + \left(\frac{1}{k_{\text{Tube}}} \ln \left(\frac{r_{\text{OT}}}{r_{\text{IT}}} \right) \right) \right] [T_{\text{OT}} - T_{\text{sat}}] = \frac{1}{r_{\text{OT}} [C_S (T_{\text{OT}} - T_{\text{sat}})^{2.0303}]} [T_w - T_{\text{OT}}] \quad (\text{ข-10})$$

โดยกำหนดให้ $\left[\left(\frac{1}{\alpha_w r_{\text{IT}}} \right) + \left(\frac{1}{k_{\text{Tube}}} \ln \left(\frac{r_{\text{OT}}}{r_{\text{IT}}} \right) \right) \right] = C_1$ จัดรูปสมการ ข-10 ได้ดังสมการที่ (ข-11) ดังนี้

$$(T_{OT} - T_{sat})^{3.0303} + \frac{1}{r_{OT} C_S C_1} (T_{OT} - T_{sat}) - \frac{1}{r_{OT} C_S C_1} (T_W - T_{sat}) = 0 \quad (\text{ข-11})$$

แทนสมการ (ข-3) ลงในสมการ (ข-11) และจัดรูปสมการ ได้ดังสมการที่ (ข-12) ดังนี้

$$\Delta T^{3.0303} + \Delta T \left(\frac{1}{r_{OT} C_S C_1} \right) - (T_W - T_{sat}) \left(\frac{1}{r_{OT} C_S C_1} \right) = 0 \quad (\text{ข-12})$$

โดยที่ r_{OT} แทน รัศมีพื้นผิวภายนอกของท่อทำน้ำแข็งหลอด เท่ากับ 20.5×10^{-3} เมตร
 C_S แทน ค่าตัวแปรของคุณสมบัติทางความร้อน สำหรับท่อพื้นผิวเรียบ เท่ากับ 47.2551
 C_1 แทน ค่าตัวแปรความต้านทานความร้อนของน้ำและท่อทำน้ำแข็ง เท่ากับ 0.05447

แทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการ (ข-12) และจัดรูปสมการ ได้ดังสมการที่ (ข-13) ดังนี้

$$\Delta T^{3.0303} + 18.95 \Delta T - 492.722 = 0 \quad (\text{ข-13})$$

จากนั้นแก้สมการเพื่อหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของท่อทำน้ำแข็งหลอด (T_{OT}) โดยใช้วิธี
 ตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) ดังสมการที่ (ข-14) ดังนี้

$$\Delta T_{n+1} = \Delta T_n - \frac{f(\Delta T_n)}{f'(\Delta T_n)} \quad (\text{ข-14})$$

กำหนดให้สมการที่ (ข-13) เป็นฟังก์ชันและให้ฟังก์ชันเท่ากับ 0 ดังสมการที่ (ข-15) และทำ
 การอนุพันธ์ดังสมการที่ (ข-16) ได้ดังนี้

$$f(\Delta T_n) = \Delta T_n^{3.0303} + 18.95 \Delta T_n - 492.722 = 0 \quad (\text{ข-15})$$

$$f'(\Delta T_n) = 3.0303 \Delta T_n^{2.0303} + 18.95 = 0 \quad (\text{ข-16})$$

นำสมการ (ข-15) และ (ข-16) แทนลงในสมการที่ (ข-14) ได้ตั้งสมการที่ (ข-17) ดังนี้

$$\Delta T_{n+1} = \Delta T_n - \frac{\Delta T_n^{3.0303} + 18.95\Delta T_n - 492.722}{3.0303\Delta T_n^{2.0303} + 18.95} \quad (\text{ข-17})$$

สมมติให้ $\Delta T_n = 5$ และแทนค่าลงในสมการ (ข-17) ได้ดังนี้

$$\Delta T_{n+1} = (5) - \frac{(5)^{3.0303} + 18.95(5) - 492.722}{3.0303(5)^{2.0303} + 18.95}$$

จัดรูปสมการเพื่อหา ΔT_{n+1} ได้ดังนี้

$$\Delta T_{n+1} = 7.708$$

ทำการตรวจสอบความเคลื่อนของคำตอบเทียบกับค่าที่สมมติขึ้น จากสมการที่ (ข-18) ดังนี้

$$\text{Error} = \left| \frac{\Delta T_{n+1} - \Delta T_n}{\Delta T_n} \right| \times 100 \quad (\text{ข-18})$$

แทนค่า $\Delta T_n = 5$ และ $\Delta T_{n+1} = 7.708$ ลงในสมการ (ข-18) ได้ดังนี้

$$\text{Error} = \left| \frac{7.708 - 5}{5} \right| \times 100 = 54.16\%$$

เมื่อกำหนดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เป็น 0.001% จึงจำเป็นจะต้องทำการคำนวณซ้ำรอบถัดไป โดยการกำหนดให้ $\Delta T_n = \Delta T_{n+1} = 7.708$ และแทนค่าลงในสมการ (ข-17) ต่อเนื่องไปจนกระทั่งความคลาดเคลื่อนที่ได้จากสมการ ข-16 จะน้อยกว่าความเคลื่อนที่ยอมรับได้ ซึ่งทำให้ทราบคำตอบที่ต้องการ ได้ผลลัพธ์การคำนวณดังตารางที่ ข.1.1 ดังนี้

ตารางที่ ข.1.1 ผลลัพธ์การคำนวณ ΔT ด้วยวิธีการนิวตัน-ราฟสัน

Iteration (n)	Assume ΔT_n	ΔT_{n+1}	Error (%)
n=1	5	7.70805	54.1609974
n=2	7.70805	7.040325	8.6626935
n=3	7.040325	6.979123	0.8693146
n=4	6.979123	6.978634	0.0070057
n=5	6.978634	6.978634	0.0000004

จากนั้นนำ $\Delta T = 6.978634$ กลับไปแทนลงในสมการ (ข-7) เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขณะเดือดช่วงการเกิดฟองของแอมโมเนีย ได้ดังนี้

$$\alpha_{nb} = 47.2551(6.978634)^{2.0303} = 2440.93 \text{ W/m}^2\text{K}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การพาความร้อนขณะเดือดช่วงการเกิดฟองของแอมโมเนียที่คำนวณได้คือ 2440.93 วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน หรือ 2.4409 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน



ภาคผนวก ค

เงื่อนไขในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด

ข้อมูลการตรวจวัดความดันสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ
และการวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองของเครื่องอัดไอในกรณีศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค.1 เงื่อนไขในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด

ตารางที่ ค.1.1 เงื่อนไขกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด รอบการผลิตที่ 1

อุณหภูมิน้ำป้อน		°C	18.2
อุณหภูมิน้ำเย็นเริ่มต้น		°C	13.8
ความดันอิมตัวของแอมโมเนียด้านระเหย		kPa	342.6
ความดันแอมโมเนียด้านดูดเริ่มต้น		kPa	950
ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต		mm	10.29
ระยะเวลาจาก การตรวจวัดสถานะ จริง	ระยะเวลาลดอุณหภูมิน้ำ	min : sec	5:00
	ระยะเวลาน้ำแข็งก่อตัว	min : sec	31:15:00
	ระยะเวลารวม	min : sec	<u>36:15:00</u>

ตารางที่ ค.1.2 เงื่อนไขกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด รอบการผลิตที่ 2

อุณหภูมิน้ำป้อน		°C	21.8
อุณหภูมิน้ำเย็นเริ่มต้น		°C	1.1
ความดันอิมตัวของแอมโมเนียด้านระเหย		kPa	318.9
ความดันแอมโมเนียด้านดูดเริ่มต้น		kPa	380
ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต		mm	12.88
ระยะเวลาจาก การตรวจวัดสถานะ จริง	ระยะเวลาลดอุณหภูมิน้ำ	min : sec	0:45
	ระยะเวลาน้ำแข็งก่อตัว	min : sec	34:15:00
	ระยะเวลารวม	min : sec	<u>35:00:00</u>

ค.2 ข้อมูลการตรวจวัดความดันสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอในเครื่อง ทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน

ตารางที่ ค.2.1 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่อง
อัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1

Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
00:00	8.50	8.5
00:15	6.50	9.0
00:30	4.50	10.0
00:45	4.40	11.0
01:00	3.50	11.5
01:15	3.00	12.0
01:30	3.00	12.5
01:45	3.25	12.5
02:00	3.20	13.0
02:15	3.50	13.0
02:30	3.40	13.5
02:45	3.50	13.5
03:00	3.50	13.5
03:15	3.50	13.5
03:30	3.40	14.0
03:45	3.25	14.0
04:00	3.20	14.0
04:15	3.00	14.5
04:30	3.00	14.5
04:45	2.90	14.5
05:00	2.80	15.0
05:15	2.75	15.0
05:30	2.70	15.0

ตารางที่ ค.2.1 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
05:45	2.50	14.5
06:00	2.75	14.5
06:15	2.80	14.5
06:30	2.80	14.5
06:45	2.90	14.0
07:00	2.80	14.0
07:15	2.75	14.0
07:30	2.75	14.0
07:45	2.75	14.0
08:00	2.75	14.0
08:15	2.75	14.0
08:30	2.75	14.0
08:45	2.75	14.5
09:00	2.60	14.5
09:15	2.70	14.5
09:30	2.70	15.0
09:45	2.70	15.0
10:00	2.75	15.0
10:15	2.75	15.0
10:30	2.75	14.5
10:45	2.75	14.5
11:00	2.75	14.5
11:15	2.75	14.5
11:30	2.75	14.0
11:45	2.70	14.0

ตารางที่ ค.2.1 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
12:00	2.70	14.0
12:15	2.70	14.0
12:30	2.70	14.0
12:45	2.70	14.0
13:00	2.60	14.0
13:15	2.60	14.5
13:30	2.60	14.5
13:45	2.60	14.5
14:00	2.60	15.0
14:15	2.60	15.0
14:30	2.60	15.0
14:45	2.60	15.0
15:00	2.60	15.0
15:15	2.60	14.5
15:30	2.60	14.5
15:45	2.50	14.5
16:00	2.50	14.5
16:15	2.50	14.0
16:30	2.50	14.0
16:45	2.50	14.0
17:00	2.50	14.0
17:15	2.50	14.0
17:30	2.50	14.0
17:45	2.50	14.0
18:00	2.50	14.5

ตารางที่ ค.2.1 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
18:15	2.50	14.5
18:30	2.50	14.5
18:45	2.50	15.0
19:00	2.50	15.0
19:15	2.50	15.0
19:30	2.50	15.0
19:45	2.50	15.0
20:00	2.50	14.5
20:15	2.50	14.5
20:30	2.50	14.5
20:45	2.50	14.0
21:00	2.50	14.0
21:15	2.40	14.0
21:30	2.40	14.0
21:45	2.40	14.0
22:00	2.40	14.0
22:15	2.40	14.0
22:30	2.40	14.5
22:45	2.30	14.5
23:00	2.30	14.5
23:15	2.30	14.5
23:30	2.25	15.0
23:45	2.25	15.0
24:00	2.20	15.0
24:15	2.20	15.0

ตารางที่ ค.2.1 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
24:30	2.20	14.5
24:45	2.10	14.5
25:00	2.10	14.5
25:15	2.10	14.0
25:30	2.10	14.0
25:45	2.10	14.0
26:00	2.00	14.0
26:15	2.00	14.0
26:30	2.00	14.0
26:45	2.00	14.0
27:00	2.00	14.0
27:15	2.00	14.5
27:30	2.00	14.5
27:45	2.00	14.5
28:00	2.00	14.5
28:15	2.00	15.0
28:30	2.00	15.0
28:45	2.00	15.0
29:00	2.00	14.5
29:15	2.00	14.5
29:30	2.00	14.0
29:45	2.00	14.0
30:00	2.00	14.0
30:15	1.90	14.0
30:30	1.90	14.0

ตารางที่ ค.2.1 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
30:45	1.90	13.5
31:00	1.90	13.5
31:15	1.80	14.0
31:30	1.80	14.0
31:45	1.80	14.0
32:00	1.80	14.5
32:15	1.80	14.5
32:30	1.80	14.5
32:45	1.80	14.5
33:00	1.75	14.5
33:15	1.75	14.5
33:30	1.75	14.5
33:45	1.75	14.5
34:00	1.75	14.0
34:15	1.75	14.0
34:30	1.75	14.0
34:45	1.75	14.0
35:00	1.75	13.5
35:15	1.75	13.5
35:30	1.70	13.5
35:45	1.70	14.0
36:00	1.70	14.0
36:15	1.60	14.0

ตารางที่ ค.2.2 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2

Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
00:00	2.80	12.0
00:15	2.80	12.8
00:30	2.75	13.0
00:45	2.75	13.2
01:00	2.75	13.5
01:15	2.70	13.8
01:30	2.70	14.0
01:45	2.70	14.0
02:00	2.70	14.5
02:15	2.60	15.0
02:30	2.60	15.0
02:45	2.60	15.0
03:00	2.60	15.0
03:15	2.60	14.8
03:30	2.60	14.5
03:45	2.60	14.5
04:00	2.50	14.2
04:15	2.50	14.2
04:30	2.50	14.0
04:45	2.50	14.0
05:00	2.50	14.0
05:15	2.50	14.0
05:30	2.50	14.0
05:45	2.50	14.0
06:00	2.50	14.0

ตารางที่ ค.2.2 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
06:15	2.50	14.2
06:30	2.50	14.5
06:45	2.50	14.5
07:00	2.50	14.5
07:15	2.50	14.8
07:30	2.50	15.0
07:45	2.50	15.0
08:00	2.50	14.8
08:15	2.50	14.8
08:30	2.50	14.5
08:45	2.50	14.2
09:00	2.50	14.2
09:15	2.50	14.0
09:30	2.50	14.0
09:45	2.50	14.0
10:00	2.50	14.0
10:15	2.50	14.0
10:30	2.50	14.0
10:45	2.50	14.2
11:00	2.50	14.2
11:15	2.50	14.5
11:30	2.50	14.8
11:45	2.50	14.8
12:00	2.50	15.0
12:15	2.50	15.0

ตารางที่ ค.2.2 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
12:30	2.50	15.0
12:45	2.50	14.8
13:00	2.50	14.5
13:15	2.50	14.5
13:30	2.50	14.2
13:45	2.50	14.2
14:00	2.50	14.0
14:15	2.50	14.0
14:30	2.40	14.0
14:45	2.40	13.8
15:00	2.40	14.0
15:15	2.40	14.0
15:30	2.40	14.2
15:45	2.40	14.5
16:00	2.40	14.5
16:15	2.40	14.8
16:30	2.40	14.8
16:45	2.40	15.0
17:00	2.30	15.0
17:15	2.30	15.0
17:30	2.30	14.7
17:45	2.30	14.5
18:00	2.25	14.2
18:15	2.25	14.2
18:30	2.25	14.0

ตารางที่ ค.2.2 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
18:45	2.25	14.0
19:00	2.20	14.0
19:15	2.20	13.7
19:30	2.20	13.7
19:45	2.10	13.8
20:00	2.10	14.0
20:15	2.10	14.0
20:30	2.10	14.2
20:45	2.10	14.5
21:00	2.10	14.5
21:15	2.00	14.5
21:30	2.00	14.7
21:45	2.00	14.7
22:00	2.00	14.7
22:15	2.00	14.5
22:30	2.00	14.5
22:45	2.00	14.2
23:00	1.90	14.0
23:15	1.90	14.0
23:30	1.90	13.7
23:45	1.90	13.7
24:00	1.90	13.8
24:15	1.90	13.8
24:30	1.90	14.0
24:45	1.80	14.0

ตารางที่ ค.2.2 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

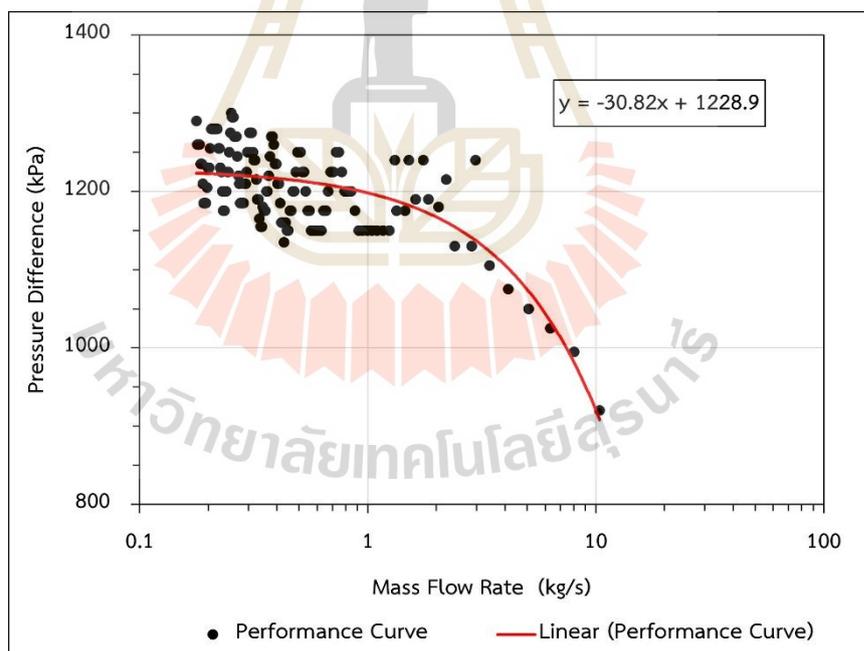
Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
25:00	1.80	14.2
25:15	1.80	14.5
25:30	1.80	14.5
25:45	1.80	14.5
26:00	1.80	14.7
26:15	1.80	14.7
26:30	1.75	14.7
26:45	1.75	14.5
27:00	1.75	14.2
27:15	1.75	14.0
27:30	1.75	14.0
27:45	1.75	13.7
28:00	1.75	13.7
28:15	1.75	13.5
28:30	1.75	13.5
28:45	1.75	13.7
29:00	1.75	14.0
29:15	1.70	14.0
29:30	1.70	14.2
29:45	1.70	14.2
30:00	1.70	14.5
30:15	1.70	14.5
30:30	1.70	14.5
30:45	1.70	14.5
31:00	1.70	14.5

ตารางที่ ค.2.2 ข้อมูลการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องอัดไอในเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

Time (min:sec)	Suction Pressure (Barg)	Discharge Pressure (Barg)
31:15	1.70	14.5
31:30	1.70	14.5
31:45	1.70	14.2
32:00	1.70	14.0
32:15	1.70	14.0
32:30	1.70	13.7
32:45	1.65	13.5
33:00	1.65	13.5
33:15	1.65	13.5
33:30	1.65	13.7
33:45	1.65	14.0
34:00	1.65	14.0
34:15	1.65	14.2
34:30	1.65	14.2
34:45	1.65	14.2
35:00	1.60	14.5

ค.3 การวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองของเครื่องอัดไอในกรณีศึกษา

จากการตรวจวัดความดันด้านดูดและด้านจ่ายของเครื่องอัดไอในกรณีศึกษา เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตันต่อวัน ร่วมกับการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็นที่ทำให้ทราบถึงอัตราการระเหยของสารทำความเย็นในรอบการผลิตที่ 2 โดยมีสมมุติฐานให้อัตราการระเหยของสารทำความเย็นเท่ากับอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอ เนื่องจากช่วงเวลาส่วนใหญ่ของกระบวนการนั้นระบบใกล้เคียงกับการไหลคงตัวและสภาวะคงตัว เห็นได้จากแนวโน้มของภาระการทำความเย็นที่ได้จากการจำลอง นำไปสู่การสร้างแบบจำลองของเครื่องอัดไอโดยใช้ความแตกต่างของความดันระหว่างด้านดูดและด้านจ่ายจากการตรวจวัดร่วมกับอัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวลของเครื่องอัดไอ โดยให้แกน Y เป็นความแตกต่างระหว่างความดันและแกน X เป็นอัตราการดูดสารทำความเย็นโดยมวลของเครื่องอัดไอ จากนั้นพล็อตหาความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของกราฟสมรรถนะ (Performance Curve) ภายใต้ความเร็วรอบของเครื่องอัดไอคงที่ 1200 รอบต่อนาที ตามข้อมูลของเครื่องอัดไอในกรณีศึกษา ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ ค.3.1 ดังนี้



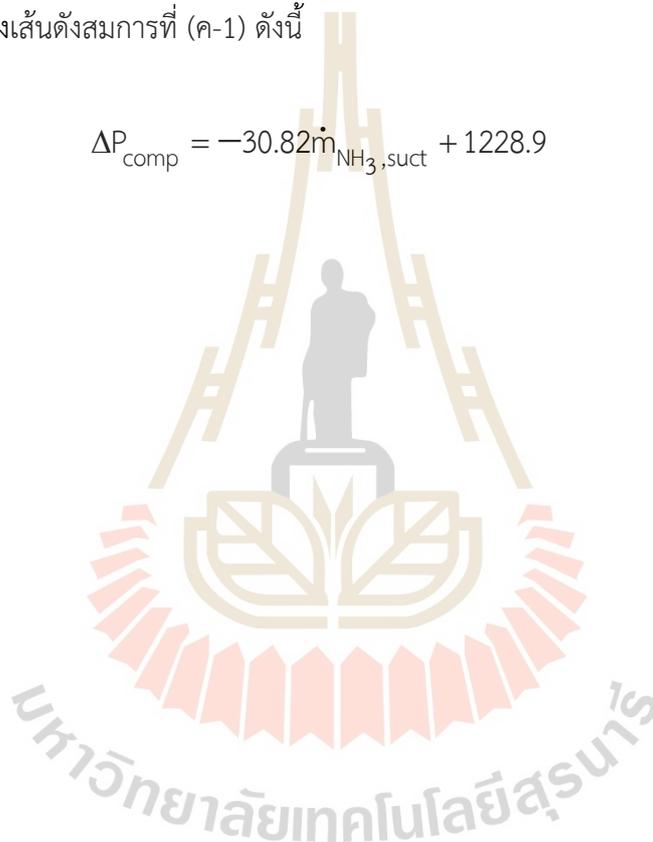
รูปที่ ค.3.1 กราฟสมรรถนะของเครื่องอัดไอในกรณีศึกษา เครื่องทำน้ำแข็งหลอด 100 ตันต่อวัน

จากรูปที่ ค.3.1 ในช่วงอัตราการระเหยของสารทำความเย็นต่ำ (0.1 ถึง 1 kg/s) มีข้อมูลเป็นจำนวนมาก เนื่องจากอยู่ในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอดซึ่งเป็นช่วงที่มีระยะเวลามากที่สุดของ

กระบวนการทำความเย็น ในทางกลับกันช่วงอัตราการระเหยของสารทำความเย็นสูง (1 ถึง 10 kg/s) จำนวนข้อมูลน้อย เนื่องจากอยู่ในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ ซึ่งเป็นช่วงที่มีระยะเวลาสั้นในกระบวนการทำความเย็น ในขณะเดียวกันเมื่ออัตราการระเหยของสารทำความเย็นสูงขึ้น ส่งผลให้ความแตกต่างของความดันภายในเครื่องอัดไอนี้ค่าลดลงและความดันด้านดูดของเครื่องอัดไอนี้ค่าเพิ่มขึ้นภายใต้สมมติฐานให้ความดันด้านจ่ายของเครื่องอัดไอคงที่ตลอดกระบวนการ

จากนั้นสร้างแบบจำลองของเครื่องอัดไอจาก Curve Fitting เส้นกราฟในรูปที่ ค.3.1 เพื่อหาความแตกต่างของความดันภายในเครื่องอัดไอ จากอัตราการดูดสารทำความเย็นของเครื่องอัดไอ ได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ (ค-1) ดังนี้

$$\Delta P_{\text{comp}} = -30.82 \dot{m}_{\text{NH}_3, \text{suct}} + 1228.9 \quad (\text{ค-25})$$





ภาคผนวก ง

ผลลัพธ์จากการจำลองกระบวนการทำความเข้าใจ
ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด สำหรับกรณีศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ง.1 ผลลัพธ์จากการจำลองกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็ง หลอด

ตารางที่ ง.1.1 ผลลัพธ์ความเร็วและผลรวมพลังงานจลน์จำเพาะกับพลังงานศักย์จำเพาะตลอดความยาวของท่อ 3.2 เมตร เมื่อแบ่งท่อเป็นส่วนย่อย 30 ท่อนเรียงจากบนลงล่าง เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน

Tube (j)	Δz^j (m)	$V_{W,in}^j$ (m/s)	$V_{W,out}^j$ (m/s)	KP^j (10^{-3} kJ/kg)
1	0.107	1.4000	2.1474	0.2793
2	0.107	2.1474	2.6347	0.1187
3	0.107	2.6347	3.0319	0.0789
4	0.107	3.0319	3.3770	0.0596
5	0.107	3.3770	3.6869	0.0480
6	0.107	3.6869	3.9707	0.0403
7	0.107	3.9707	4.2342	0.0347
8	0.107	4.2342	4.4813	0.0305
9	0.107	4.4813	4.7148	0.0273
10	0.107	4.7148	4.9368	0.0246
11	0.107	4.9368	5.1487	0.0225
12	0.107	5.1487	5.3520	0.0206
13	0.107	5.3520	5.5475	0.0191
14	0.107	5.5475	5.7361	0.0178
15	0.107	5.7361	5.9185	0.0166
16	0.107	5.9185	6.0953	0.0156
17	0.107	6.0953	6.2670	0.0147
18	0.107	6.2670	6.4340	0.0139
19	0.107	6.4340	6.5966	0.0132
20	0.107	6.5966	6.7552	0.0126

ตารางที่ ง.1.1 ผลลัพธ์ความเร็วและผลรวมพลังงานจลน์จำเพาะกับพลังงานศักย์จำเพาะตลอดความยาวของท่อ 3.2 เมตร เมื่อแบ่งท่อเป็นส่วนย่อย 30 ท่อนเรียงจากบนลงล่าง เครื่องทำน้ำแข็งหลอด กำลังการผลิต 50 ตัน/วัน (ต่อ)

Tube (j)	Δz^j (m)	$V_{W,in}^j$ (m/s)	$V_{W,out}^j$ (m/s)	KP^j (10^{-3} kJ/kg)
21	0.107	6.7552	6.9101	0.0120
22	0.107	6.9101	7.0616	0.0115
23	0.107	7.0616	7.2098	0.0110
24	0.107	7.2098	7.3549	0.0105
25	0.107	7.3549	7.4972	0.0101
26	0.107	7.4972	7.6367	0.0097
27	0.107	7.6367	7.7738	0.0094
28	0.107	7.7738	7.9084	0.0090
29	0.107	7.9084	8.0407	0.0088
30	0.107	8.0407	8.1708	0.0084



ตารางที่ ง.1.2 ผลลัพธ์ความเร็วและผลรวมพลังงานจลน์จำเพาะกับพลังงานศักย์จำเพาะตลอดความยาวของท่อ 3.3 เมตร เมื่อแบ่งท่อเป็นส่วนย่อย 30 ท่อนเรียงจากบนลงล่าง เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน

Tube (j)	Δz^j (m)	$V_{W,in}^j$ (m/s)	$V_{W,out}^j$ (m/s)	KP^j (10^{-3} kJ/kg)
1	0.11	1.3300	2.1414	0.3292
2	0.11	2.1414	2.6453	0.1269
3	0.11	2.6453	3.0532	0.0832
4	0.11	3.0532	3.4067	0.0624
5	0.11	3.4067	3.7234	0.0502
6	0.11	3.7234	4.0132	0.0419
7	0.11	4.0132	4.2821	0.0362
8	0.11	4.2821	4.5341	0.0318
9	0.11	4.5341	4.7721	0.0283
10	0.11	4.7721	4.9982	0.0256
11	0.11	4.9982	5.2141	0.0233
12	0.11	5.2141	5.4211	0.0214
13	0.11	5.4211	5.6201	0.0198
14	0.11	5.6201	5.8122	0.0184
15	0.11	5.8122	5.9978	0.0172
16	0.11	5.9978	6.1777	0.0162
17	0.11	6.1777	6.3524	0.0152
18	0.11	6.3524	6.5223	0.0144
19	0.11	6.5223	6.6877	0.0137
20	0.11	6.6877	6.8491	0.0130

ตารางที่ ง.1.2 ผลลัพธ์ความเร็วและผลรวมพลังงานจลน์จำเพาะกับพลังงานศักย์จำเพาะตลอดความยาวของท่อ 3.3 เมตร เมื่อแบ่งท่อเป็นส่วนย่อย 30 ท่อนเรียงจากบนลงล่าง เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน (ต่อ)

Tube (j)	Δz^j (m)	$V_{W,in}^j$ (m/s)	$V_{W,out}^j$ (m/s)	KP^j (10^{-3} kJ/kg)
21	0.11	6.8491	7.0066	0.0124
22	0.11	7.0066	7.1606	0.0119
23	0.11	7.1606	7.3113	0.0114
24	0.11	7.3113	7.4589	0.0109
25	0.11	7.4589	7.6036	0.0105
26	0.11	7.6036	7.7455	0.0101
27	0.11	7.7455	7.8848	0.0097
28	0.11	7.8848	8.0217	0.0094
29	0.11	8.0217	8.1562	0.0090
30	0.11	8.1562	8.2885	0.0088



ตารางที่ ง.1.3 ผลลัพธ์ความเร็วและผลรวมพลังงานจลน์จำเพาะกับพลังงานศักย์จำเพาะตลอดความยาวของท่อ 3.2 เมตร เมื่อแบ่งท่อเป็นส่วนย่อย 30 ท่อนเรียงจากบนลงล่าง เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน

Tube (j)	Δz^j (m)	$V_{W,in}^j$ (m/s)	$V_{W,out}^j$ (m/s)	KP^j (10^{-3} kJ/kg)
1	0.107	1.4000	2.1474	0.2793
2	0.107	2.1474	2.6347	0.1187
3	0.107	2.6347	3.0319	0.0789
4	0.107	3.0319	3.3770	0.0596
5	0.107	3.3770	3.6869	0.0480
6	0.107	3.6869	3.9707	0.0403
7	0.107	3.9707	4.2342	0.0347
8	0.107	4.2342	4.4813	0.0305
9	0.107	4.4813	4.7148	0.0273
10	0.107	4.7148	4.9368	0.0246
11	0.107	4.9368	5.1487	0.0225
12	0.107	5.1487	5.3520	0.0206
13	0.107	5.3520	5.5475	0.0191
14	0.107	5.5475	5.7361	0.0178
15	0.107	5.7361	5.9185	0.0166
16	0.107	5.9185	6.0953	0.0156
17	0.107	6.0953	6.2670	0.0147
18	0.107	6.2670	6.4340	0.0139
19	0.107	6.4340	6.5966	0.0132
20	0.107	6.5966	6.7552	0.0126

ตารางที่ ง.1.3 ผลลัพธ์ความเร็วและผลรวมพลังงานจลน์จำเพาะกับพลังงานศักย์จำเพาะตลอดความยาวของท่อ 3.2 เมตร เมื่อแบ่งท่อเป็นส่วนย่อย 30 ท่อนเรียงจากบนลงล่าง เครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน (ต่อ)

Tube (j)	Δz^j (m)	$V_{W,in}^j$ (m/s)	$V_{W,out}^j$ (m/s)	KP^j (10^{-3} kJ/kg)
21	0.107	6.7552	6.9101	0.0120
22	0.107	6.9101	7.0616	0.0115
23	0.107	7.0616	7.2098	0.0110
24	0.107	7.2098	7.3549	0.0105
25	0.107	7.3549	7.4972	0.0101
26	0.107	7.4972	7.6367	0.0097
27	0.107	7.6367	7.7738	0.0094
28	0.107	7.7738	7.9084	0.0090
29	0.107	7.9084	8.0407	0.0088
30	0.107	8.0407	8.1708	0.0084



ตารางที่ ง.1.4 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
00:00	13.80	0.00	3012.13	2.8290	2.0448	950.00	23.26
00:15	11.14	0.00	2418.96	2.2719	0.9985	358.95	-4.70
00:30	9.00	0.00	1972.20	1.8523	0.8518	353.62	-5.08
00:45	7.30	0.00	1638.06	1.5384	0.7421	349.85	-5.36
01:00	5.80	0.00	1358.39	1.2758	0.6503	346.72	-5.58
01:15	4.62	0.00	1150.08	1.0802	0.5820	344.41	-5.75
01:30	3.56	0.00	972.20	0.9131	0.5236	342.44	-5.90
01:45	2.72	0.00	836.40	0.7856	0.4790	340.95	-6.01
02:00	1.95	0.00	717.36	0.6738	0.4400	339.65	-6.11
02:15	1.32	0.00	625.30	0.5873	0.4098	338.64	-6.18
02:30	0.75	0.00	543.58	0.5106	0.3829	337.75	-6.25
02:45	0.18	0.00	478.49	0.4494	0.3616	336.92	-6.31
02:48	0.00	0.00	465.77	0.4375	0.3574	336.65	-6.33
03:00	0.00	0.25	1162.22	1.0916	0.5372	342.20	-5.92
03:15	0.00	0.50	934.16	0.8774	0.5104	341.36	-5.98
03:30	0.00	0.71	814.35	0.7648	0.4964	340.93	-6.01
03:45	0.00	0.90	727.46	0.6832	0.4862	340.62	-6.03
04:00	0.00	1.08	664.09	0.6237	0.4788	340.39	-6.05
04:15	0.00	1.25	615.05	0.5777	0.4731	340.21	-6.06
04:30	0.00	1.39	578.12	0.5430	0.4688	340.08	-6.08
04:45	0.00	1.54	544.92	0.5118	0.4648	339.96	-6.08
05:00	0.00	1.68	516.77	0.4854	0.4615	339.86	-6.09
05:15	0.00	1.81	494.12	0.4641	0.4589	339.78	-6.10
05:30	0.00	1.94	472.69	0.4440	0.4564	339.70	-6.10
05:45	0.00	2.06	453.74	0.4262	0.4542	339.63	-6.11

ตารางที่ ง.1.4 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
06:00	0.00	2.19	436.80	0.4102	0.4522	339.57	-6.11
06:15	0.00	2.29	422.585	0.3969	0.4506	339.52	-6.12
06:30	0.00	2.41	409.64	0.3838	0.4489	339.47	-6.12
06:45	0.00	2.52	395.91	0.3718	0.4474	339.42	-6.12
07:00	0.00	2.63	385.02	0.3616	0.4461	339.38	-6.13
07:15	0.00	2.73	374.17	0.3514	0.4449	339.34	-6.13
07:30	0.00	2.84	364.12	0.3420	0.4437	339.31	-6.13
07:45	0.00	2.94	354.76	0.3332	0.4426	339.27	-6.14
08:00	0.00	3.03	346.64	0.3256	0.4417	339.24	-6.14
08:15	0.00	3.14	338.42	0.3178	0.4407	339.21	-6.14
08:30	0.00	3.23	330.70	0.3106	0.4398	339.19	-6.14
08:45	0.00	3.33	323.94	0.3042	0.4390	339.16	-6.14
09:00	0.00	3.42	317.04	0.2978	0.4382	339.14	-6.15
09:15	0.00	3.51	310.52	0.2916	0.4374	339.11	-6.15
09:30	0.00	3.61	304.34	0.2858	0.4367	339.09	-6.15
09:45	0.00	3.69	298.87	0.2807	0.4360	339.07	-6.15
10:00	0.00	3.78	293.26	0.2754	0.4354	339.05	-6.15
10:15	0.00	3.87	287.90	0.2704	0.4348	339.03	-6.15
10:30	0.00	3.95	283.15	0.2659	0.4342	339.02	-6.15
10:45	0.00	4.04	278.24	0.2613	0.4336	339.00	-6.16
11:00	0.00	4.12	273.55	0.2569	0.4331	338.98	-6.16
11:15	0.00	4.21	269.04	0.2527	0.4326	338.96	-6.16
11:30	0.00	4.28	265.02	0.2489	0.4321	338.95	-6.16
11:45	0.00	4.37	260.85	0.2450	0.4316	338.93	-6.16
12:00	0.00	4.45	256.84	0.2412	0.4311	338.92	-6.16

ตารางที่ ง.1.4 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
12:15	0.00	4.53	253.24	0.2378	0.4307	338.91	-6.16
12:30	0.00	4.61	249.50	0.2343	0.4303	338.89	-6.16
12:45	0.00	4.69	245.89	0.2309	0.4299	338.88	-6.16
13:00	0.00	4.77	242.41	0.2277	0.4294	338.87	-6.17
13:15	0.00	4.85	239.04	0.2245	0.4290	338.86	-6.17
13:30	0.00	4.92	236.00	0.2217	0.4287	338.84	-6.17
13:45	0.00	5.00	232.84	0.2187	0.4283	338.83	-6.17
14:00	0.00	5.07	229.98	0.2160	0.4280	338.82	-6.17
14:15	0.00	5.15	227.00	0.2132	0.4276	338.81	-6.17
14:30	0.00	5.22	224.10	0.2105	0.4273	338.80	-6.17
14:45	0.00	5.30	221.29	0.2078	0.4270	338.79	-6.17
15:00	0.00	5.37	218.56	0.2053	0.4267	338.78	-6.17
15:15	0.00	5.45	215.90	0.2028	0.4263	338.77	-6.17
15:30	0.00	5.52	213.31	0.2003	0.4260	338.76	-6.17
15:45	0.00	5.58	211.15	0.1983	0.4258	338.76	-6.17
16:00	0.00	5.66	208.69	0.1960	0.4255	338.75	-6.17
16:15	0.00	5.73	206.29	0.1937	0.4252	338.74	-6.18
16:30	0.00	5.80	203.95	0.1915	0.4249	338.73	-6.18
16:45	0.00	5.87	201.67	0.1894	0.4247	338.72	-6.18
17:00	0.00	5.94	199.44	0.1873	0.4244	338.71	-6.18
17:15	0.00	6.01	197.27	0.1853	0.4242	338.71	-6.18
17:30	0.00	6.07	195.44	0.1836	0.4239	338.70	-6.18
17:45	0.00	6.14	193.36	0.1816	0.4237	338.69	-6.18
18:00	0.00	6.21	191.32	0.1797	0.4235	338.68	-6.18
18:15	0.00	6.28	189.33	0.1778	0.4232	338.68	-6.18

ตารางที่ ง.1.4 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
18:30	0.00	6.35	187.38	0.1760	0.4230	338.67	-6.18
18:45	0.00	6.42	185.48	0.1742	0.4228	338.66	-6.18
19:00	0.00	6.49	183.61	0.1724	0.4226	338.66	-6.18
19:15	0.00	6.55	182.04	0.1710	0.4224	338.65	-6.18
19:30	0.00	6.61	180.24	0.1693	0.4222	338.64	-6.18
19:45	0.00	6.68	178.48	0.1676	0.4220	338.64	-6.18
20:00	0.00	6.75	176.75	0.1660	0.4218	338.63	-6.18
20:15	0.00	6.82	175.06	0.1644	0.4216	338.63	-6.18
20:30	0.00	6.88	173.40	0.1629	0.4214	338.62	-6.18
20:45	0.00	6.95	171.77	0.1613	0.4212	338.61	-6.18
21:00	0.00	7.01	170.39	0.1600	0.4210	338.61	-6.19
21:15	0.00	7.07	168.82	0.1586	0.4208	338.60	-6.19
21:30	0.00	7.14	167.27	0.1571	0.4206	338.60	-6.19
21:45	0.00	7.20	165.75	0.1557	0.4205	338.59	-6.19
22:00	0.00	7.27	164.25	0.1543	0.4203	338.59	-6.19
22:15	0.00	7.33	162.78	0.1529	0.4201	338.58	-6.19
22:30	0.00	7.40	161.34	0.1515	0.4200	338.58	-6.19
22:45	0.00	7.45	160.12	0.1504	0.4198	338.57	-6.19
23:00	0.00	7.52	158.72	0.1491	0.4196	338.57	-6.19
23:15	0.00	7.58	157.34	0.1478	0.4195	338.56	-6.19
23:30	0.00	7.64	155.98	0.1465	0.4193	338.56	-6.19
23:45	0.00	7.71	154.65	0.1452	0.4192	338.55	-6.19
24:00	0.00	7.77	153.34	0.1440	0.4190	338.55	-6.19
24:15	0.00	7.84	152.04	0.1428	0.4189	338.54	-6.19
24:30	0.00	7.89	150.95	0.1418	0.4187	338.54	-6.19

ตารางที่ ง.1.4 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
24:45	0.00	7.95	149.69	0.1406	0.4186	338.53	-6.19
25:00	0.00	8.02	148.45	0.1394	0.4184	338.53	-6.19
25:15	0.00	8.08	147.22	0.1383	0.4183	338.53	-6.19
25:30	0.00	8.14	146.02	0.1371	0.4182	338.52	-6.19
25:45	0.00	8.20	144.83	0.1360	0.4180	338.52	-6.19
26:00	0.00	8.27	143.66	0.1349	0.4179	338.51	-6.19
26:15	0.00	8.32	142.67	0.1340	0.4178	338.51	-6.19
26:30	0.00	8.38	141.53	0.1329	0.4176	338.50	-6.19
26:45	0.00	8.44	140.40	0.1319	0.4175	338.50	-6.19
27:00	0.00	8.50	139.29	0.1308	0.4174	338.50	-6.19
27:15	0.00	8.57	138.19	0.1298	0.4172	338.49	-6.19
27:30	0.00	8.63	137.10	0.1288	0.4171	338.49	-6.19
27:45	0.00	8.69	136.03	0.1278	0.4170	338.48	-6.19
28:00	0.00	8.75	134.98	0.1268	0.4169	338.48	-6.19
28:15	0.00	8.80	134.08	0.1259	0.4168	338.48	-6.19
28:30	0.00	8.86	133.05	0.1250	0.4166	338.47	-6.20
28:45	0.00	8.92	132.03	0.1240	0.4165	338.47	-6.20
29:00	0.00	8.98	131.02	0.1231	0.4164	338.47	-6.20
29:15	0.00	9.05	130.02	0.1221	0.4163	338.46	-6.20
29:30	0.00	9.11	129.04	0.1212	0.4162	338.46	-6.20
29:45	0.00	9.17	128.06	0.1203	0.4161	338.46	-6.20
30:00	0.00	9.22	127.24	0.1195	0.4160	338.45	-6.20
30:15	0.00	9.28	126.28	0.1186	0.4158	338.45	-6.20
30:30	0.00	9.34	125.34	0.1177	0.4157	338.45	-6.20
30:45	0.00	9.40	124.41	0.1168	0.4156	338.44	-6.20

ตารางที่ ง.1.4 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
31:00	0.00	9.46	123.48	0.1160	0.4155	338.44	-6.20
31:15	0.00	9.52	122.57	0.1151	0.4154	338.44	-6.20
31:30	0.00	9.58	121.66	0.1143	0.4153	338.43	-6.20
31:45	0.00	9.63	120.90	0.1135	0.4152	338.43	-6.20
32:00	0.00	9.69	120.01	0.1127	0.4151	338.43	-6.20
32:15	0.00	9.75	119.13	0.1119	0.4150	338.42	-6.20
32:30	0.00	9.81	118.26	0.1111	0.4149	338.42	-6.20
32:45	0.00	9.87	117.40	0.1103	0.4148	338.42	-6.20
33:00	0.00	9.93	116.55	0.1095	0.4147	338.41	-6.20
33:15	0.00	9.99	115.70	0.1087	0.4146	338.41	-6.20
33:30	0.00	10.04	114.98	0.1080	0.4145	338.41	-6.20
33:45	0.00	10.10	114.15	0.1072	0.4144	338.41	-6.20
34:00	0.00	10.16	113.33	0.1064	0.4143	338.40	-6.20
34:15	0.00	10.22	112.52	0.1057	0.4142	338.40	-6.20
34:30	0.00	10.28	111.71	0.1049	0.4141	338.40	-6.20
34:35	0.00	10.30	111.48	0.1047	0.4141	338.40	-6.20

ตารางที่ ง.1.5 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
00:00	13.80	0.00	4756.38	4.4672	3.0614	950.00	23.26
00:15	11.18	0.00	3835.96	3.6027	1.3870	372.44	-3.74
00:30	9.06	0.00	3135.48	2.9448	1.1827	364.63	-4.28
00:45	7.32	0.00	2592.78	2.4351	1.0250	359.20	-4.68
01:00	5.88	0.00	2168.22	2.0363	0.9016	354.97	-4.98
01:15	4.67	0.00	1831.05	1.7197	0.8036	351.64	-5.22
01:30	3.65	0.00	1558.32	1.4636	0.7244	348.96	-5.42
01:45	2.78	0.00	1335.55	1.2544	0.6596	346.78	-5.58
02:00	2.03	0.00	1153.73	1.0836	0.6068	345.01	-5.70
02:15	1.38	0.00	1002.40	0.9414	0.5628	343.54	-5.82
02:30	0.82	0.00	875.56	0.8224	0.5260	342.31	-5.90
02:45	0.31	0.00	768.55	0.7218	0.4949	341.23	-5.99
03:00	0.00	0.19	1935.26	1.8176	0.7693	349.34	-5.39
03:15	0.00	0.47	1508.93	1.4172	0.7295	348.12	-5.48
03:30	0.00	0.68	1300.36	1.2213	0.7100	347.52	-5.53
03:45	0.00	0.87	1161.95	1.0913	0.6972	347.12	-5.55
04:00	0.00	1.05	1058.95	0.9945	0.6876	346.82	-5.57
04:15	0.00	1.21	977.82	0.9184	0.6800	346.60	-5.59
04:30	0.00	1.37	915.83	0.8601	0.6743	346.41	-5.60
04:45	0.00	1.51	863.12	0.8107	0.6694	346.27	-5.61
05:00	0.00	1.66	817.44	0.7677	0.6652	346.13	-5.63
05:15	0.00	1.79	779.96	0.7325	0.6617	346.03	-5.63
05:30	0.00	1.91	746.31	0.7010	0.6586	345.93	-5.64
05:45	0.00	2.04	716.53	0.6730	0.6557	345.85	-5.64
06:00	0.00	2.16	689.89	0.6479	0.6533	345.77	-5.65

ตารางที่ ง.1.5 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
06:15	0.00	2.28	666.48	0.6260	0.6512	345.70	-5.66
06:30	0.00	2.39	645.09	0.6045	0.6490	345.63	-5.66
06:45	0.00	2.50	624.20	0.5863	0.6472	345.58	-5.67
07:00	0.00	2.61	606.36	0.5695	0.6455	345.53	-5.67
07:15	0.00	2.71	589.84	0.5540	0.6440	345.48	-5.67
07:30	0.00	2.82	573.37	0.5385	0.6425	345.43	-5.68
07:45	0.00	2.92	559.14	0.5252	0.6412	345.40	-5.68
08:00	0.00	3.02	545.83	0.5126	0.6399	345.36	-5.68
08:15	0.00	3.12	532.41	0.5000	0.6387	345.32	-5.69
08:30	0.00	3.22	520.70	0.4890	0.6376	345.29	-5.69
08:45	0.00	3.31	509.65	0.4787	0.6366	345.25	-5.69
09:00	0.00	3.41	498.94	0.4686	0.6356	345.22	-5.69
09:15	0.00	3.50	488.55	0.4588	0.6346	345.19	-5.69
09:30	0.00	3.59	479.17	0.4500	0.6337	345.17	-5.70
09:45	0.00	3.68	469.57	0.4410	0.6329	345.14	-5.70
10:00	0.00	3.77	460.45	0.4325	0.6320	345.11	-5.70
10:15	0.00	3.85	452.99	0.4254	0.6313	345.09	-5.70
10:30	0.00	3.94	444.65	0.4176	0.6305	345.07	-5.70
10:45	0.00	4.02	437.81	0.4112	0.6299	345.05	-5.71
11:00	0.00	4.11	430.15	0.4040	0.6292	345.03	-5.71
11:15	0.00	4.20	422.82	0.3971	0.6285	345.00	-5.71
11:30	0.00	4.27	416.78	0.3914	0.6280	344.99	-5.71
11:45	0.00	4.36	409.99	0.3851	0.6273	344.97	-5.71
12:00	0.00	4.44	403.46	0.3789	0.6267	344.95	-5.71
12:15	0.00	4.52	398.07	0.3739	0.6262	344.93	-5.71

ตารางที่ ง.1.5 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
12:30	0.00	4.60	391.99	0.3682	0.6257	344.92	-5.72
12:45	0.00	4.68	386.13	0.3627	0.6251	344.90	-5.72
13:00	0.00	4.75	381.27	0.3581	0.6247	344.89	-5.72
13:15	0.00	4.83	375.78	0.3529	0.6242	344.87	-5.72
13:30	0.00	4.91	370.48	0.3480	0.6237	344.85	-5.72
13:45	0.00	4.98	366.07	0.3438	0.6233	344.84	-5.72
14:00	0.00	5.06	361.08	0.3391	0.6228	344.83	-5.72
14:15	0.00	5.14	356.24	0.3346	0.6223	344.81	-5.72
14:30	0.00	5.21	352.21	0.3308	0.6220	344.80	-5.72
14:45	0.00	5.29	347.64	0.3265	0.6215	344.79	-5.72
15:00	0.00	5.36	343.20	0.3223	0.6211	344.78	-5.73
15:15	0.00	5.43	339.50	0.3189	0.6208	344.77	-5.73
15:30	0.00	5.50	335.29	0.3149	0.6204	344.75	-5.73
15:45	0.00	5.57	331.78	0.3116	0.6201	344.74	-5.73
16:00	0.00	5.64	327.78	0.3079	0.6197	344.73	-5.73
16:15	0.00	5.72	323.89	0.3042	0.6193	344.72	-5.73
16:30	0.00	5.78	320.63	0.3011	0.6190	344.71	-5.73
16:45	0.00	5.86	316.92	0.2977	0.6187	344.70	-5.73
17:00	0.00	5.93	313.30	0.2943	0.6184	344.69	-5.73
17:15	0.00	5.99	310.27	0.2914	0.6181	344.68	-5.73
17:30	0.00	6.07	306.82	0.2882	0.6178	344.67	-5.73
17:45	0.00	6.13	303.92	0.2854	0.6175	344.66	-5.73
18:00	0.00	6.20	300.61	0.2823	0.6172	344.65	-5.73
18:15	0.00	6.27	297.38	0.2793	0.6169	344.65	-5.74
18:30	0.00	6.34	294.21	0.2763	0.6166	344.64	-5.74

ตารางที่ ง.1.5 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
18:45	0.00	6.40	291.56	0.2738	0.6163	344.63	-5.74
19:00	0.00	6.47	288.53	0.2710	0.6161	344.62	-5.74
19:15	0.00	6.54	285.56	0.2682	0.6158	344.61	-5.74
19:30	0.00	6.60	283.06	0.2658	0.6155	344.60	-5.74
19:45	0.00	6.67	280.20	0.2632	0.6153	344.60	-5.74
20:00	0.00	6.74	277.40	0.2605	0.6150	344.59	-5.74
20:15	0.00	6.80	275.05	0.2583	0.6148	344.58	-5.74
20:30	0.00	6.87	272.35	0.2558	0.6146	344.57	-5.74
20:45	0.00	6.93	270.08	0.2537	0.6143	344.57	-5.74
21:00	0.00	7.00	267.48	0.2512	0.6141	344.56	-5.74
21:15	0.00	7.06	265.29	0.2492	0.6139	344.55	-5.74
21:30	0.00	7.12	262.77	0.2468	0.6137	344.55	-5.74
21:45	0.00	7.19	260.30	0.2445	0.6134	344.54	-5.74
22:00	0.00	7.26	257.88	0.2422	0.6132	344.53	-5.74
22:15	0.00	7.32	255.84	0.2403	0.6130	344.53	-5.74
22:30	0.00	7.38	253.49	0.2381	0.6128	344.52	-5.74
22:45	0.00	7.44	251.51	0.2362	0.6126	344.51	-5.75
23:00	0.00	7.51	249.24	0.2341	0.6124	344.51	-5.75
23:15	0.00	7.57	247.01	0.2320	0.6122	344.50	-5.75
23:30	0.00	7.64	244.81	0.2299	0.6120	344.50	-5.75
23:45	0.00	7.69	242.96	0.2282	0.6118	344.49	-5.75
24:00	0.00	7.76	240.82	0.2262	0.6116	344.48	-5.75
24:15	0.00	7.82	239.02	0.2245	0.6115	344.48	-5.75
24:30	0.00	7.88	236.95	0.2225	0.6113	344.47	-5.75
24:45	0.00	7.95	234.91	0.2206	0.6111	344.47	-5.75

ตารางที่ ง.1.5 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T _w (°C)	Δr _i (mm)	Q̇ _{Load} (kW)	ṁ _{NH₃,evap} (kg/s)	ṁ _{NH₃,suct} (kg/s)	P _{NH₃,suct} (kPa)	T _{NH₃,suct} (°C)
25:00	0.00	8.01	232.90	0.2187	0.6109	344.46	-5.75
25:15	0.00	8.07	231.21	0.2171	0.6107	344.46	-5.75
25:30	0.00	8.13	229.25	0.2153	0.6106	344.45	-5.75
25:45	0.00	8.19	227.33	0.2135	0.6104	344.45	-5.75
26:00	0.00	8.25	225.70	0.2120	0.6102	344.44	-5.75
26:15	0.00	8.31	223.82	0.2102	0.6101	344.43	-5.75
26:30	0.00	8.37	222.24	0.2087	0.6099	344.43	-5.75
26:45	0.00	8.43	220.41	0.2070	0.6097	344.43	-5.75
27:00	0.00	8.50	218.61	0.2053	0.6096	344.42	-5.75
27:15	0.00	8.55	217.08	0.2039	0.6094	344.42	-5.75
27:30	0.00	8.61	215.32	0.2022	0.6093	344.41	-5.75
27:45	0.00	8.68	213.59	0.2006	0.6091	344.41	-5.75
28:00	0.00	8.73	212.12	0.1992	0.6090	344.40	-5.75
28:30	0.00	8.86	208.75	0.1961	0.6087	344.39	-5.75
28:45	0.00	8.91	207.34	0.1947	0.6085	344.39	-5.75
29:00	0.00	8.97	205.70	0.1932	0.6084	344.38	-5.75
29:15	0.00	9.04	204.09	0.1917	0.6082	344.38	-5.76
29:30	0.00	9.09	202.72	0.1904	0.6081	344.37	-5.76
29:45	0.00	9.15	201.14	0.1889	0.6079	344.37	-5.76
30:00	0.00	9.22	199.58	0.1874	0.6078	344.37	-5.76
30:15	0.00	9.27	198.25	0.1862	0.6077	344.36	-5.76
30:30	0.00	9.33	196.73	0.1848	0.6075	344.36	-5.76
30:45	0.00	9.39	195.21	0.1833	0.6074	344.35	-5.76
31:00	0.00	9.45	193.93	0.1821	0.6073	344.35	-5.76
31:15	0.00	9.51	192.45	0.1808	0.6071	344.35	-5.76

ตารางที่ ง.1.5 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T _w (°C)	Δr _i (mm)	Q̇ _{Load} (kW)	ṁ _{NH₃,evap} (kg/s)	ṁ _{NH₃,suct} (kg/s)	P _{NH₃,suct} (kPa)	T _{NH₃,suct} (°C)
31:30	0.00	9.56	191.20	0.1796	0.6070	344.34	-5.76
31:45	0.00	9.62	189.74	0.1782	0.6069	344.34	-5.76
32:00	0.00	9.68	188.31	0.1769	0.6068	344.33	-5.76
32:15	0.00	9.74	187.09	0.1757	0.6066	344.33	-5.76
32:30	0.00	9.80	185.68	0.1744	0.6065	344.33	-5.76
32:45	0.00	9.85	184.48	0.1733	0.6064	344.32	-5.76
33:00	0.00	9.91	183.10	0.1720	0.6063	344.32	-5.76
33:15	0.00	9.98	181.73	0.1707	0.6061	344.31	-5.76
33:30	0.00	10.04	180.38	0.1694	0.6060	344.31	-5.76
33:45	0.00	10.09	179.22	0.1683	0.6059	344.31	-5.76
34:00	0.00	10.15	177.89	0.1671	0.6058	344.30	-5.76
34:15	0.00	10.21	176.57	0.1658	0.6057	344.30	-5.76
34:30	0.00	10.26	175.45	0.1648	0.6056	344.30	-5.76
34:37	0.00	10.29	174.89	0.1643	0.6055	344.30	-5.76

ตารางที่ ง.1.6 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
00:00	13.80	0.00	5649.24	5.3058	4.0541	950.00	23.26
00:15	11.41	0.00	4649.29	4.3666	2.2279	400.86	-1.82
00:30	9.41	0.00	3856.06	3.6216	1.9260	388.94	-2.61
00:45	7.70	0.00	3219.39	3.0236	1.6855	380.68	-3.17
01:00	6.33	0.00	2732.81	2.5666	1.5017	374.40	-3.60
01:15	5.17	0.00	2337.97	2.1958	1.3526	369.34	-3.96
01:30	4.11	0.00	1995.56	1.8742	1.2232	364.97	-4.27
01:45	3.26	0.00	1732.02	1.6267	1.1237	361.63	-4.50
02:00	2.52	0.00	1511.83	1.4199	1.0406	358.84	-4.70
02:15	1.87	0.00	1326.53	1.2459	0.9706	356.51	-4.87
02:30	1.28	0.00	1159.81	1.0893	0.9077	354.41	-5.02
02:45	0.78	0.00	1027.44	0.9650	0.8577	352.75	-5.14
03:00	0.31	0.00	914.48	0.8588	0.8145	351.25	-5.25
03:06	0.00	0.00	873.23	0.8201	0.7960	350.17	-5.33
03:15	0.00	0.20	2292.11	2.1528	1.0447	357.83	-4.77
03:30	0.00	0.46	1820.76	1.7101	0.9871	356.06	-4.90
03:45	0.00	0.68	1556.33	1.4617	0.9549	355.06	-4.97
04:00	0.00	0.88	1384.67	1.3005	0.9340	354.42	-5.02
04:15	0.00	1.06	1260.85	1.1842	0.9190	353.96	-5.05
04:30	0.00	1.22	1165.69	1.0948	0.9074	353.60	-5.08
04:45	0.00	1.38	1089.38	1.0231	0.8982	353.31	-5.10
05:00	0.00	1.51	1034.65	0.9717	0.8915	353.11	-5.12
05:15	0.00	1.65	980.04	0.9205	0.8849	352.91	-5.13
05:30	0.00	1.79	933.11	0.8764	0.8792	352.73	-5.14
05:45	0.00	1.92	892.17	0.8379	0.8742	352.58	-5.15

ตารางที่ ง.1.6 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
06:00	0.00	2.04	856.01	0.8040	0.8698	352.44	-5.16
06:15	0.00	2.17	823.74	0.7737	0.8659	352.32	-5.17
06:30	0.00	2.29	794.70	0.7464	0.8624	352.21	-5.18
06:45	0.00	2.39	771.98	0.7250	0.8596	352.13	-5.19
07:00	0.00	2.50	747.63	0.7022	0.8567	352.04	-5.19
07:15	0.00	2.61	725.31	0.6812	0.8540	351.95	-5.20
07:30	0.00	2.72	704.72	0.6619	0.8515	351.88	-5.20
07:45	0.00	2.82	685.66	0.6440	0.8492	351.80	-5.21
08:00	0.00	2.93	667.94	0.6273	0.8470	351.74	-5.21
08:15	0.00	3.03	651.40	0.6118	0.8450	351.68	-5.22
08:30	0.00	3.12	638.07	0.5993	0.8434	351.63	-5.22
08:45	0.00	3.21	623.40	0.5855	0.8416	351.57	-5.23
09:00	0.00	3.31	609.59	0.5725	0.8400	351.52	-5.23
09:15	0.00	3.41	596.55	0.5603	0.8384	351.47	-5.23
09:30	0.00	3.50	584.22	0.5487	0.8369	351.43	-5.24
09:45	0.00	3.59	572.53	0.5377	0.8355	351.38	-5.24
10:00	0.00	3.68	561.43	0.5273	0.8341	351.34	-5.24
10:15	0.00	3.76	552.34	0.5188	0.8330	351.31	-5.25
10:30	0.00	3.85	542.20	0.5092	0.8318	351.27	-5.25
10:45	0.00	3.94	532.51	0.5001	0.8306	351.23	-5.25
11:00	0.00	4.03	523.25	0.4914	0.8295	351.20	-5.25
11:15	0.00	4.11	514.39	0.4831	0.8284	351.16	-5.26
11:30	0.00	4.20	505.89	0.4751	0.8274	351.13	-5.26
11:45	0.00	4.28	497.73	0.4675	0.8264	351.10	-5.26
12:00	0.00	4.35	490.98	0.4611	0.8256	351.08	-5.26

ตารางที่ ง.1.6 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
12:15	0.00	4.44	483.39	0.4540	0.8247	351.05	-5.26
12:30	0.00	4.52	476.08	0.4471	0.8238	351.02	-5.27
12:45	0.00	4.60	469.03	0.4405	0.8229	351.00	-5.27
13:00	0.00	4.68	462.23	0.4341	0.8221	350.97	-5.27
13:15	0.00	4.76	455.66	0.4280	0.8213	350.95	-5.27
13:30	0.00	4.84	449.30	0.4220	0.8205	350.92	-5.27
13:45	0.00	4.90	444.02	0.4170	0.8199	350.90	-5.28
14:00	0.00	4.98	438.04	0.4114	0.8192	350.88	-5.28
14:15	0.00	5.06	432.24	0.4060	0.8185	350.86	-5.28
14:30	0.00	5.13	426.62	0.4007	0.8178	350.84	-5.28
14:45	0.00	5.21	421.17	0.3956	0.8171	350.82	-5.28
15:00	0.00	5.29	415.87	0.3906	0.8165	350.80	-5.28
15:15	0.00	5.36	410.72	0.3857	0.8158	350.78	-5.28
15:30	0.00	5.42	406.42	0.3817	0.8153	350.76	-5.29
15:45	0.00	5.50	401.53	0.3771	0.8147	350.74	-5.29
16:00	0.00	5.57	396.77	0.3726	0.8142	350.73	-5.29
16:15	0.00	5.64	392.14	0.3683	0.8136	350.71	-5.29
16:30	0.00	5.72	387.62	0.3641	0.8130	350.69	-5.29
16:45	0.00	5.79	383.21	0.3599	0.8125	350.67	-5.29
17:00	0.00	5.86	378.92	0.3559	0.8120	350.66	-5.29
17:15	0.00	5.93	374.73	0.3519	0.8115	350.64	-5.29
17:30	0.00	5.99	371.21	0.3486	0.8111	350.63	-5.30
17:45	0.00	6.06	367.20	0.3449	0.8106	350.61	-5.30
18:00	0.00	6.13	363.28	0.3412	0.8101	350.60	-5.30
18:15	0.00	6.20	359.45	0.3376	0.8096	350.59	-5.30

ตารางที่ ง.1.6 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T _w (°C)	Δr _i (mm)	Q̇ _{Load} (kW)	ṁ _{NH₃,evap} (kg/s)	ṁ _{NH₃,suct} (kg/s)	P _{NH₃,suct} (kPa)	T _{NH₃,suct} (°C)
18:30	0.00	6.27	355.70	0.3341	0.8092	350.57	-5.30
18:45	0.00	6.34	352.03	0.3306	0.8087	350.56	-5.30
19:00	0.00	6.41	348.45	0.3273	0.8083	350.54	-5.30
19:15	0.00	6.47	345.43	0.3244	0.8079	350.53	-5.30
19:30	0.00	6.54	341.98	0.3212	0.8075	350.52	-5.30
19:45	0.00	6.60	338.60	0.3180	0.8071	350.51	-5.30
20:00	0.00	6.67	335.28	0.3149	0.8067	350.50	-5.31
20:15	0.00	6.74	332.03	0.3118	0.8063	350.48	-5.31
20:30	0.00	6.81	328.85	0.3089	0.8059	350.47	-5.31
20:45	0.00	6.87	325.72	0.3059	0.8055	350.46	-5.31
21:00	0.00	6.93	323.09	0.3034	0.8052	350.45	-5.31
21:15	0.00	7.00	320.07	0.3006	0.8049	350.44	-5.31
21:30	0.00	7.06	317.10	0.2978	0.8045	350.43	-5.31
21:45	0.00	7.13	314.19	0.2951	0.8041	350.42	-5.31
22:00	0.00	7.19	311.33	0.2924	0.8038	350.41	-5.31
22:15	0.00	7.26	308.52	0.2898	0.8035	350.40	-5.31
22:30	0.00	7.32	305.76	0.2872	0.8031	350.39	-5.31
22:45	0.00	7.38	303.43	0.2850	0.8028	350.38	-5.31
23:00	0.00	7.44	300.75	0.2825	0.8025	350.37	-5.31
23:15	0.00	7.51	298.12	0.2800	0.8022	350.36	-5.32
23:30	0.00	7.57	295.53	0.2776	0.8019	350.35	-5.32
23:45	0.00	7.64	292.98	0.2752	0.8016	350.34	-5.32
24:00	0.00	7.70	290.47	0.2728	0.8013	350.33	-5.32
24:15	0.00	7.76	288.00	0.2705	0.8010	350.32	-5.32
24:30	0.00	7.82	285.91	0.2685	0.8007	350.31	-5.32

ตารางที่ ง.1.6 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
24:45	0.00	7.88	283.51	0.2663	0.8004	350.30	-5.32
25:00	0.00	7.94	281.14	0.2640	0.8001	350.29	-5.32
25:15	0.00	8.01	278.81	0.2619	0.7999	350.28	-5.32
25:30	0.00	8.07	276.51	0.2597	0.7996	350.28	-5.32
25:45	0.00	8.13	274.24	0.2576	0.7993	350.27	-5.32
26:00	0.00	8.19	272.01	0.2555	0.7990	350.26	-5.32
26:15	0.00	8.25	270.12	0.2537	0.7988	350.25	-5.32
26:30	0.00	8.31	267.94	0.2517	0.7985	350.24	-5.32
26:45	0.00	8.37	265.80	0.2496	0.7983	350.24	-5.32
27:00	0.00	8.43	263.68	0.2476	0.7980	350.23	-5.32
27:15	0.00	8.50	261.59	0.2457	0.7978	350.22	-5.33
27:30	0.00	8.56	259.52	0.2437	0.7975	350.21	-5.33
27:45	0.00	8.62	257.49	0.2418	0.7973	350.21	-5.33
28:00	0.00	8.67	255.76	0.2402	0.7971	350.20	-5.33
28:15	0.00	8.73	253.77	0.2383	0.7968	350.19	-5.33
28:30	0.00	8.79	251.80	0.2365	0.7966	350.18	-5.33
28:45	0.00	8.85	249.86	0.2347	0.7963	350.18	-5.33
29:00	0.00	8.92	247.95	0.2329	0.7961	350.17	-5.33
29:15	0.00	8.98	246.05	0.2311	0.7959	350.16	-5.33
29:30	0.00	9.04	244.18	0.2293	0.7957	350.16	-5.33
29:45	0.00	9.09	242.59	0.2278	0.7955	350.15	-5.33
30:00	0.00	9.15	240.76	0.2261	0.7952	350.14	-5.33
30:15	0.00	9.21	238.94	0.2244	0.7950	350.14	-5.33
30:30	0.00	9.27	237.15	0.2227	0.7948	350.13	-5.33
30:45	0.00	9.33	235.38	0.2211	0.7946	350.12	-5.33

ตารางที่ ง.1.6 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 1 (ต่อ)

t (m:s)	T _w (°C)	Δr _i (mm)	Q̇ _{Load} (kW)	ṁ _{NH₃,evap} (kg/s)	ṁ _{NH₃,suct} (kg/s)	P _{NH₃,suct} (kPa)	T _{NH₃,suct} (°C)
31:00	0.00	9.39	233.62	0.2194	0.7944	350.12	-5.33
31:15	0.00	9.45	231.89	0.2178	0.7942	350.11	-5.33
31:30	0.00	9.50	230.42	0.2164	0.7940	350.10	-5.33
31:45	0.00	9.56	228.72	0.2148	0.7938	350.10	-5.33
32:00	0.00	9.62	227.03	0.2132	0.7936	350.09	-5.33
32:15	0.00	9.68	225.36	0.2117	0.7934	350.09	-5.34
32:30	0.00	9.74	223.72	0.2101	0.7932	350.08	-5.34
32:45	0.00	9.80	222.08	0.2086	0.7930	350.07	-5.34
33:00	0.00	9.86	220.46	0.2071	0.7928	350.07	-5.34
33:15	0.00	9.91	219.09	0.2058	0.7926	350.06	-5.34
33:30	0.00	9.97	217.50	0.2043	0.7924	350.06	-5.34
33:45	0.00	10.03	215.93	0.2028	0.7922	350.05	-5.34
34:00	0.00	10.09	214.37	0.2013	0.7920	350.04	-5.34
34:15	0.00	10.15	212.82	0.1999	0.7919	350.04	-5.34
34:30	0.00	10.21	211.29	0.1984	0.7917	350.03	-5.34
34:45	0.00	10.27	209.77	0.1970	0.7915	350.03	-5.34
34:53	0.00	10.30	209.13	0.1964	0.7914	350.02	-5.34

ตารางที่ ง.1.7 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
00:00	1.10	0.00	832.32	0.7833	0.7159	380.00	-3.22
00:15	0.27	0.00	791.45	0.6771	0.4265	339.12	-6.15
00:19	0.00	0.00	694.91	0.6540	0.3988	337.93	-6.24
00:30	0.00	0.37	1695.32	1.5954	0.4589	339.78	-6.10
00:45	0.00	0.72	1222.67	1.1506	0.4163	338.47	-6.20
01:00	0.00	1.00	1011.37	0.9518	0.3974	337.88	-6.24
01:15	0.00	1.24	882.89	0.8309	0.3858	337.52	-6.27
01:30	0.00	1.46	793.63	0.7469	0.3778	337.28	-6.29
01:45	0.00	1.66	726.72	0.6839	0.3718	337.09	-6.30
02:00	0.00	1.85	674.02	0.6343	0.3671	336.95	-6.31
02:15	0.00	2.00	636.70	0.5992	0.3637	336.84	-6.32
02:30	0.00	2.17	599.85	0.5645	0.3604	336.74	-6.33
02:45	0.00	2.33	568.46	0.5350	0.3576	336.66	-6.33
03:00	0.00	2.48	541.28	0.5094	0.3552	336.58	-6.34
03:15	0.00	2.63	517.43	0.4869	0.3530	336.51	-6.34
03:30	0.00	2.78	496.27	0.4670	0.3512	336.46	-6.35
03:45	0.00	2.91	477.31	0.4492	0.3495	336.40	-6.35
04:00	0.00	3.03	462.53	0.4353	0.3481	336.36	-6.35
04:15	0.00	3.16	446.76	0.4204	0.3467	336.32	-6.36
04:30	0.00	3.29	432.34	0.4069	0.3454	336.28	-6.36
04:45	0.00	3.42	419.09	0.3944	0.3442	336.24	-6.36
05:00	0.00	3.54	406.86	0.3829	0.3431	336.21	-6.37
05:15	0.00	3.66	395.51	0.3722	0.3421	336.18	-6.37
05:30	0.00	3.78	384.94	0.3623	0.3412	336.15	-6.37
05:45	0.00	3.88	376.44	0.3543	0.3404	336.12	-6.37

ตารางที่ ง.1.7 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
06:00	0.00	4.00	367.10	0.3455	0.3396	336.10	-6.37
06:15	0.00	4.11	358.33	0.3372	0.3388	336.07	-6.38
06:30	0.00	4.22	350.06	0.3294	0.3380	336.05	-6.38
06:45	0.00	4.33	342.25	0.3221	0.3373	336.03	-6.38
07:00	0.00	4.44	334.86	0.3151	0.3367	336.01	-6.38
07:15	0.00	4.54	327.85	0.3085	0.3360	335.99	-6.38
07:30	0.00	4.63	322.11	0.3031	0.3355	335.97	-6.38
07:45	0.00	4.74	315.72	0.2971	0.3350	335.96	-6.38
08:00	0.00	4.84	309.63	0.2914	0.3344	335.94	-6.39
08:15	0.00	4.94	303.80	0.2859	0.3339	335.92	-6.39
08:30	0.00	5.04	298.24	0.2807	0.3334	335.91	-6.39
08:45	0.00	5.14	292.90	0.2756	0.3329	335.89	-6.39
09:00	0.00	5.23	287.78	0.2708	0.3325	335.88	-6.39
09:15	0.00	5.32	283.56	0.2668	0.3321	335.87	-6.39
09:30	0.00	5.41	278.80	0.2624	0.3316	335.85	-6.39
09:45	0.00	5.51	274.23	0.2581	0.3312	335.84	-6.39
10:00	0.00	5.60	269.82	0.2539	0.3308	335.83	-6.39
10:15	0.00	5.69	265.57	0.2499	0.3305	335.82	-6.40
10:30	0.00	5.79	261.46	0.2461	0.3301	335.81	-6.40
10:45	0.00	5.88	257.49	0.2423	0.3297	335.80	-6.40
11:00	0.00	5.96	254.20	0.2392	0.3294	335.79	-6.40
11:15	0.00	6.05	250.47	0.2357	0.3291	335.78	-6.40
11:30	0.00	6.14	246.85	0.2323	0.3288	335.77	-6.40
11:45	0.00	6.22	243.35	0.2290	0.3285	335.76	-6.40
12:00	0.00	6.31	239.95	0.2258	0.3282	335.75	-6.40

ตารางที่ ง.1.7 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
12:15	0.00	6.40	236.65	0.2227	0.3279	335.74	-6.40
12:30	0.00	6.49	233.44	0.2197	0.3276	335.73	-6.40
12:45	0.00	6.56	230.77	0.2172	0.3273	335.72	-6.40
13:00	0.00	6.65	227.72	0.2143	0.3271	335.71	-6.40
13:15	0.00	6.73	224.76	0.2115	0.3268	335.71	-6.40
13:30	0.00	6.82	221.88	0.2088	0.3265	335.70	-6.40
13:45	0.00	6.90	219.07	0.2062	0.3263	335.69	-6.40
14:00	0.00	6.98	216.33	0.2036	0.3260	335.68	-6.41
14:15	0.00	7.07	213.66	0.2011	0.3258	335.67	-6.41
14:30	0.00	7.14	211.42	0.1990	0.3256	335.67	-6.41
14:45	0.00	7.22	208.86	0.1966	0.3254	335.66	-6.41
15:00	0.00	7.30	206.37	0.1942	0.3252	335.65	-6.41
15:15	0.00	7.39	203.93	0.1919	0.3249	335.65	-6.41
15:30	0.00	7.47	201.55	0.1897	0.3247	335.64	-6.41
15:45	0.00	7.55	199.22	0.1875	0.3245	335.63	-6.41
16:00	0.00	7.63	196.94	0.1853	0.3243	335.63	-6.41
16:15	0.00	7.70	195.02	0.1835	0.3241	335.62	-6.41
16:30	0.00	7.78	192.83	0.1815	0.3239	335.62	-6.41
16:45	0.00	7.86	190.68	0.1794	0.3237	335.61	-6.41
17:00	0.00	7.94	188.58	0.1775	0.3236	335.61	-6.41
17:15	0.00	8.02	186.52	0.1755	0.3234	335.60	-6.41
17:30	0.00	8.09	184.49	0.1736	0.3232	335.59	-6.41
17:45	0.00	8.17	182.51	0.1718	0.3230	335.59	-6.41
18:00	0.00	8.24	180.84	0.1702	0.3229	335.58	-6.41
18:15	0.00	8.32	178.92	0.1684	0.3227	335.58	-6.41

ตารางที่ ง.1.7 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
18:30	0.00	8.40	177.04	0.1666	0.3225	335.57	-6.41
18:45	0.00	8.47	175.19	0.1649	0.3224	335.57	-6.41
19:00	0.00	8.55	173.38	0.1632	0.3222	335.56	-6.41
19:15	0.00	8.63	171.60	0.1615	0.3220	335.56	-6.41
19:30	0.00	8.70	169.84	0.1598	0.3219	335.55	-6.42
19:45	0.00	8.77	168.36	0.1584	0.3217	335.55	-6.42
20:00	0.00	8.85	166.66	0.1568	0.3216	335.54	-6.42
20:15	0.00	8.92	164.99	0.1553	0.3214	335.54	-6.42
20:30	0.00	9.00	163.35	0.1537	0.3213	335.54	-6.42
20:45	0.00	9.07	161.73	0.1522	0.3211	335.53	-6.42
21:00	0.00	9.15	160.13	0.1507	0.3210	335.53	-6.42
21:15	0.00	9.22	158.56	0.1492	0.3209	335.52	-6.42
21:30	0.00	9.30	157.01	0.1478	0.3207	335.52	-6.42
21:45	0.00	9.36	155.71	0.1465	0.3206	335.51	-6.42
22:00	0.00	9.44	154.20	0.1451	0.3205	335.51	-6.42
22:15	0.00	9.51	152.72	0.1437	0.3203	335.51	-6.42
22:30	0.00	9.59	151.25	0.1423	0.3202	335.50	-6.42
22:45	0.00	9.66	149.81	0.1410	0.3201	335.50	-6.42
23:00	0.00	9.74	148.39	0.1396	0.3200	335.49	-6.42
23:15	0.00	9.81	146.98	0.1383	0.3198	335.49	-6.42
23:30	0.00	9.88	145.79	0.1372	0.3197	335.49	-6.42
23:45	0.00	9.95	144.42	0.1359	0.3196	335.48	-6.42
24:00	0.00	10.02	143.07	0.1346	0.3195	335.48	-6.42
24:15	0.00	10.10	141.73	0.1334	0.3194	335.48	-6.42
24:30	0.00	10.17	140.41	0.1321	0.3192	335.47	-6.42

ตารางที่ ง.1.7 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
24:45	0.00	10.25	139.11	0.1309	0.3191	335.47	-6.42
25:00	0.00	10.32	137.82	0.1297	0.3190	335.46	-6.42
25:15	0.00	10.38	136.72	0.1287	0.3189	335.46	-6.42
25:30	0.00	10.46	135.46	0.1275	0.3188	335.46	-6.42
25:45	0.00	10.53	134.22	0.1263	0.3187	335.46	-6.42
26:00	0.00	10.60	132.98	0.1251	0.3186	335.45	-6.42
26:15	0.00	10.68	131.76	0.1240	0.3185	335.45	-6.42
26:30	0.00	10.75	130.56	0.1229	0.3184	335.44	-6.42
26:45	0.00	10.82	129.36	0.1217	0.3182	335.44	-6.42
27:00	0.00	10.89	128.35	0.1208	0.3182	335.44	-6.42
27:15	0.00	10.96	127.18	0.1197	0.3181	335.44	-6.42
27:30	0.00	11.03	126.02	0.1186	0.3179	335.43	-6.42
27:45	0.00	11.11	124.87	0.1175	0.3178	335.43	-6.42
28:00	0.00	11.18	123.74	0.1164	0.3177	335.43	-6.42
28:15	0.00	11.25	122.61	0.1154	0.3176	335.42	-6.42
28:30	0.00	11.33	121.49	0.1143	0.3175	335.42	-6.43
28:45	0.00	11.39	120.54	0.1134	0.3175	335.42	-6.43
29:00	0.00	11.46	119.45	0.1124	0.3174	335.41	-6.43
29:15	0.00	11.54	118.36	0.1114	0.3173	335.41	-6.43
29:30	0.00	11.61	117.28	0.1104	0.3172	335.41	-6.43
29:45	0.00	11.69	116.21	0.1094	0.3171	335.41	-6.43
30:00	0.00	11.76	115.15	0.1084	0.3170	335.40	-6.43
30:15	0.00	11.83	114.10	0.1074	0.3169	335.40	-6.43
30:30	0.00	11.90	113.20	0.1065	0.3168	335.40	-6.43
30:45	0.00	11.97	112.16	0.1056	0.3167	335.39	-6.43

ตารางที่ ง.1.7 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
หลอดกำลังการผลิต 50 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
31:00	0.00	12.04	111.13	0.1046	0.3166	335.39	-6.43
31:15	0.00	12.12	110.11	0.1036	0.3165	335.39	-6.43
31:30	0.00	12.19	109.09	0.1027	0.3164	335.39	-6.43
31:45	0.00	12.27	108.08	0.1017	0.3163	335.38	-6.43
32:00	0.00	12.34	107.08	0.1008	0.3162	335.38	-6.43
32:15	0.00	12.41	106.23	0.1000	0.3162	335.38	-6.43
32:30	0.00	12.48	105.24	0.0990	0.3161	335.37	-6.43
32:45	0.00	12.56	104.25	0.0981	0.3160	335.37	-6.43
33:00	0.00	12.63	103.27	0.0972	0.3159	335.37	-6.43
33:15	0.00	12.71	102.30	0.0963	0.3158	335.37	-6.43
33:30	0.00	12.78	101.33	0.0954	0.3157	335.36	-6.43
33:45	0.00	12.86	100.37	0.0945	0.3156	335.36	-6.43
33:53	0.00	12.89	99.95	0.0941	0.3156	335.36	-6.43

ตารางที่ ง.1.8 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
00:00	1.10	0.00	1313.42	1.2360	1.0861	380.00	-3.22
00:15	0.32	0.00	1141.23	1.0740	0.5792	344.18	-5.96
00:20	0.00	0.00	1097.25	1.0326	0.5044	341.18	-6.68
00:30	0.00	0.38	2634.08	2.4789	0.6585	345.93	-5.64
00:45	0.00	0.69	1961.73	1.8462	0.6089	344.40	-5.75
01:00	0.00	0.98	1602.03	1.5076	0.5824	343.58	-5.81
01:15	0.00	1.23	1389.75	1.3079	0.5668	343.10	-5.85
01:30	0.00	1.43	1262.52	1.1881	0.5575	342.81	-5.87
01:45	0.00	1.64	1150.41	1.0826	0.5492	342.56	-5.89
02:00	0.00	1.83	1063.22	1.0006	0.5428	342.36	-5.90
02:15	0.00	1.99	1002.01	0.9430	0.5383	342.22	-5.91
02:30	0.00	2.16	941.97	0.8865	0.5339	342.09	-5.93
02:45	0.00	2.33	891.12	0.8386	0.5302	341.97	-5.93
03:00	0.00	2.47	853.18	0.8029	0.5274	341.89	-5.94
03:15	0.00	2.62	814.14	0.7662	0.5245	341.80	-5.95
03:30	0.00	2.77	779.65	0.7337	0.5220	341.72	-5.95
03:45	0.00	2.89	753.08	0.7087	0.5201	341.66	-5.96
04:00	0.00	3.03	724.98	0.6823	0.5180	341.60	-5.96
04:15	0.00	3.17	699.53	0.6583	0.5161	341.54	-5.97
04:30	0.00	3.28	679.52	0.6395	0.5147	341.50	-5.97
04:45	0.00	3.41	657.99	0.6192	0.5131	341.45	-5.97
05:00	0.00	3.52	640.89	0.6031	0.5118	341.41	-5.98
05:15	0.00	3.65	622.34	0.5857	0.5105	341.37	-5.98
05:30	0.00	3.77	605.12	0.5695	0.5092	341.33	-5.98
05:45	0.00	3.87	591.30	0.5565	0.5082	341.30	-5.98

ตารางที่ ง.1.8 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
06:00	0.00	3.99	576.14	0.5422	0.5071	341.26	-5.99
06:15	0.00	4.11	561.93	0.5288	0.5060	341.23	-5.99
06:30	0.00	4.21	550.43	0.5180	0.5052	341.20	-5.99
06:45	0.00	4.32	537.73	0.5060	0.5043	341.17	-5.99
07:00	0.00	4.43	525.73	0.4948	0.5034	341.15	-6.00
07:15	0.00	4.52	515.95	0.4855	0.5027	341.13	-6.00
07:30	0.00	4.63	505.08	0.4753	0.5019	341.10	-6.00
07:45	0.00	4.74	494.75	0.4656	0.5011	341.08	-6.00
08:00	0.00	4.83	486.29	0.4576	0.5005	341.06	-6.00
08:15	0.00	4.93	476.85	0.4488	0.4998	341.04	-6.00
08:30	0.00	5.04	467.82	0.4403	0.4991	341.02	-6.00
08:45	0.00	5.12	460.40	0.4333	0.4986	341.00	-6.01
09:00	0.00	5.22	452.08	0.4254	0.4980	340.98	-6.01
09:15	0.00	5.32	444.11	0.4179	0.4974	340.96	-6.01
09:30	0.00	5.41	437.52	0.4117	0.4969	340.95	-6.01
09:45	0.00	5.51	430.11	0.4048	0.4964	340.93	-6.01
10:00	0.00	5.59	423.98	0.3990	0.4959	340.92	-6.01
10:15	0.00	5.68	417.08	0.3925	0.4954	340.90	-6.01
10:30	0.00	5.78	410.42	0.3862	0.4949	340.89	-6.01
10:45	0.00	5.86	404.90	0.3810	0.4945	340.87	-6.02
11:00	0.00	5.95	398.66	0.3752	0.4941	340.86	-6.02
11:15	0.00	6.05	392.62	0.3695	0.4936	340.85	-6.02
11:30	0.00	6.13	387.61	0.3648	0.4933	340.84	-6.02
11:45	0.00	6.22	381.92	0.3594	0.4928	340.82	-6.02
12:00	0.00	6.31	376.42	0.3542	0.4924	340.81	-6.02

ตารางที่ ง.1.8 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
12:15	0.00	6.39	371.83	0.3499	0.4921	340.80	-6.02
12:30	0.00	6.48	366.63	0.3450	0.4917	340.79	-6.02
12:45	0.00	6.57	361.57	0.3403	0.4914	340.78	-6.02
13:00	0.00	6.64	357.35	0.3363	0.4910	340.77	-6.02
13:15	0.00	6.73	352.56	0.3318	0.4907	340.76	-6.02
13:30	0.00	6.82	347.89	0.3274	0.4903	340.75	-6.03
13:45	0.00	6.89	343.99	0.3237	0.4901	340.74	-6.03
14:00	0.00	6.98	339.55	0.3195	0.4897	340.73	-6.03
14:15	0.00	7.06	335.22	0.3155	0.4894	340.72	-6.03
14:30	0.00	7.14	331.60	0.3121	0.4892	340.71	-6.03
14:45	0.00	7.22	327.47	0.3082	0.4888	340.70	-6.03
15:00	0.00	7.29	324.01	0.3049	0.4886	340.69	-6.03
15:15	0.00	7.38	320.06	0.3012	0.4883	340.68	-6.03
15:30	0.00	7.46	316.20	0.2976	0.4880	340.67	-6.03
15:45	0.00	7.53	312.96	0.2945	0.4878	340.67	-6.03
16:00	0.00	7.62	309.26	0.2910	0.4875	340.66	-6.03
16:15	0.00	7.70	305.64	0.2876	0.4872	340.65	-6.03
16:30	0.00	7.77	302.60	0.2848	0.4870	340.64	-6.03
16:45	0.00	7.85	299.13	0.2815	0.4868	340.64	-6.03
17:00	0.00	7.94	295.72	0.2783	0.4865	340.63	-6.03
17:15	0.00	8.01	292.86	0.2756	0.4863	340.62	-6.03
17:30	0.00	8.09	289.58	0.2725	0.4861	340.61	-6.03
17:45	0.00	8.17	286.37	0.2695	0.4858	340.61	-6.04
18:00	0.00	8.24	283.67	0.2670	0.4856	340.60	-6.04
18:15	0.00	8.32	280.57	0.2640	0.4854	340.59	-6.04

ตารางที่ ง.1.8 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T _w (°C)	Δr _i (mm)	Q̇ _{Load} (kW)	ṁ _{NH₃,evap} (kg/s)	ṁ _{NH₃,suct} (kg/s)	P _{NH₃,suct} (kPa)	T _{NH₃,suct} (°C)
18:30	0.00	8.40	277.53	0.2612	0.4852	340.59	-6.04
18:45	0.00	8.47	274.96	0.2588	0.4850	340.58	-6.04
19:00	0.00	8.54	272.02	0.2560	0.4848	340.57	-6.04
19:15	0.00	8.62	269.14	0.2533	0.4846	340.57	-6.04
19:30	0.00	8.69	266.70	0.2510	0.4844	340.56	-6.04
19:45	0.00	8.77	263.91	0.2484	0.4842	340.56	-6.04
20:00	0.00	8.85	261.16	0.2458	0.4840	340.55	-6.04
20:15	0.00	8.92	258.85	0.2436	0.4838	340.54	-6.04
20:30	0.00	9.00	256.18	0.2411	0.4836	340.54	-6.04
20:45	0.00	9.06	253.94	0.2390	0.4835	340.53	-6.04
21:00	0.00	9.14	251.35	0.2365	0.4833	340.53	-6.04
21:15	0.00	9.22	248.81	0.2342	0.4831	340.52	-6.04
21:30	0.00	9.28	246.66	0.2321	0.4829	340.52	-6.04
21:45	0.00	9.36	244.19	0.2298	0.4827	340.51	-6.04
22:00	0.00	9.44	241.75	0.2275	0.4826	340.51	-6.04
22:15	0.00	9.51	239.70	0.2256	0.4824	340.50	-6.04
22:30	0.00	9.58	237.33	0.2233	0.4822	340.50	-6.04
22:45	0.00	9.66	234.99	0.2211	0.4821	340.49	-6.04
23:00	0.00	9.73	233.01	0.2193	0.4819	340.49	-6.04
23:15	0.00	9.80	230.74	0.2171	0.4818	340.48	-6.04
23:30	0.00	9.88	228.49	0.2150	0.4816	340.48	-6.05
23:45	0.00	9.94	226.59	0.2132	0.4814	340.47	-6.05
24:00	0.00	10.02	224.40	0.2112	0.4813	340.47	-6.05
24:15	0.00	10.10	222.24	0.2091	0.4811	340.46	-6.05
24:30	0.00	10.16	220.41	0.2074	0.4810	340.46	-6.05

ตารางที่ ง.1.8 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
24:45	0.00	10.24	218.30	0.2054	0.4808	340.45	-6.05
25:00	0.00	10.31	216.21	0.2035	0.4807	340.45	-6.05
25:15	0.00	10.38	214.45	0.2018	0.4806	340.44	-6.05
25:30	0.00	10.46	212.41	0.1999	0.4804	340.44	-6.05
25:45	0.00	10.52	210.68	0.1983	0.4803	340.44	-6.05
26:00	0.00	10.60	208.68	0.1964	0.4801	340.43	-6.05
26:15	0.00	10.67	206.71	0.1945	0.4800	340.43	-6.05
26:30	0.00	10.74	205.03	0.1930	0.4799	340.42	-6.05
26:45	0.00	10.81	203.10	0.1911	0.4797	340.42	-6.05
27:00	0.00	10.89	201.19	0.1893	0.4796	340.41	-6.05
27:15	0.00	10.95	199.56	0.1878	0.4795	340.41	-6.05
27:30	0.00	11.03	197.69	0.1860	0.4793	340.41	-6.05
27:45	0.00	11.11	195.83	0.1843	0.4792	340.40	-6.05
28:00	0.00	11.17	194.25	0.1828	0.4791	340.40	-6.05
28:15	0.00	11.25	192.43	0.1811	0.4789	340.39	-6.05
28:30	0.00	11.32	190.62	0.1794	0.4788	340.39	-6.05
28:45	0.00	11.39	189.09	0.1779	0.4787	340.39	-6.05
29:00	0.00	11.46	187.31	0.1763	0.4786	340.38	-6.05
29:15	0.00	11.54	185.55	0.1746	0.4784	340.38	-6.05
29:30	0.00	11.60	184.06	0.1732	0.4783	340.38	-6.05
29:45	0.00	11.68	182.33	0.1716	0.4782	340.37	-6.05
30:00	0.00	11.76	180.61	0.1700	0.4781	340.37	-6.05
30:15	0.00	11.82	179.15	0.1686	0.4780	340.36	-6.05
30:30	0.00	11.90	177.46	0.1670	0.4778	340.36	-6.05
30:45	0.00	11.97	175.78	0.1654	0.4777	340.36	-6.05

ตารางที่ ง.1.8 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
หลอดกำลังการผลิต 80 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
31:00	0.00	12.04	174.35	0.1641	0.4776	340.35	-6.05
31:15	0.00	12.12	172.70	0.1625	0.4775	340.35	-6.05
31:30	0.00	12.18	171.29	0.1612	0.4774	340.35	-6.05
31:45	0.00	12.26	169.66	0.1597	0.4773	340.34	-6.06
32:00	0.00	12.34	168.04	0.1581	0.4772	340.34	-6.06
32:15	0.00	12.40	166.65	0.1568	0.4771	340.34	-6.06
32:30	0.00	12.48	165.05	0.1553	0.4769	340.33	-6.06
32:45	0.00	12.56	163.46	0.1538	0.4768	340.33	-6.06
33:00	0.00	12.62	162.10	0.1526	0.4767	340.33	-6.06
33:15	0.00	12.70	160.52	0.1511	0.4766	340.32	-6.06
33:30	0.00	12.78	158.96	0.1496	0.4765	340.32	-6.06
33:45	0.00	12.85	157.62	0.1483	0.4764	340.32	-6.06
33:54	0.00	12.89	156.73	0.1475	0.4763	340.31	-6.06

ตารางที่ ง.1.9 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
00:00	1.10	0.00	1560.50	1.4686	1.4027	380.00	-3.22
00:15	0.40	0.00	1371.74	1.2909	0.9744	356.86	-4.68
00:30	0.00	0.31	3427.85	3.2259	0.9199	353.98	-5.05
00:45	0.00	0.67	2374.41	2.2345	0.8194	350.89	-5.28
01:00	0.00	0.96	1941.22	1.8269	0.7783	349.62	-5.37
01:15	0.00	1.21	1685.07	1.5858	0.7541	348.87	-5.42
01:30	0.00	1.43	1509.65	1.4207	0.7375	348.36	-5.46
01:45	0.00	1.63	1379.31	1.2980	0.7252	347.98	-5.49
02:00	0.00	1.82	1277.26	1.2020	0.7156	347.69	-5.51
02:15	0.00	1.97	1205.29	1.1343	0.7088	347.48	-5.53
02:30	0.00	2.14	1134.45	1.0676	0.7021	347.27	-5.54
02:45	0.00	2.30	1074.27	1.0110	0.6964	347.10	-5.55
03:00	0.00	2.46	1022.27	0.9620	0.6915	346.95	-5.57
03:15	0.00	2.61	976.72	0.9192	0.6872	346.81	-5.58
03:30	0.00	2.76	936.36	0.8812	0.6834	346.70	-5.58
03:45	0.00	2.90	900.25	0.8472	0.6800	346.59	-5.59
04:00	0.00	3.03	867.68	0.8166	0.6769	346.50	-5.60
04:15	0.00	3.15	842.15	0.7925	0.6745	346.42	-5.60
04:30	0.00	3.27	814.76	0.7668	0.6719	346.34	-5.61
04:45	0.00	3.40	789.61	0.7431	0.6695	346.27	-5.62
05:00	0.00	3.53	766.40	0.7213	0.6674	346.20	-5.62
05:15	0.00	3.65	744.89	0.7010	0.6653	346.14	-5.63
05:30	0.00	3.77	724.87	0.6822	0.6634	346.08	-5.63
05:45	0.00	3.88	706.17	0.6646	0.6617	346.03	-5.63
06:00	0.00	3.98	691.09	0.6504	0.6602	345.98	-5.64

ตารางที่ ง.1.9 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T _w (°C)	Δr _i (mm)	Q̇ _{Load} (kW)	ṁ _{NH₃,evap} (kg/s)	ṁ _{NH₃,suct} (kg/s)	P _{NH₃,suct} (kPa)	T _{NH₃,suct} (°C)
06:15	0.00	4.09	674.49	0.6347	0.6587	345.93	-5.64
06:30	0.00	4.20	658.85	0.6200	0.6572	345.89	-5.64
06:45	0.00	4.31	644.08	0.6061	0.6558	345.85	-5.65
07:00	0.00	4.42	630.11	0.5930	0.6545	345.80	-5.65
07:15	0.00	4.53	616.85	0.5805	0.6532	345.77	-5.65
07:30	0.00	4.63	604.26	0.5687	0.6521	345.73	-5.66
07:45	0.00	4.72	593.95	0.5590	0.6511	345.70	-5.66
08:00	0.00	4.82	582.44	0.5481	0.6500	345.67	-5.66
08:15	0.00	4.92	571.45	0.5378	0.6490	345.63	-5.66
08:30	0.00	5.02	560.93	0.5279	0.6480	345.60	-5.66
08:45	0.00	5.12	550.86	0.5184	0.6470	345.57	-5.67
09:00	0.00	5.22	541.20	0.5093	0.6461	345.55	-5.67
09:15	0.00	5.32	531.93	0.5006	0.6452	345.52	-5.67
09:30	0.00	5.40	524.27	0.4934	0.6445	345.50	-5.67
09:45	0.00	5.49	515.64	0.4853	0.6437	345.47	-5.67
10:00	0.00	5.59	507.32	0.4774	0.6429	345.45	-5.68
10:15	0.00	5.68	499.31	0.4699	0.6421	345.42	-5.68
10:30	0.00	5.77	491.57	0.4626	0.6414	345.40	-5.68
10:45	0.00	5.86	484.09	0.4556	0.6407	345.38	-5.68
11:00	0.00	5.96	476.86	0.4488	0.6400	345.36	-5.68
11:15	0.00	6.03	470.84	0.4431	0.6395	345.34	-5.68
11:30	0.00	6.12	464.03	0.4367	0.6388	345.32	-5.69
11:45	0.00	6.21	457.43	0.4305	0.6382	345.30	-5.69
12:00	0.00	6.30	451.03	0.4245	0.6376	345.28	-5.69
12:15	0.00	6.39	444.81	0.4186	0.6370	345.27	-5.69

ตารางที่ ง.1.9 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T _w (°C)	Δr _i (mm)	Q̇ _{Load} (kW)	ṁ _{NH₃,evap} (kg/s)	ṁ _{NH₃,suct} (kg/s)	P _{NH₃,suct} (kPa)	T _{NH₃,suct} (°C)
12:30	0.00	6.47	438.77	0.4129	0.6364	345.25	-5.69
12:45	0.00	6.56	432.90	0.4074	0.6359	345.23	-5.69
13:00	0.00	6.63	428.00	0.4028	0.6354	345.22	-5.69
13:15	0.00	6.72	422.42	0.3975	0.6349	345.20	-5.69
13:30	0.00	6.80	416.99	0.3924	0.6344	345.18	-5.70
13:45	0.00	6.89	411.70	0.3874	0.6339	345.17	-5.70
14:00	0.00	6.97	406.54	0.3826	0.6334	345.15	-5.70
14:15	0.00	7.06	401.51	0.3779	0.6329	345.14	-5.70
14:30	0.00	7.14	396.60	0.3732	0.6325	345.13	-5.70
14:45	0.00	7.21	392.49	0.3694	0.6321	345.11	-5.70
15:00	0.00	7.29	387.79	0.3649	0.6316	345.10	-5.70
15:15	0.00	7.37	383.21	0.3606	0.6312	345.09	-5.70
15:30	0.00	7.46	378.72	0.3564	0.6308	345.07	-5.70
15:45	0.00	7.54	374.34	0.3523	0.6304	345.06	-5.70
16:00	0.00	7.62	370.04	0.3482	0.6300	345.05	-5.71
16:15	0.00	7.70	365.84	0.3443	0.6296	345.04	-5.71
16:30	0.00	7.77	362.31	0.3410	0.6292	345.03	-5.71
16:45	0.00	7.85	358.27	0.3372	0.6288	345.01	-5.71
17:00	0.00	7.93	354.32	0.3334	0.6285	345.00	-5.71
17:15	0.00	8.00	350.44	0.3298	0.6281	344.99	-5.71
17:30	0.00	8.08	346.63	0.3262	0.6277	344.98	-5.71
17:45	0.00	8.16	342.90	0.3227	0.6274	344.97	-5.71
18:00	0.00	8.24	339.24	0.3193	0.6270	344.96	-5.71
18:15	0.00	8.31	336.16	0.3164	0.6268	344.95	-5.71
18:30	0.00	8.38	332.62	0.3130	0.6264	344.94	-5.71

ตารางที่ ง.1.9 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T _w (°C)	Δr _i (mm)	Q̇ _{Load} (kW)	ṁ _{NH₃,evap} (kg/s)	ṁ _{NH₃,suct} (kg/s)	P _{NH₃,suct} (kPa)	T _{NH₃,suct} (°C)
18:45	0.00	8.46	329.14	0.3098	0.6261	344.93	-5.71
19:00	0.00	8.54	325.73	0.3065	0.6258	344.92	-5.72
19:15	0.00	8.62	322.38	0.3034	0.6255	344.91	-5.72
19:30	0.00	8.69	319.08	0.3003	0.6251	344.90	-5.72
19:45	0.00	8.77	315.84	0.2972	0.6248	344.89	-5.72
20:00	0.00	8.83	313.10	0.2947	0.6246	344.88	-5.72
20:15	0.00	8.91	309.96	0.2917	0.6243	344.87	-5.72
20:30	0.00	8.99	306.86	0.2888	0.6240	344.86	-5.72
20:45	0.00	9.06	303.82	0.2859	0.6237	344.86	-5.72
21:00	0.00	9.14	300.82	0.2831	0.6234	344.85	-5.72
21:15	0.00	9.21	297.87	0.2803	0.6231	344.84	-5.72
21:30	0.00	9.29	294.96	0.2776	0.6229	344.83	-5.72
21:45	0.00	9.35	292.50	0.2753	0.6226	344.82	-5.72
22:00	0.00	9.43	289.67	0.2726	0.6224	344.81	-5.72
22:15	0.00	9.50	286.88	0.2700	0.6221	344.81	-5.72
22:30	0.00	9.58	284.13	0.2674	0.6218	344.80	-5.72
22:45	0.00	9.65	281.42	0.2648	0.6216	344.79	-5.72
23:00	0.00	9.73	278.74	0.2623	0.6213	344.78	-5.73
23:15	0.00	9.80	276.10	0.2598	0.6211	344.78	-5.73
23:30	0.00	9.86	273.86	0.2577	0.6209	344.77	-5.73
23:45	0.00	9.94	271.29	0.2553	0.6206	344.76	-5.73
24:00	0.00	10.01	268.74	0.2529	0.6204	344.75	-5.73
24:15	0.00	10.09	266.23	0.2505	0.6202	344.75	-5.73
24:30	0.00	10.16	263.75	0.2482	0.6199	344.74	-5.73
24:45	0.00	10.23	261.30	0.2459	0.6197	344.73	-5.73

ตารางที่ ง.1.9 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
25:00	0.00	10.31	258.88	0.2436	0.6195	344.73	-5.73
25:15	0.00	10.37	256.83	0.2417	0.6193	344.72	-5.73
25:30	0.00	10.45	254.46	0.2395	0.6190	344.71	-5.73
25:45	0.00	10.52	252.11	0.2373	0.6188	344.71	-5.73
26:00	0.00	10.59	249.80	0.2351	0.6186	344.70	-5.73
26:15	0.00	10.67	247.51	0.2329	0.6184	344.69	-5.73
26:30	0.00	10.74	245.24	0.2308	0.6182	344.69	-5.73
26:45	0.00	10.81	243.00	0.2287	0.6180	344.68	-5.73
27:00	0.00	10.88	241.09	0.2269	0.6178	344.67	-5.73
27:15	0.00	10.95	238.89	0.2248	0.6176	344.67	-5.73
27:30	0.00	11.02	236.71	0.2228	0.6174	344.66	-5.73
27:45	0.00	11.10	234.56	0.2207	0.6172	344.65	-5.73
28:00	0.00	11.17	232.42	0.2187	0.6170	344.65	-5.74
28:15	0.00	11.24	230.31	0.2167	0.6168	344.64	-5.74
28:30	0.00	11.32	228.21	0.2148	0.6166	344.64	-5.74
28:45	0.00	11.39	226.13	0.2128	0.6164	344.63	-5.74
29:00	0.00	11.45	224.37	0.2111	0.6162	344.62	-5.74
29:15	0.00	11.53	222.32	0.2092	0.6160	344.62	-5.74
29:30	0.00	11.60	220.30	0.2073	0.6158	344.61	-5.74
29:45	0.00	11.67	218.29	0.2054	0.6156	344.61	-5.74
30:00	0.00	11.75	216.29	0.2036	0.6154	344.60	-5.74
30:15	0.00	11.81	214.60	0.2020	0.6153	344.60	-5.74
30:30	0.00	11.90	212.36	0.1998	0.6151	344.59	-5.74
30:45	0.00	11.96	210.69	0.1983	0.6149	344.58	-5.74
31:00	0.00	12.03	208.75	0.1965	0.6147	344.58	-5.74

ตารางที่ ง.1.9 ผลลัพธ์จากการจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็น กรณีศึกษาเครื่องทำน้ำแข็ง
 หลอดกำลังการผลิต 100 ตัน/วัน รอบการผลิตที่ 2 (ต่อ)

t (m:s)	T_w (°C)	Δr_i (mm)	\dot{Q}_{Load} (kW)	$\dot{m}_{NH_3, evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{NH_3, suct}$ (kg/s)	$P_{NH_3, suct}$ (kPa)	$T_{NH_3, suct}$ (°C)
31:15	0.00	12.11	206.83	0.1946	0.6146	344.57	-5.74
31:30	0.00	12.18	204.92	0.1928	0.6144	344.57	-5.74
31:45	0.00	12.26	203.03	0.1911	0.6142	344.56	-5.74
32:00	0.00	12.33	201.14	0.1893	0.6140	344.56	-5.74
32:15	0.00	12.41	199.27	0.1875	0.6138	344.55	-5.74
32:30	0.00	12.47	197.68	0.1860	0.6137	344.55	-5.74
32:45	0.00	12.55	195.83	0.1843	0.6135	344.54	-5.74
33:00	0.00	12.62	193.99	0.1826	0.6133	344.54	-5.74
33:15	0.00	12.70	192.16	0.1808	0.6132	344.53	-5.74
33:30	0.00	12.77	190.35	0.1791	0.6130	344.53	-5.74
33:45	0.00	12.85	188.54	0.1774	0.6128	344.52	-5.74
33:55	0.00	12.89	187.51	0.1765	0.6127	344.52	-5.74





ภาคผนวก จ

การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด
สำหรับกรณีศึกษา

จ.1 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำแข็งหลอด

ตารางที่ จ.1.1 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดในกรณีศึกษา

เครื่องทำน้ำแข็งหลอด	กำลังการผลิต (ตันต่อวัน)		
	50	80	100
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า (kW)	160	200	270
ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นรอบการผลิตที่ 1 (min:sec)	34:35	34:37	34:53

จ.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดในกรณีศึกษา

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการทำความเย็น 1 รอบการผลิต ของเครื่องทำน้ำแข็งหลอดกำลังการผลิต 100 ตันต่อวัน ที่มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 270 กิโลวัตต์ตลอดระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นที่ 34 นาที 53 วินาที พร้อมทั้งมีอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าแบบ TOU ในช่วง Off-Peak คือ 2.6295 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง

พิจารณาระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น ให้อยู่ในหน่วยชั่วโมง จากสมการ (จ-1) ได้ดังนี้

$$t = \min\left(\frac{1}{60}\right) + \sec\left(\frac{1}{3600}\right) \quad (\text{จ-26})$$

แทนค่าระยะเวลา 34 นาที 53 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลากระบวนการทำความเย็น 1 รอบการผลิต ลงในสมการ (จ-1) และคำนวณระยะเวลาในหน่วยชั่วโมงได้ดังนี้

$$t = 34\left(\frac{1}{60}\right) + 53\left(\frac{1}{3600}\right) = 0.5814 \text{ h.}$$

จากนั้นพิจารณากิโลวัตต์ชั่วโมงของกระบวนการทำความเย็น จากสมการ (จ-2) ดังนี้

$$\text{kWh} = P_e \times t \quad (\text{จ-2})$$

โดยที่ kWh แทน กิโลวัตต์ชั่วโมงหรือหน่วยพลังงานไฟฟ้า (kWh)
 P_e แทน อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ (kW)
 t แทน ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น (h)

แทนค่าอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าและระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็นลงในสมการ (จ-2) ได้ดังนี้

$$\text{kWh} = 270 \times 0.5814 = 156.978$$

จากนั้นพิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้า จากสมการที่ (จ-3) ดังนี้

$$B = (\text{kWh}) \times (\text{REEC}) \quad (\text{จ-3})$$

โดยที่ B แทน ค่าพลังงานไฟฟ้า (Bath)
 REEC แทน ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (Rate of Electrical Energy Cost, Bath/kWh)

แทนค่ากิโลวัตต์ชั่วโมงและค่าพลังงานไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงลงในสมการ (จ-3) ได้ดังนี้

$$B = 156.978 \times 2.6295 = 412.77 \text{ Bath}$$

ดังนั้น ค่าพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการทำความเย็น 1 รอบการผลิต ของเครื่องทำน้ำแข็ง หลอดกำลังการผลิต 100 ตันต่อวัน คือ 412.77 บาท



ภาคผนวก ฉ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ฉ.1 การจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็ง หลอดด้วยโปรแกรม MATLAB

การจำลองระบบของกระบวนการทำความเย็นด้วยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง (Successive Substituting) โดยใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับการคำนวณและแก้ระบบสมการ ซึ่งจะทำการนำเข้าข้อมูลค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขตสำหรับการคำนวณสคริปต์ file ได้แก่ อุณหภูมิน้ำป้อน สภาวะสารทำความเย็นเริ่มต้น ขนาดมิติหอทำน้ำแข็งหลอด ข้อมูลเครื่องอัดไอ หลังจากนั้นนำเข้าข้อมูลดังกล่าวแล้ว ทำการคำนวณช่วงการลดอุณหภูมิน้ำเพื่อหาภาระการทำความเย็นและอุณหภูมิน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งเข้าสู่ 0 องศาเซลเซียส ต่อจากนั้นจึงเข้าสู่การคำนวณช่วงการก่อกวนของน้ำแข็งหลอดเพื่อหาภาระการทำความเย็นและความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดตลอดกระบวนการภายใต้ความหนาแน่นน้ำแข็งหลอดที่ต้องการผลิต พร้อมทั้งคำนวณความดันและอุณหภูมิสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการทำความเย็นดังกล่าว โดยการคำนวณเพื่อแก้ระบบสมการด้วยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง แสดงได้ดังนี้

```

clc
clear
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%- Tube Ice Making Machine for Freezing Process -%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%=====Dimension of Freezer Tower=====
%-----Tube-----
L_Tube = 4 ; %ความยาวหอทำน้ำแข็งหลอด (m)
L_Ice = 3.2 ; %ความยาวของน้ำแข็งหลอดที่เกิดขึ้นในหอทำน้ำแข็งหลอด (m)
OD_Tube = 0.041 ; %เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อทำน้ำแข็งหลอด (m)
ID_Tube = 0.038 ; %เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทำน้ำแข็งหลอด (m)
OR_Tube = OD_Tube/2 ; รัศมีภายนอกของท่อทำน้ำแข็งหลอด (m)
IR_Tube = ID_Tube/2 ; รัศมีภายในของท่อทำน้ำแข็งหลอด (m)
Num_Tube = 1013 ; %จำนวนหอทำน้ำแข็งหลอดทุกหอในหอทำน้ำแข็งหลอด
k_Tube = 15.09 ; %ค่าการนำความร้อนของท่อทำน้ำแข็งหลอด (W/mK)
Num_Discrete_Tube = 30 ; %จำนวนท่อส่วนย่อยที่ถูกระเบิดในหอ 1 หอ
L_Discrete_Tube = L_Ice/Num_Discrete_Tube ; %ความยาวท่อส่วนย่อย (m)
%-----Shell-----
L_Shell = 4 ; %ความสูงของหอบรรจุสารทำความเย็น (m)
L_NH3 = 3.2 ; %ความสูงของระดับสารทำความเย็นเหลว (m)
OD_Shell = 1.81 ; %เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหอบรรจุสารทำความเย็น (m)
ID_Shell = 1.71 ; %เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหอบรรจุสารทำความเย็น (m)
OR_Shell = OD_Shell/2 ; รัศมีภายนอกของหอบรรจุสารทำความเย็น (m)
IR_Shell = ID_Shell/2 ; รัศมีภายในของหอบรรจุสารทำความเย็น (m)
%-----Accumulator-----
L_Accumulator = 3.35 ; %ความยาวของแอดคิวมูเลเตอร์ (m)
ID_Accumulator = 1.25 ; %เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแอดคิวมูเลเตอร์ (m)
IR_Accumulator = ID_Accumulator/2 ; รัศมีภายในของแอดคิวมูเลเตอร์
%-----Upper Water Tray-----
L_Tray = 0.38 ; %ความสูงของถาดน้ำด้านบน (m)
L_Water_in_Tray = 0.15 ; %ความสูงของระดับน้ำที่ถาดน้ำ (m)
ID_Tray = 1.8 ; %เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถาด (m)
IR_Tray = ID_Tray/2 ; รัศมีภายในของถาด (m)

```

```

%-----Lower water Tank-----
L_Tank = 1.95 ; %ความสูงของถังน้ำเย็นด้านล่าง (m)
L_Water_in_Tank = 0.9; %ความสูงของระดับน้ำในถังน้ำ (m)
ID_Tank = 2 ; %เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังน้ำเย็นด้านล่าง (m)
IR_Tank = ID_Tank/2; %รัศมีภายในของถังน้ำเย็นด้านล่าง (m)
%-----Water Circulation Tube-----
L_Circulation_Tube = 8 ; %ความยาวของท่อเวียนน้ำโดยตรง (m)
L_Fitting = 0 ; %ความยาวเทียบเท่าของข้อต่อ (m)
ID_Circulation_Tube = 0.128; %เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเวียนน้ำ (m)
OD_Circulation_Tube = 0.138; %เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเวียนน้ำ (m)
IR_Circulation_Tube = ID_Circulation_Tube/2; %รัศมีภายในของท่อเวียนน้ำ (m)
OR_Circulation_Tube = OD_Circulation_Tube/2; %รัศมีภายนอกของท่อเวียนน้ำ (m)
%-----Compressor-----
SFR_Comp = 1592/3600; %อัตราการดูดสารทำความเย็น (m3/s)
Suct_Temp_Comp = -10 ; %อุณหภูมิดันดูดของเครื่องอัดไอ (kPa)
Disc_Temp_Comp = 35 ; %อุณหภูมิดันจ่ายของเครื่องอัดไอ (kPa)

%=====Water in Freezer Tower=====
T_Water_Feed = 10+273.15; %Water Feed Temperature(K)
Volume_Water = (pi*(IR_Tube^2)*L_Tube*Num_Tube)+(pi*(IR_Tray^2)*L_Water_in_Tray)+(pi*(IR_Tank^2)*L_Water_in_Tank)+(pi*(IR_Circulation_Tube^2)*(L_Circulation_Tube+L_Fitting));%Volume_Water_in_Freezer
Volume_Water_Tube = Volume_Water / Num_Tube; %Volume_Water_Tube
P_Ambient = 101325; %Ambient Pressure

%=====Liquid Amonia in Freezer Tower=====
P_Sat_NH3 = 318.9 ; % (kPa)
T_Sat_NH3 = (PropsSI('T', 'P', P_Sat_NH3*1000, 'Q', 0, 'ammonia')); % (K)
T_Sat_NH3_Cond = 40+273.15; % (K)
hf_NH3_Cond_ASHRAE = (PropsSI('H', 'T', T_Sat_NH3_Cond, 'Q', 0, 'ammonia'))/1000; % (kJ/kg)
P_Sat_NH3_Cond = (PropsSI('P', 'T', T_Sat_NH3_Cond, 'Q', 0, 'ammonia'))/1000; % (kPa)
Surface_Tension_ASHRAE = PropsSI('I', 'T', T_Sat_NH3, 'Q', 0, 'ammonia'); % (N/m)
pf_NH3_ASHRAE = PropsSI('D', 'T', T_Sat_NH3, 'Q', 0, 'ammonia'); % (kg/m3)
pg_NH3_ASHRAE = PropsSI('D', 'T', T_Sat_NH3, 'Q', 1, 'ammonia'); % (kg/m3)
hf_NH3_ASHRAE = (PropsSI('H', 'T', T_Sat_NH3, 'Q', 0, 'ammonia'))/1000; % (kJ/kg)
hg_NH3_ASHRAE = (PropsSI('H', 'T', T_Sat_NH3, 'Q', 1, 'ammonia'))/1000; % (kJ/kg)
hfg_NH3_ASHRAE = hg_NH3_ASHRAE - hf_NH3_ASHRAE; % (kJ/kg)
dv_NH3_ASHRAE = PropsSI('V', 'T', T_Sat_NH3, 'Q', 0, 'ammonia'); % (Pa*s)
kv_NH3_ASHRAE = dv_NH3_ASHRAE / pf_NH3_ASHRAE; % (m2/s)
kf_NH3_ASHRAE = PropsSI('L', 'T', T_Sat_NH3, 'Q', 0, 'ammonia'); % (W/m*K)
%Diamiter of Bubble
Di_Bubble = 0.0146*35*((2*Surface_Tension_ASHRAE)/(9.81*(pf_NH3_ASHRAE-pg_NH3_ASHRAE)))^(1/2);
%Coefficient to Pool Boiling
AA = ((pg_NH3_ASHRAE/pf_NH3_ASHRAE)^(0.5))^(0.67);
BB = (((hg_NH3_ASHRAE-hf_NH3_ASHRAE)*1000*(Di_Bubble^2))/(kv_NH3_ASHRAE^2))^(0.248);
CC = ((pf_NH3_ASHRAE-pg_NH3_ASHRAE)/(pf_NH3_ASHRAE))^(-4.33);

```

```

DD = 0.0546*AA*BB*CC;
C = (DD*(kf_NH3_ASHRAE/Di_Bubble)*(Di_Bubble/kf_NH3_ASHRAE)^(0.67))^(1/0.33);
Cs = C/((T_Sat_NH3)^(2.0303));

%=====Initial Condition=====
%-----Initial Condition NH3 in Suction Line -----
x_NH3_Suction = 1 ;
P_NH3_Suction = 380 ; %(kPa)
T_NH3_Suction = (PropsSI('T', 'P', P_NH3_Suction*1000, 'Q', x_NH3_Suction,
'ammonia')) ; %(K)
Volume_NH3_Suction = (((L_Shell-L_Ice)*pi*(IR_Shell^2))-(Num_Tube*(L_Shell-L_Ice)*pi*(
(OR_Tube^2)))+(L_Accumulator*pi*(IR_Accumulator^2)) ;
pf_NH3_Suction = (PropsSI('D', 'T', T_NH3_Suction, 'Q', 0, 'ammonia')) ; %(m3/kg)
pg_NH3_Suction = (PropsSI('D', 'T', T_NH3_Suction, 'Q', 1, 'ammonia')) ; %(m3/kg)
uf_NH3_Suction = (PropsSI('U', 'T', T_NH3_Suction, 'Q', 0, 'ammonia'))/1000 ; %
(kJ/kg)
ug_NH3_Suction = (PropsSI('U', 'T', T_NH3_Suction, 'Q', 1, 'ammonia'))/1000 ; %
(kJ/kg)
hf_NH3_Suction = (PropsSI('H', 'T', T_NH3_Suction, 'Q', 0, 'ammonia'))/1000 ; %
(kJ/kg)
hg_NH3_Suction = (PropsSI('H', 'T', T_NH3_Suction, 'Q', 1, 'ammonia'))/1000 ; %
(kJ/kg)
vf_NH3_Suction = 1/pf_NH3_Suction ;
vg_NH3_Suction = 1/pg_NH3_Suction ;
p_NH3_Suction = pf_NH3_Suction + (x_NH3_Suction*(pg_NH3_Suction-pf_NH3_Suction)) ;
v_NH3_Suction = vf_NH3_Suction + (x_NH3_Suction*(vg_NH3_Suction-vf_NH3_Suction)) ;
u_NH3_Suction = uf_NH3_Suction + (x_NH3_Suction*(ug_NH3_Suction-uf_NH3_Suction)) ;
h_NH3_Suction = hf_NH3_Suction + (x_NH3_Suction*(hg_NH3_Suction-hf_NH3_Suction)) ;
m_NH3_Suction = Volume_NH3_Suction/v_NH3_Suction ;
m_Evap_Tower = 0 ;
%-----Initial Condition of Ice Making -----
T_Chill_Water_Tower = 273.153;
dr_Ice = 0 ;
dr_Ice_Tower = 0;
dr_Ice_Tower_dt = 0;
IR_Ice_Tower = IR_Tube ;
m_Ice_Total_dt = 0;
m_Ice_Total = 0;
Num_Iteration = 0;
Total_dt = 0;
uf_Chill_Water = (PropsSI('U', 'T', T_Chill_Water_Tower, 'P', P_Ambient, 'water'))
/1000;
hf_Chill_Water = (PropsSI('H', 'T', T_Chill_Water_Tower, 'P', P_Ambient, 'water'))
/1000;
pf_Chill_Water = PropsSI('D', 'T', T_Chill_Water_Tower, 'P', P_Ambient, 'water');
pi_Ice = 910; %(kg/m3)
ui_Ice = -333.42; %(kJ/kg)
ki_Ice = 1.91 ; %(W/mK)
dr_Ice_Final = 0.01288; %(mm)

```

```

%-----Initial Condition of Water -----
T_Water_Tower = T_Water_Feed; %(K)
Num_Iteration_Tower = 0;
Num_iteration_Pressure = 1;
Total_dt_Water = 0;
m_Water_Tube_in = Volume_Water_Tube*pf_Chill_Water;
Total_Cooling_Load = 0 ;
m_Evap_Rate_Tower = 0 ;
m_Suction_Rate = 0 ;

%-----Array of Variable-----
k=1;
time(k) = 0; %(s)
T_Water_Tower_array(k) = T_Water_Feed ; %(K)
dr_Ice_Tower_array(k) = dr_Ice ; %(m)
Cooling_Load_array(k) = Total_Cooling_Load ; %(kW)
m_Evap_Rate_Tower_array(k) = m_Evap_Rate_Tower ; %(kg/s)
m_NH3_Suction_Rate_array(k) = m_Suction_Rate ; %(kg/s)
P_NH3_suction_array(k) = P_NH3_Suction ; %(kPa)
T_NH3_suction_array(k) = T_NH3_Suction ; %(K)
X_NH3_suction_array(k) = x_NH3_Suction ;
m_NH3_Evaporate_array(k) = m_Evap_Tower ; %(kg)
m_NH3_Suction_array(k) = m_NH3_Suction ; %(kg)
h_NH3_Suction_array(k) = h_NH3_Suction ; %(kJ/kg)
u_NH3_Suction_array(k) = u_NH3_Suction ; %(kJ/kg)
v_NH3_Suction_array(k) = v_NH3_Suction ; %(kJ/kg)

%=====Refrigeration Process=====
Condition_Tower = true;
while (Condition_Tower)
    dt = 5; %Assume dt
    %Assume NH3 in Suction Line
    x_NH3_Suction_dt = 1 ;
    T_NH3_Suction_dt = 273.15 - 5 ;
    P_NH3_Suction_dt = (PropsSI('P', 'T', T_NH3_Suction_dt, 'Q', x_NH3_Suction_dt,
'ammonia'))/1000 ;
    u_NH3_Suction_dt = (PropsSI('U', 'T', T_NH3_Suction_dt, 'Q', x_NH3_Suction_dt,
'ammonia'))/1000 ;
    %Successive Process
    Successive = true ;
    while (Successive)
        if T_Water_Tower >= 273.2
            %-----Water Temperature Decreasing Process-----
            for i = 1:Num_Discrete_Tube
                if i == 1
                    T_Water_in(i) = T_Water_Tower; %(K)
                    Water_Vel_in(i) = ((2*9.81*(L_Water_in_Tray+(L_Tube-L_Ice)))/
(1.5))^(1/2); %(m/s)
                    Water_Vel_out(i) = Water_Velocity_Out(Water_Vel_in(i),

```

```

L_Discrete_Tube); % (m/s)
    KP(i) = Specific_KE_PE(Water_Vel_in(i),Water_Vel_out(i),
L_Discrete_Tube); % (kJ/kg)
    [T_Water_out(i),Q_Load(i),Cooling_Load(i),pf_Water(i),cp_Water
(i)] = Water_Tube_Element(T_Water_in(i),KP(i),ID_Tube,OD_Tube,IR_Tube,OR_Tube,
Num_Tube,L_Discrete_Tube,Volume_Water_Tube,Volume_Water,k_Tube,T_Sat_NH3,P_Ambient,
Water_Vel_in(i),Water_Vel_out(i),Cs,dt);
    else
        T_Water_in(i) = T_Water_out(i-1); % (K)
        Water_Vel_in(i) = Water_Vel_in(i-1); % (m/s)
        Water_Vel_out(i) = Water_Velocity_Out(Water_Vel_in(i),
L_Discrete_Tube); % (m/s)
        KP(i) = Specific_KE_PE(Water_Vel_in(i),Water_Vel_out(i),
L_Discrete_Tube); % (kJ/kg)
        [T_Water_out(i),Q_Load(i),Cooling_Load(i),pf_Water(i),cp_Water
(i)] = Water_Tube_Element(T_Water_in(i),KP(i),ID_Tube,OD_Tube,IR_Tube,OR_Tube,
Num_Tube,L_Discrete_Tube,Volume_Water_Tube,Volume_Water,k_Tube,T_Sat_NH3,P_Ambient,
Water_Vel_in(i),Water_Vel_out(i),Cs,dt);
        end
        if T_Water_out <= 273.2 %หากอุณหภูมิน้ำเท่ากับ 0 องศาเซลเซียส
            break %สิ้นสุดช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ
        end
    end
    Total_Q = sum(Q_Load); % (kJ)
    Total_Cooling_Load = sum(Cooling_Load); % (kW)
    T_Water_Tower_dt = T_Water_Tower - ((Total_Q)/(Volume_Water*pf_Water(1)
*cp_Water(1))); Water % (K)
    dt_New = ((Volume_Water*pf_Water(1)*cp_Water(1)*(T_Water_Tower-
T_Water_Tower_dt))/(Num_Tube*pi*(IR_Tube^2)*Water_Vel_in(1)*pf_Water(1)*cp_Water(1)*
(T_Water_in(1)-T_Water_out(Num_Discrete_Tube))));
    else
        %-----Tube Ice Making Process-----
        T_Water_Tower_dt = T_Chill_Water_Tower ; % (K)
        for i = 1:Num_Discrete_Tube
            [m_Ice(i),Q_Load(i),Cooling_Load(i)]=Ice_Tube_Element(KP(i),
Water_Vel_out(i),IR_Tube,OR_Tube,Num_Tube,L_Discrete_Tube,dr_Ice_Tower,
m_Water_Tube_in,k_Tube,ki_Ice,T_Sat_NH3,T_Chill_Water_Tower,uf_Chill_Water,ui_Ice,Cs,
dt);
        end
        m_Ice_Total = sum(m_Ice)* Num_Tube; % (kg)
        Total_Q = sum(Q_Load)* Num_Tube; % (kJ)
        Total_Cooling_Load = sum(Cooling_Load) * Num_Tube; % (kW)
        dr_Ice_Tower_dt = IR_Ice_Tower - (((IR_Ice_Tower^2)-
((m_Ice_Total/Num_Tube)/(pi_Ice * pi * L_Ice)))^(1/2)); % (m)
        dt_New = ((m_Ice_Total / Num_Tube)*uf_Chill_Water)/(hf_Chill_Water*
((pf_Chill_Water*Water_Vel_in(1)*pi*((IR_Ice_Tower-(dr_Ice_Tower_dt/2))^2))-
(pf_Chill_Water*Water_Vel_in(1)*pi*(IR_Ice_Tower^2))));
    end
end

```

```

%-----NH3 SYSTEM-----
[P_NH3_Suction_dt_New,T_NH3_Suction_dt_New,x_NH3_Suction_dt_New,
h_NH3_Suction_dt_New,Error_dt,Error_P_NH3_Suction,Error_T_NH3_Suction,
m_Evap_Rate_Tower,m_Suction_Rate,m_Evap_Tower]=NH3_System(Total_Q,Total_Cooling_Load,
T_Sat_NH3,T_Sat_NH3_Cond,dt_New,dt,Volume_NH3_Suction,SFR_Comp,m_NH3_Suction,
u_NH3_Suction,u_NH3_Suction_dt,P_NH3_Suction_dt,T_NH3_Suction_dt);
%-----Check Function Error-----
if Error_dt <= 5e-3 && Error_P_NH3_Suction <= 5e-3 && Error_T_NH3_Suction <=
5e-3

    dt_Water = dt_New ;
    P_NH3_Suction = P_NH3_Suction_dt_New ;
    T_NH3_Suction = T_NH3_Suction_dt_New ;
    x_NH3_Suction = x_NH3_Suction_dt_New ;
    h_NH3_Suction = h_NH3_Suction_dt_New ;
    if x_NH3_Suction > 1
        p_NH3_Suction = (PropsSI('D', 'H', h_NH3_Suction*1000, 'P',
P_NH3_Suction*1000, 'ammonia')); %(m3/kg)
        v_NH3_Suction = 1/p_NH3_Suction ;
        u_NH3_Suction = (PropsSI('U', 'H', h_NH3_Suction*1000, 'P',
P_NH3_Suction*1000, 'ammonia'))/1000; %(kJ/kg)
        m_NH3_Suction = Volume_NH3_Suction/v_NH3_Suction ;
    elseif x_NH3_Suction >= 0 && x_NH3_Suction <= 1
        p_NH3_Suction = (PropsSI('D', 'P', P_NH3_Suction*1000, 'Q', 1,
'ammonia')); %(m3/kg)
        v_NH3_Suction = 1/p_NH3_Suction ;
        u_NH3_Suction = (PropsSI('U', 'P', P_NH3_Suction*1000, 'Q', 1,
'ammonia'))/1000; %(kJ/kg)
        m_NH3_Suction = Volume_NH3_Suction/v_NH3_Suction ;
    end
    Successive = false ;
else
    dt = dt_New ;
    P_NH3_Suction_dt = P_NH3_Suction_dt_New ;
    T_NH3_Suction_dt = T_NH3_Suction_dt_New ;
    x_NH3_Suction_dt = x_NH3_Suction_dt_New ;
    h_NH3_Suction_dt = h_NH3_Suction_dt_New ;
    Num_Iteration = Num_Iteration + 1;
    if x_NH3_Suction_dt > 1 %Superheated
        %-----NH3 in Suction Line-----
        p_NH3_Suction_dt = (PropsSI('D', 'H', h_NH3_Suction_dt*1000, 'P',
P_NH3_Suction_dt*1000, 'ammonia')); %(m3/kg)
        v_NH3_Suction_dt = 1/p_NH3_Suction_dt ;
        u_NH3_Suction_dt = (PropsSI('U', 'H', h_NH3_Suction_dt*1000, 'P',
P_NH3_Suction_dt*1000, 'ammonia'))/1000; %(kJ/kg)
    elseif x_NH3_Suction_dt >= 0 && x_NH3_Suction_dt <= 1 %Saturated
        %-----NH3 in Suction Line-----
        pf_NH3_Suction_dt = (PropsSI('D', 'P', P_NH3_Suction_dt*1000, 'Q', 0,
'ammonia')); %(m3/kg)
        pg_NH3_Suction_dt = (PropsSI('D', 'P', P_NH3_Suction_dt*1000, 'Q', 1,

```

```

'ammonia')); %(m3/kg)
    vf_NH3_Suction_dt = 1/pf_NH3_Suction_dt ;
    vg_NH3_Suction_dt = 1/pg_NH3_Suction_dt ;
    uf_NH3_Suction_dt = (PropsSI('U', 'P', P_NH3_Suction_dt*1000, 'Q', 0,
'ammonia'))/1000; %(kJ/kg)
    ug_NH3_Suction_dt = (PropsSI('U', 'P', P_NH3_Suction_dt*1000, 'Q', 1,
'ammonia'))/1000; %(kJ/kg)
    p_NH3_Suction_dt = pf_NH3_Suction_dt + (x_NH3_Suction_dt*
(pg_NH3_Suction_dt-pf_NH3_Suction_dt));
    v_NH3_Suction_dt = vf_NH3_Suction_dt + (x_NH3_Suction_dt*
(vg_NH3_Suction_dt-vf_NH3_Suction_dt));
    u_NH3_Suction_dt = uf_NH3_Suction_dt + (x_NH3_Suction_dt*
(ug_NH3_Suction_dt-uf_NH3_Suction_dt));
    end
end
end
if dr_Ice_Tower >= dr_Ice_Final
    Condition_Tower = false;
else
    %-----Updated Data for next time step-----
    k=k+1;
    Total_dt = Total_dt + dt_New ;
    T_Water_Tower = T_Water_Tower_dt ; %(K)
    dr_Ice_Tower = dr_Ice_Tower + dr_Ice_Tower_dt ; %(m)
    IR_Ice_Tower = IR_Ice_Tower - (dr_Ice_Tower_dt); %(m)
    Ice_Thickness = dr_Ice_Tower*1000; %(mm)
    m_Ice_Total_dt = m_Ice_Total_dt + m_Ice_Total; %(kg)
    m_Water_Tube_in = m_Water_Tube_in - (m_Ice_Total / Num_Tube);%(kg)
    Pressure_NH3_Suction = P_NH3_Suction ; %(kPa)
    Temperature_NH3_Suction = T_NH3_Suction ; %(K)
    Quality_NH3_Suction = x_NH3_Suction ;
    m_NH3_Evaporate = m_Evap_Tower ; %(kg)
    m_NH3_Suction = ((dt_New*SFR_Comp)/(v_NH3_Suction)); %(kg/s)
    time(k)=time(k-1)+dt_New; %ระยะเวลาของกระบวนการทำความเย็น (s)
    T_Water_Tower_array(k) = T_Water_Tower_dt ; %(K)
    dr_Ice_Tower_array(k) = dr_Ice_Tower; %(m)
    Cooling_Load_array(k-1) = Total_Cooling_Load ; %(kW)
    m_Evap_Rate_Tower_array(k-1) = m_Evap_Rate_Tower ; %(kg/s)
    P_NH3_suction_array(k) = P_NH3_Suction ; %(kPa)
    T_NH3_suction_array(k) = T_NH3_Suction ; %(K)
    X_NH3_suction_array(k) = x_NH3_Suction ;
    m_NH3_Evaporate_array(k) = m_Evap_Tower ; %(kg)
    m_NH3_Suction_array(k) = m_NH3_Suction ; %(kg)
    m_NH3_Suction_Rate_array(k-1) = m_Suction_Rate ; %(kg/s)
    h_NH3_Suction_array(k) = h_NH3_Suction ; %(kJ/kg)
    u_NH3_Suction_array(k) = u_NH3_Suction ; %(kJ/kg)
    v_NH3_Suction_array(k) = v_NH3_Suction ; %(m3/kg)
end
end
end

```

ในช่วงการลดอุณหภูมิน้ำ ได้สร้าง Function file ในการคำนวณเพื่อหาภาระการทำควมเย็น อุณหภูมิน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป แสดงได้ดังนี้

```
function[T_Water_out,Q_Load,Cooling_Load,pf_Water,cp_Water]=Water_Tube_Element %
(T_Water_in,KP,ID_Tube,OD_Tube,IR_Tube,OR_Tube,Num_Tube,L_Discrete_Tube, %
Volume_Water_Tube,Volume_Water,k_Tube,T_Sat_NH3,P_Ambient,Water_Vel_in,Water_Vel_out, %
Cs,dt)
    if T_Water_in >= 273.153
        k_Water = PropsSI('L', 'T', T_Water_in, 'P', P_Ambient, 'water');
        pf_Water = PropsSI('D', 'T', T_Water_in, 'P', P_Ambient, 'water');
        dv_Water = PropsSI('V', 'T', T_Water_in, 'P', P_Ambient, 'water');
        cp_Water = (PropsSI('C', 'T', T_Water_in, 'P', P_Ambient, 'water'))/1000;
        pr_Water = (cp_Water.*dv_Water)/k_Water;
        cvhc_Water = ((0.023*k_Water*(pr_Water.^0.3))/(ID_Tube)).* %
        (((pf_Water*ID_Tube)./(dv_Water)).*(Water_Vel_in + Water_Vel_out/2)).^0.8); %
        Convective Heat Transfer Coefficient of Water (W)
        %coefficient for Pool Boiling Heat Transfer Coefficient of NH3
        C1_Water = (1./(cvhc_Water.*IR_Tube))+((1./k_Tube).*(log(OR_Tube./IR_Tube)));
        EE_Water = 1./(OR_Tube.*Cs.*C1_Water);
        FF_Water = (T_Water_in-T_Sat_NH3).*(EE_Water);
        %Newton Raphson
        dT_Old = 10; %Assume dT_1 = 10
        Condition = true;
        Num_Iteration = 0;
        while (Condition)
            dT_New = dT_Old -(((dT_Old.^3.0303)+(dT_Old.*EE_Water)-(FF_Water))/ %
            ((3.0303.*(dT_Old.^2.0303))+EE_Water));
            Error = abs((dT_New-dT_Old)./(dT_Old)).*100;
            if Error <= 5e-3 || Num_Iteration >= 100
                dT = dT_New;
                Condition = false;
            else
                dT_Old = dT_New;
                Num_Iteration = Num_Iteration + 1;
            end
        end
        pbhc_NH3 = Cs*(dT)^(2.0303); %pool boiling heat transfer coefficient (W)
        Total_Thermal_Resistance = (1./(cvhc_Water.*L_Discrete_Tube.*2.*pi.*IR_Tube)) %
        +((log(OD_Tube./ID_Tube))./(2.*pi.*L_Discrete_Tube.*k_Tube))+ (1./ (pbhc_NH3. %
        *L_Discrete_Tube.*2.*pi.*OR_Tube)); % (K/W)
        Uda_Water = (1./Total_Thermal_Resistance)./1000; %Overall heat transfer %
        coefficient (kW/K)
        T_Water_out = 273.15 + (1./((Uda_Water./2)+(Volume_Water_Tube.*pf_Water. %
        *cp_Water)./(dt))).*(Uda_Water.*((T_Sat_NH3-273.15)-((T_Water_in-273.15)./2)))+ %
        ((Volume_Water_Tube.*pf_Water)./(dt)).*(cp_Water.*(T_Water_in-273.15))+KP)); %
        Water Temperature Out (K)
        Q_Load = (Volume_Water.*pf_Water).*(cp_Water.*(T_Water_in-T_Water_out))+ %
        KP); %Heat Reject from Water (kJ)
        Cooling_Load = Uda_Water.*((T_Water_in+ T_Water_out)/2)-T_Sat_NH3). %
        *Num_Tube; %Cooling Load from Water (kW)
    end
end
```

ในช่วงการก่อตัวของน้ำแข็งหลอด ได้สร้าง Function file ในการคำนวณเพื่อหาภาระการทำความเย็น มวลน้ำแข็งหลอดที่ก่อตัวภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด ทำให้ทราบถึงความหนาของน้ำแข็งหลอด แสดงได้ดังนี้

```
function [m_Ice, Q_Load_Ice, Cooling_Load_Ice]=Ice_Tube_Element (KP, Water_Vel_out,
IR_Tube, OR_Tube, Num_Tube, L_Discrete_Tube, dr_Ice_Tower, m_Water_Tube_in, k_Tube, ki_Ice,
T_Sat_NH3, T_Chill_Water_Tower, uf_Chill_Water, ui_Ice, Cs, dt)

dr_Ice = dr_Ice_Tower; %(m)
IR_Ice = IR_Tube - (dr_Ice); %(m)
%Coefficient for Pool Boiling Heat Transfer Coefficient of NH3 (W)
Cl_Ice = ((1/ki_Ice) * (log(IR_Tube/IR_Ice))) + ((1/k_Tube) * (log(OR_Tube/IR_Tube)));
EE_Ice = 1/(OR_Tube*Cs*Cl_Ice);
FF_Ice = (T_Chill_Water_Tower-T_Sat_NH3) * (EE_Ice);
%Newton Raphson to Pool Boiling Heat Transfer Coefficient of NH3 (W)
dT_Old = 5; %Assume dT_5 = 5
Condition = true;
Num_Iteration = 0;
while (Condition)
    dT_New = dT_Old - (((dT_Old^3.0303)+(dT_Old*EE_Ice)-(FF_Ice))/((3.0303*
(dT_Old^2.0303))+ (EE_Ice)));
    Error = abs((dT_New-dT_Old)/(dT_Old))*100;
    if Error <= 5e-3 || Num_Iteration >= 100
        dT = dT_New;
        Condition = false;
    else
        dT_Old = dT_New;
        Num_Iteration = Num_Iteration + 1;
    end
end
pbhc_NH3_Ice = Cs*((dT)^(2.0303)); %pool boiling heat transfer coefficient of NH3
(W)
Total_Thermal_Resistance_Ice = ((log(IR_Tube/IR_Ice))/(
(2*pi*L_Discrete_Tube*ki_Ice)))+(log(OR_Tube/IR_Tube)/(2*pi*L_Discrete_Tube*k_Tube))
+ (1/(pbhc_NH3_Ice*L_Discrete_Tube*2*pi*OR_Tube));
UdA_Ice = (1/Total_Thermal_Resistance_Ice)/1000; %(kW)
m_Ice = ((UdA_Ice*dt*(T_Chill_Water_Tower-T_Sat_NH3)) - (m_Water_Tube_in*KP))/
((uf_Chill_Water - ui_Ice)+((Water_Vel_out^2)/2000)); %Ice mass Making in Element
Q_Load_Ice = (m_Ice*(uf_Chill_Water - ui_Ice + (((Water_Vel_out^2)/2000)))+
(m_Water_Tube_in*KP)); %Heat Reject in Tube (kJ)
Cooling_Load_Ice = UdA_Ice*(T_Chill_Water_Tower-T_Sat_NH3); %Cooling Load from
Ice (kW)

end
```

ในขณะที่เดียวกันตลอดกระบวนการทำความเย็น ได้สร้าง Function file ของแบบจำลองหอทำน้ำแข็งหลอดด้านสารทำความเย็นเพื่อหาความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็นด้านดูดของเครื่องอัดไอ แสดงได้ดังนี้

```
function[P_NH3_Suction_dt_New,T_NH3_Suction_dt_New,x_NH3_Suction_dt_New,
h_NH3_Suction_dt_New,Error_dt,Error_P_NH3_Suction,Error_T_NH3_Suction,
m_Evap_Rate_Tower,m_Suction_Rate,m_Evap_Tower]=NH3_System(Total_Q,Total_Cooling_Load,
T_Sat_NH3,T_Sat_NH3_Cond,dt_New,dt,Volume_NH3_Suction,SFR_Comp,m_NH3_Suction,
u_NH3_Suction,u_NH3_Suction_dt,P_NH3_Suction_dt,T_NH3_Suction_dt)
hf_NH3_Cond_ASHRAE = (PropsSI('H','T',T_Sat_NH3_Cond,'Q',0,'ammonia'))/1000;
% (kJ/kg)
P_Sat_NH3_Cond = (PropsSI('P','T',T_Sat_NH3_Cond,'Q',0,'ammonia'))/1000;
% (kPa)
hg_NH3_ASHRAE = (PropsSI('H','T',T_Sat_NH3,'Q',1,'ammonia'))/1000; % (kJ/kg)
m_Evap_Tower = Total_Q/(hg_NH3_ASHRAE - hf_NH3_Cond_ASHRAE); % (kg)
m_Evap_Rate_Tower = Total_Cooling_Load/(hg_NH3_ASHRAE - hf_NH3_Cond_ASHRAE); %
% (kg/s)
v_NH3_Suction_dt_New = ((Volume_NH3_Suction)+(dt_New*SFR_Comp))/((m_Evap_Tower)+
(m_NH3_Suction)); % (m3/kg)
h_NH3_Suction_dt_New = ((v_NH3_Suction_dt_New/(dt_New*SFR_Comp))*
((m_Evap_Tower*hf_NH3_Cond_ASHRAE)+(m_NH3_Suction*u_NH3_Suction))-
(1/(dt_New*SFR_Comp))*
(Volume_NH3_Suction*u_NH3_Suction_dt)); % (kJ/kg)
u_NH3_Suction_dt_New = (v_NH3_Suction_dt_New/Volume_NH3_Suction)*
((m_Evap_Tower*hf_NH3_Cond_ASHRAE)+(Total_Q)-
(dt_New*SFR_Comp*h_NH3_Suction_dt_New)/
(v_NH3_Suction_dt_New)+(m_NH3_Suction*u_NH3_Suction)); % (kJ/kg)
m_Suction_Rate = SFR_Comp / v_NH3_Suction_dt_New ; % (kg/s)
dP_Comp = (-30.82*m_Suction_Rate)+1228.9 ; % (kPa)
P_NH3_Suction_dt_New = P_Sat_NH3_Cond- dP_Comp ; % (kPa)
%-----State of NH3 in Suction Line-----
uf_NH3_Suction_dt_New = (PropsSI('U','P',P_NH3_Suction_dt_New*1000,'Q',0,
'ammonia'))/1000; % (kJ/kg)
ug_NH3_Suction_dt_New = (PropsSI('U','P',P_NH3_Suction_dt_New*1000,'Q',1,
'ammonia'))/1000; % (kJ/kg)
x_NH3_Suction_dt_New = (u_NH3_Suction_dt_New-uf_NH3_Suction_dt_New)/
(ug_NH3_Suction_dt_New-uf_NH3_Suction_dt_New) ;
%-----Suction Temperature of NH3 (kPa)-----
if x_NH3_Suction_dt_New > 1
T_NH3_Suction_dt_New = (PropsSI('T','P',P_NH3_Suction_dt_New*1000,'U',
u_NH3_Suction_dt_New*1000,'ammonia')) ; % (K)
elseif x_NH3_Suction_dt_New >= 0 && x_NH3_Suction_dt_New <= 1
T_NH3_Suction_dt_New = (PropsSI('T','P',P_NH3_Suction_dt_New*1000,'Q',1,
'ammonia')) ; % (kJ/kg)
elseif x_NH3_Suction_dt_New < 1
T_NH3_Suction_dt_New = (PropsSI('T','P',P_NH3_Suction_dt_New*1000,'Q',0,
'ammonia')) ; % (kJ/kg)
end
Error_dt = abs((dt_New - dt)/(dt))*100 ;
Error_P_NH3_Suction = abs((P_NH3_Suction_dt_New - P_NH3_Suction_dt)/
(P_NH3_Suction_dt))*100 ;
Error_T_NH3_Suction = abs((T_NH3_Suction_dt_New - T_NH3_Suction_dt)/
(T_NH3_Suction_dt))*100 ;
end
```

ประวัติผู้เขียน

นายกมลวิสิทธิ์ พันวอ เกิดวันจันทร์ที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2542 ณ อำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ ในปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนหนองกี่พิทยาคม จังหวัดบุรีรัมย์ ในปีการศึกษา 2559 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี เกียรตินิยมอันดับ 1 หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีการศึกษา 2563 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2564 ในระหว่างการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษานี้ได้รับมอบหมายให้เป็นผู้สอนรายวิชาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ดังนี้

1. รายวิชาปฏิบัติการ ได้แก่ การเขียนแบบวิศวกรรม 1 ปฏิบัติการขึ้นรูปและเชื่อมต่อ (หัวข้อการตัดด้วยเลเซอร์) ปฏิบัติการเทคโนโลยีการผลิต (หัวข้อเครื่องวัดพิคัดขนาด 3 มิติ) ปฏิบัติการด้านของไหลและความร้อน (หัวข้อการทำความร้อน การระบายอากาศและการปรับอากาศ (HVAC)) และปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1 (หัวข้อ วัฏจักรการทำความเย็นและการปรับอากาศ)

ในขณะเดียวกัน ผู้เขียนได้ทำการวิจัยและร่วมวิจัยกับคณาจารย์ ซึ่งมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 3 เรื่อง ดังนี้

1. บทความวิจัย เรื่อง “แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด” ตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ISSN : 1689-9664 ปีที่ 43 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567 ซึ่งเป็นวารสารระดับชาติฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 (อยู่ระหว่างการตีพิมพ์)

2. บทความวิจัย เรื่อง “อิทธิพลของอุณหภูมิน้ำป้อนต่อกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด” ในงานประชุมวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมศาสตร์ครั้งที่ 14 โดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ระหว่างวันที่ 25-26 สิงหาคม 2566 ณ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์

3. บทความวิจัย เรื่อง “อิทธิพลของอุณหภูมิสารทำความเย็นด้านระเหยต่อกระบวนการทำความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์” ในงานประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 20 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ระหว่างวันที่ 7-8 ธันวาคม 2566 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน