

การวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์
สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**ANALYSIS OF THERMODYNAMICS MODEL FOR
BLOCK-ICE MANUFACTURING PROCESS**



**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 2019**

การวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร. บัณฑิต กตุตาคม)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร. ชีระชาติ พรพิบูลย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร. วิฑูรย์ เข็มสุวรรณ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รัฐกร มากหวาน : การวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับกระบวนการ
ผลิตน้ำแข็งซอง (ANALYSIS OF THERMODYNAMICS MODEL FOR BLOCK-ICE
MANUFACTURING PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. ชีระชาติ พรพิบูลย์,
197 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการ
ผลิตน้ำแข็งซอง เพื่อศึกษากลไกการก่อตัวของน้ำแข็งภายในซองผลิตและอุณหภูมิที่เกลือภายใน
บ่อผลิตและนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็น
และปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตเพื่อการประหยัดพลังงาน เนื่องจาก
ในปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตน้ำแข็งยังไม่มียุทธศาสตร์การจัดการเดินเครื่องทำความเย็นอย่างชัดเจน
โดยใช้วิธีการสังเกตอุณหภูมิของอุณหภูมิที่เกลือภายในบ่อผลิตเป็นหลักเกณฑ์ในการเดิน
เครื่องทำความเย็นและยังไม่มีน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายคงค้างภายในบ่อผลิตเพื่อใช้ในการชะลอการ
เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกลือภายในบ่อผลิต จึงส่งผลให้การเดินเครื่องทำความเย็นเป็นไปอย่างไม่มี
ประสิทธิภาพในด้านการใช้พลังงาน โดยงานวิจัยนี้ทำการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์
ด้วยหลักการสมดุลมวลและพลังงาน เพื่อศึกษากลไกการก่อตัวของน้ำแข็งภายในซองผลิตและ
อุณหภูมิที่เกลือภายในบ่อผลิต โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแทนค่าแบบต่อเนื่อง นอกจากนี้
งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดของรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นเพื่อการประหยัด
พลังงานด้วยวิธีกำหนดการพลวัต

ผลที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่เกิดขึ้นจริงจากการตรวจวัดในกระบวนการ
ผลิตน้ำแข็งซองภายใต้เงื่อนไขกระบวนการผลิตที่ทำการศึกษาทั้งหมด พบว่าค่าอุณหภูมิที่เกลือ
ภายในบ่อผลิตและสถานะของน้ำภายในซองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีผลลัพธ์
เป็นที่น่าพึงพอใจ จากกรณีศึกษาที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองภายใต้รูปแบบการ
เดินเครื่องทำความเย็นที่ทำการวิเคราะห์ จะทำให้โรงงานประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิต
น้ำแข็งซองได้ 35.15 % จากผลลัพธ์ที่ได้จึงสรุปได้ว่า วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถ
กำหนดรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองได้อย่าง
มีประสิทธิภาพ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา รัฐกร มากหวาน
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ชีระชาติ พรพิบูลย์

RATTHAKORN MARKWARN : ANALYSIS OF THERMODYNAMICS
MODEL FOR BLOCK-ICE MANUFACTURING PROCESS.

THESIS ADVISOR : TEERACHART PORNPIBUL, Ph.D., 197 PP.

BLOCK-ICE MANUFACTURING PROCESS/THERMODYNAMICS MODEL

This research objective create the thermodynamics model for block-ice manufacturing process to examine the process of transforming water within molded and brine temperature in production pools. In order to save energy, this model is applied to Optimize of planning the block-ice machines and quantity of remaining ice in production pools. Presently, ice factory do not have a block-ice machines management standard. Normally, they observe the brine temperature trend to operate the block-ice machines and still have no ice in stock management which is used to slow down the rise of brine temperature. Then, as a result, the operation of the block-ice machine is not efficient in saving energy. In this research, we introduce energy balance and mass balance method to study the process of transforming water within molded and construct a thermodynamic model using successive substitution. In addition, this research presents a method of optimization for planning the block-ice machines for energy saving. by the dynamic programming.

The results presented in this research analyzed by comparing the result from the model with actual figure from the manufacturing process. According to, the manufacturing condition in total case study. These findings indicate that, brine temperature in production pools and state of water within molded to be closer and satisfying. The operate pattern of block-ice machines from case study made to ice factory saving the energy in manufacturing process to 35.15 %. From the results,

it can be concluded that, method presented in this research can define the operate pattern of block-ice machines for block-ice manufacturing process, it efficiently.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature

Rattakorn M.

Advisor's Signature

Teechai Pongpibul

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับ โอกาสและความเมตตากรุณาอย่างสูง จากอาจารย์ ดร. ชีระชาติ พรพิบูลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย ตลอดถึงการอบรมสั่งสอนในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยได้ตระหนักถึงความตั้งใจจริง ความทุ่มเทและความเสียสละของอาจารย์ จักขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณบริษัท พรพิบูลย์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับดำเนินงานวิจัยและขอขอบพระคุณ คุณธนพัฒน์ สุราฤทธิ์ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของอย่างละเอียด

ขอขอบพระคุณ คุณศศิธร พยัคฆ์ทอง และ คุณขจรศักดิ์ สีเมฆ ที่กรุณาให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ ผอ.เพื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด และเป็นแรงผลักดันที่สำคัญแก่ผู้วิจัย รวมถึงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เป็นสถานที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

รัฐกร มากหวาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย.....	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยของ อเนก หีบสัมฤทธิ์ (2536).....	4
2.2 งานวิจัยของ ชีรวัดน์ กลับคล้าย และ ชีระชาติ พรพิบูลย์ (2555).....	4
2.3 งานวิจัยของ ภาณุวัฒน์ เน้อยทอง และ เกียรติกร อัสวมาศบันลือ (2551).....	5
3 กระบวนการผลิตน้ำแข็งซองและการสมดุปลังงาน.....	6
3.1 กระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง.....	6
3.1.1 กระบวนการเตรียมน้ำสะอาดเพื่อใช้ในการผลิต.....	6
3.1.2 ขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งซอง.....	9
3.1.3 กระบวนการทำความสะอาดสำหรับการผลิตน้ำแข็งซอง.....	11
3.2 การวิเคราะห์กระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง.....	20
3.2.1 ทฤษฎีและหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้อง.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4	แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ.....	39
4.1	การสร้างแบบจำลองทางแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ.....	39
4.1.1	จำแนกตัวแปรในการวิเคราะห์แบบจำลอง.....	40
4.1.2	ระบบสมการจากการสมดุลพลังงานและการสมดุลมวลสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ.....	41
4.2	การจำลองระบบทางความร้อนด้วยวิธีการแทนค่าแบบต่อเนื่อง (Successive Substitution).....	41
4.3	ปัจจัยที่มีอิทธิพลกับแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ.....	45
4.3.1	การหาสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องและอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต.....	45
4.3.2	ความร้อนจากภายนอกที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิต.....	45
4.3.3	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective Heat transfer Coefficient) ของน้ำภายในช่องผลิตและน้ำเกลือภายในบ่อผลิต.....	46
4.3.4	อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็น.....	48
4.3.5	ลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิต.....	49
4.4	การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยบ่อผลิตจำลอง.....	50
4.5	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต.....	51
4.6	ผลที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ.....	51
4.6.1	เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับค่าอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ทำการตรวจวัด.....	52
4.6.2	อัตราการเกิดน้ำแข็งภายในช่องผลิตภายใต้เงื่อนไขการผลิตจริงเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.3	พฤติกรรมการณ์เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำเกลือขณะที่มีการยกจำหน่าย.....	52
4.6.4	จำนวนน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิต.....	58
5	การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของเพื่อการประหยัดพลังงาน.....	59
5.1	การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)	59
5.2	กรณีศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของด้วยวิธีกำหนดการพลวัตของโรงงานผลิตน้ำแข็งของตัวอย่าง	60
5.3	ผลที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำหนดการพลวัตและข้อเสนอแนะ	61
6	สรุปผลงานวิจัย.....	65
6.1	สรุปผลที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ	65
6.2	สรุปผลที่ได้จากวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีกำหนดการพลวัต	65
	รายการอ้างอิง.....	67
	ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	ปัจจัยการผลิตของโรงงานและตารางแสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ.....	68
ภาคผนวก ข.	การวิเคราะห์กระบวนการผลิตน้ำแข็งของและตัวอย่างการคำนวณ.....	82
ภาคผนวก ค.	ผลที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ	131
ภาคผนวก ง.	ผลการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ด้วยวิธีกำหนดการพลวัต (Dynamics Programming).....	146
ภาคผนวก จ.	โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	172
ภาคผนวก ฉ.	ศัพท์วิชาการ.....	184

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข. เครื่องมือตรวจวัดพื้นฐาน.....	186
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	188
ประวัติผู้เขียน.....	197



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	ระบบสมการจากการสมดุลพลังงานและสมดุลมวลของระบบสำหรับ กระบวนการผลิตน้ำแข็งของ..... 42
4.2	การดูเข้าของค่าตัวแปรอิสระของกลุ่มตัวอย่างที่ทำการศึกษา ณ เวลาเริ่มต้น..... 44
4.3	อัตราความร้อนที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตรวมทุกส่วน..... 46
4.4	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต..... 48
4.5	ค่าอัตราการไหลโดยมวลของลมอัดและอุณหภูมิลมอัดที่เป่าน้ำภายในช่อง..... 50
ก.3.1	คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศ..... 74
ก.4.1	คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำแข็งที่ความดันบรรยากาศ..... 75
ก.5.1	คุณสมบัติของน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 20 %..... 76
ก.6.1	คุณสมบัติของอากาศแห้งที่ความดันบรรยากาศ..... 77
ก.7.1	คุณสมบัติของวัสดุของน้ำแข็ง AISI 1020..... 78
ก.8.1	ปริมาณจำหน่ายน้ำแข็งและการใช้พลังงานไฟฟ้า ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2562 ของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา..... 79
ข.1.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ พลังงานภายในจำเพาะ และพลังงานภายใน ของน้ำภายในช่องผลิตในสถานะของเหลว..... 84
ข.1.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความหนาแน่นของน้ำแข็ง พลังงานภายใน จำเพาะพลังงานภายในของน้ำภายในช่องในขณะที่กำลังเปลี่ยนสถานะ..... 85
ข.1.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ พลังงานภายในจำเพาะ และพลังงานภายใน ของน้ำภายในช่องในสถานะของแข็ง..... 87
ข.2.1	ตารางเปรียบเทียบความหนาของน้ำแข็งระหว่างช่องน้ำแข็งทดลองและช่อง น้ำแข็งจริง..... 93
ข.3.1	การหาอัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ ของผนังบ่อผลิตด้านที่ 1..... 96
ข.3.2	การหาอัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ ของผนังบ่อผลิตด้านที่ 2..... 97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.3.3 การหาอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ ของผนังบ่อผลิตด้านที่ 3.....	98
ข.3.4 การหาอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ ของผนังบ่อผลิตด้านที่ 1.....	99
ข.3.5 การหาอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ ของผนังบ่อผลิตด้านที่ 2.....	100
ข.3.6 การหาอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ ของผนังบ่อผลิตด้านที่ 3.....	101
ข.3.7 การหาอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนฝาปิดของน้ำแข็ง.....	102
ข.3.8 ค่าเฉลี่ยของอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิต ผ่านผนังแต่ละด้าน.....	103
ข.3.9 พื้นที่ผนังของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่มีอัตราการความร้อนที่รั่วไหล ผ่านผนังทั้ง 3 ส่วน.....	103
ข.3.10 อัตราความร้อนสุทธิที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อผลิตในส่วนต่างๆ.....	103
ข.4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ของน้ำภายในช่องผลิต.....	106
ข.4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต.....	111
ข.4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต.....	118
ข.5.1 ผลการตรวจวัดสถานะของน้ำภายในช่องผลิตและอุณหภูมิน้ำเกลือภายใน บ่อผลิตชุดการทดลองที่ 1.....	120
ข.5.2 ผลการตรวจวัดสถานะของน้ำภายในช่องผลิตและอุณหภูมิน้ำเกลือภายใน บ่อผลิตชุดการทดลองที่ 2.....	121
ข.5.3 ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาภาระการทำความเย็นสุทธิของ ชุดการทดลองที่ 1.....	122

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.5.4 ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาภาระการทำความเย็นสุทธิของ ชุดการทดลองที่ 2	123
ข.5.5 การหาอัตราการทำความเย็นของชุดการทดลองที่ 1.....	124
ข.5.6 การหาอัตราการทำความเย็นของชุดการทดลองที่ 2.....	124
ข.6.1 ตารางบันทึกผลการทดลองหาอัตราการไหลและอุณหภูมิ ของลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิต.....	126
ข.6.2 สรุปผลการหาอัตราการไหลและอุณหภูมิของลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิต.....	127
ข.7.1 ค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตจำลองในแต่ละช่วงเวลา.....	129
ค.1.1 ค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป.....	133
ค.1.2 ค่าพลังงานภายในของน้ำภายในช่องผลิตและปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่าย ที่คงค้างภายในบ่อผลิตภายใต้ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป.....	140
ง.2.1 โครงสร้างอัตราค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าในแต่ละรูปแบบ.....	149
ง.3.1 ชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นที่ได้จากวิธีกำหนดการพลวัต ของกรณีศึกษาที่ทำการศึกษา.....	150
ง.3.2 ค่าพลังงานภายในของน้ำภายในช่องผลิตที่ได้จากวิธีกำหนดการพลวัต ของกรณีศึกษาที่ทำการศึกษา.....	153

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	ขั้นตอนการเตรียมน้ำสะอาด.....	6
3.2	ปั้มน้ำแบบแรงเหวี่ยงโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง.....	7
3.3	บ่อกักตะกอน.....	7
3.4	ถังทรายและผงคาร์บอน.....	8
3.5	บ่อกักน้ำสะอาด.....	8
3.6	หัวจ่ายน้ำสะอาด.....	9
3.7	ภาพตัดของบ่อกักน้ำแข็งของ.....	10
3.8	บ่อกักน้ำแข็งของ.....	10
3.9	ขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งของ.....	12
3.10	ช่องน้ำแข็ง.....	12
3.11	ท่อลมเป่าน้ำภายในช่อง.....	13
3.12	เครื่องเวียนน้ำเกลือ.....	13
3.13	ครนยกช่องน้ำแข็ง.....	13
3.14	บ่อละลายน้ำแข็งของ.....	14
3.15	เครื่องถอดน้ำแข็ง.....	14
3.16	เลื่อยวงเดือน.....	14
3.17	กระบวนการทำความเย็นสำหรับการผลิตน้ำแข็งของ.....	15
3.18	คอมเพรสเซอร์ (Compressor).....	16
3.19	เครื่องแยกน้ำมันหล่อลื่น (Oil Separator).....	16
3.20	เครื่องควบแน่น (Condenser).....	17
3.21	หอผึ่งเย็น (Cooling Tower).....	17
3.22	ถังเก็บสารทำความเย็น (Refrigerant Receiver).....	18
3.23	วาล์วลดความดัน (Expansion Valve).....	18
3.24	แอกคิวมูเลเตอร์ (Accumulator).....	19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25	เครื่องทำระเหย (Evaporator) และ แอคคิวมูเลเตอร์ (Accumulator)..... 21
3.26	การถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบเปิดและสิ่งแวดลอม..... 23
3.27	กลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในชองกับน้ำเกลือ ภายในบ่อผลิตในรูปแบบ 1 มิติ..... 25
3.28	พิกัดของชองผลิตในรูปแบบ 3 มิติและพิกัดของชองผลิตในรูปแบบ 1 มิติ..... 25
3.29	สมดุลพลังงานของบ่อผลิตโดยให้น้ำเกลือภายในบ่อผลิตและ อากาศภายในบ่อผลิตเป็นปริมาตรควบคุม..... 31
3.30	สมดุลพลังงานและสมดุลมวลของน้ำภายในชองผลิต โดยให้ น้ำภายในชองผลิตเป็นปริมาตรควบคุม..... 34
4.1	แผนภาพความสัมพันธ์ของระบบสมการจากการสมดุลพลังงานและสมดุลมวล..... 43
4.2	ความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในชองผลิต กับอุณหภูมิน้ำภายในชองผลิต..... 47
4.3	ความสัมพันธ์ของอัตราการทำความเย็นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเกลือ ภายในบ่อผลิต..... 49
4.4	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง กับการตรวจวัดจริงในบ่อผลิตจำลอง..... 53
4.5	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้รูปแบบการเดินเครื่อง และเงื่อนไขการผลิตของโรงงานผลิตน้ำแข็งชอง..... 54
4.6	ค่าอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ได้จากแบบจำลองและ อุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ทำการตรวจวัดเทียบกับเวลา..... 55
4.7	ระยะเวลาผลิตน้ำแข็งภายในชองผลิตในแต่ละกลุ่มจำหน่ายที่ได้จากแบบจำลอง..... 56
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภาวะการทำความเย็นสุทธิ และเวลาที่ทำการยกจำหน่ายน้ำแข็งช่วงเช้า..... 57
4.9	จำนวนน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตเทียบกับจำนวนน้ำแข็งที่ จำหน่ายในแต่ละช่วงเวลา..... 58
5.1	ชั่วโมงการเดินเครื่องที่ได้จากการหาค่าที่ดีที่สุดเปรียบเทียบกับชั่วโมง การเดินเครื่องที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิต..... 62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2	แสดงตัวอย่างอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตในแต่ละวันผลิต ของกรณีศึกษาที่มีรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นที่ดีที่สุด..... 63
ก.1.1	พิกัดบ่อผลิตกำลังการผลิต 1320 ซองของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา..... 69
ก.1.2	ขนาดพิกัดของน้ำแข็งของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา..... 70
ข.1.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำภายในช่องผลิตและพลังงานภายในของ น้ำภายในช่องผลิตในสถานะของเหลว..... 85
ข.1.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำภายในช่องและพลังงานภายในของ น้ำภายในช่องในสถานะของแข็ง..... 86
ข.2.1	ช่องน้ำแข็งจำลอง..... 88
ข.2.2	พิกัดขนาดของช่องน้ำแข็งทดลอง..... 89
ข.2.3	การจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งช่อง..... 91
ข.2.4	การตรวจวัดความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นและการตรวจปริมาณน้ำ ที่เหลือจากช่องน้ำแข็งทดลอง..... 92
ข.2.5	สภาวะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องผลิตแต่ละชุดจำหน่ายที่อยู่ในบ่อผลิต จัดให้อยู่ในเทอมของพลังงานภายในของน้ำภายในช่องผลิตภายใต้กรณีศึกษา..... 94
ข.4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตกับ อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่อง..... 108
ข.5.1	ความสัมพันธ์ของอัตราการทำความเย็นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของ น้ำเกลือภายในบ่อผลิต..... 125
ข.7.1	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลอง กับผลการตรวจวัดจริงในบ่อผลิตจำลอง..... 130
ง.1.1	หลักการวิเคราะห์ปัญหาที่ละขั้นตอนของระบบ..... 147
ง.1.2	ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยวิธีกำหนดการพลวัต..... 148
ง.3.1	ชั่วโมงการเดินเครื่องในแต่ละวันที่ทำการผลิตน้ำแข็งช่อง..... 150
ง.3.2	ค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตได้จากวิธีกำหนดการพลวัตของกรณีศึกษา ที่ทำการศึกษา..... 151

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A_{block-ice}$	=	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของช่องน้ำแข็งในรูปแบบ 1 มิติ (m^2)
c_b	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 20% ($kJ/kg \cdot K$)
$c_{p,ca}$	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิต ($kJ/kg \cdot K$)
E_{in}	=	พลังงานรวมของมวลที่เข้าสู่ระบบ (kJ)
ΔE_{cv}	=	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในรวมของระบบ (kJ)
H	=	เอนทาลปี (kJ)
h	=	เอนทาลปีจำเพาะ (kJ/kg)
h_w	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิต ($W/m^2 \cdot K$)
h_b	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิต ($W/m^2 \cdot K$)
k_{mold}	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุของน้ำแข็ง ($W/m \cdot K$)
KE	=	พลังงานจลน์ (kJ)
L_{ice}	=	ความหนาเสมือนของน้ำแข็ง (m)
L_{mold}	=	ความหนาของวัสดุของน้ำแข็ง (m)
$m_{block-ice}$	=	มวลของน้ำภายในช่องผลิต (kg)
$\sum m_{in}$	=	ผลรวมของมวลที่เข้าสู่ระบบ (kg)
$\sum m_{out}$	=	ผลรวมของมวลที่ออกจากระบบ (kg)
Δm_{cv}	=	การเปลี่ยนแปลงมวลภายในระบบ (kg)
NH_3	=	แอมโมเนีย
P	=	ความดัน (kPa)
PE	=	พลังงานศักย์ (kJ)
Q	=	ความร้อน (kJ)
\dot{Q}_{ice}	=	อัตราการทำความเย็นของน้ำภายในช่องหรืออัตราการความร้อนที่น้ำภายในช่องผลิตถ่ายเทให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิต (kW)
$\dot{Q}_{leak,total}$	=	อัตราการความร้อนสุทธิที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตผ่านผนังบ่อผลิต (kW)
\dot{Q}_{ref}	=	อัตราการทำความเย็น (kW)
T	=	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

U	=	พลังงานภายใน (kJ)
u	=	พลังงานภายในจำเพาะ (kJ/kg)
V	=	ปริมาตร (m^3)
W	=	งาน (kJ)
W_{flow}	=	งานที่เกิดจากการไหลของมวล (kJ)
ρ	=	ความหนาแน่น (kg/m^3)
<u>สัญลักษณ์ตัวห้อย</u>		
w	=	น้ำ
ice	=	น้ำแข็ง
b	=	น้ำเกลือ
ca	=	ลมอัด
m,i	=	ผนังผิวของด้านใน
m,o	=	ผนังผิวของด้านนอก
t	=	เวลาเริ่มต้น (sec)
Δt	=	การเปลี่ยนแปลงเวลา (sec)
$t + \Delta t$	=	เวลาสิ้นสุดเมื่อผ่านไป Δt (sec)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การผลิตน้ำแข็งของมีหลักการทำงาน โดยใช้ระบบทำความเย็นตามหลักการของวัฏจักรอัดไอ (Vapor-Compression Cycle) ซึ่งใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น สารทำความเย็นความดันต่ำในสถานะของผสมของเหลวและไออิมตัว (Liquid-Vapor mixture) ที่มีอุณหภูมิต่ำภายในเครื่องทำระเหย (Evaporator) ทำความเย็นให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตทำให้น้ำเกลือมีอุณหภูมิประมาณ -10°C ถึง 0°C เพื่อทำความเย็นให้กับน้ำบริสุทธิ์ภายในช่องน้ำแข็งที่แช่อยู่ภายในบ่อน้ำเกลือน้ำบริสุทธิ์ ขณะทำความเย็นจะถูกเป่าด้วยลมอัด เพื่อให้สิ่งปนเปื้อนภายในช่องน้ำแข็งเข้ามารวมตัวที่กึ่งกลางของซึ่งเป็นส่วนของน้ำแข็งที่ถูกตัดทิ้งไปภายหลังจากทำการจำหน่าย จนกระทั่งเกิดน้ำแข็งบริสุทธิ์ประมาณ 50 % ของปริมาณของน้ำแข็งจึงหยุดการจ่ายลมอัด สารทำความเย็นหลังจากได้รับความร้อนจากน้ำเกลือแล้วจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไออิมตัวเข้าสู่แอกคิวมูเลเตอร์ (Accumulator) และคอมเพรสเซอร์จะดูดสารทำความเย็นเหล่านี้เข้าสู่กระบวนการอัดกลายเป็นสารทำความเย็นความดันสูงสถานะไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapor) จากนั้นสารทำความเย็นเหล่านี้จะคายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมโดยอาศัยน้ำระบายความร้อนจากหอผึ่งเย็น (Cooling Tower) ที่เครื่องควบแน่น (Condenser) สารทำความเย็นความดันสูงที่คายความร้อนแล้วจะเปลี่ยนสถานะเป็นสารทำความเย็นสถานะของเหลวอิมตัว (Saturated Liquid) ความดันสูง เข้าสู่ถังเก็บสารทำความเย็นเหลว (Refrigerant Receiver) จากนั้นสารทำความเย็นเหล่านี้จะถูกลดความดันด้วยวาล์วลดความดัน (Expansion Valve) จนมีสถานะเป็นสารทำความเย็นสถานะของผสมอิมตัวความดันต่ำเข้าสู่แอกคิวมูเลเตอร์ และเครื่องทำระเหย ตามลำดับ เพื่อการทำความเย็นให้แก่ น้ำเกลือภายในบ่อผลิต ซึ่งในกระบวนการผลิตน้ำแข็งของนั้นจะมีการคงค้ำน้ำแข็งของผลิตที่พร้อมจำหน่ายไว้ภายในบ่อผลิตเพื่อที่จะช่วยรักษาอุณหภูมิ น้ำเกลือให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C เพื่อชะลอการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำภายในช่องต่างๆ ที่แช่อยู่ภายในบ่อผลิตในขณะที่หยุดทำการเดินเครื่องทำความเย็นเพื่อไม่ให้ น้ำภายในช่องต่างๆ มีอุณหภูมิสูงกว่า 0°C แต่ถ้ามีปริมาณน้ำแข็งของผลิตค้ำภายในบ่อผลิตน้อยเกินไปก็จะไม่สามารถรักษาอุณหภูมิ น้ำเกลือให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ได้จนกว่าจะทำการเดินเครื่องทำความเย็นอีกครั้ง อีกทั้งในกระบวนการผลิตน้ำแข็งของยังไม่มีรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นที่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ น้ำเกลือภายในบ่อผลิตซึ่งทำให้ในบางครั้งจำเป็นต้องเดินเครื่องทำความเย็นในช่วงที่มีการคิดอัตราค่าไฟฟ้าสูงเพื่อรักษาอุณหภูมิ น้ำเกลือให้อยู่ในค่าที่ต่ำ

จากแนวทางในการแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นทำให้วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์คือ สร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง โดยใช้วิธีสมดุลพลังงาน เพื่อศึกษากลไกการก่อตัวของน้ำแข็งภายในช่องผลิตและอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต โดยผลของการวิเคราะห์แบบจำลองดังกล่าวจะนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการนำเสนอวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดของรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองเพื่อการประหยัดพลังงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

สร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง โดยใช้วิธีสมดุลพลังงาน เพื่อศึกษากลไกการก่อตัวของน้ำแข็งภายในช่องผลิตและอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต โดยผลของการวิเคราะห์แบบจำลองดังกล่าวจะนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการนำเสนอวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดของรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองเพื่อการประหยัดพลังงาน

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1. เครื่องผลิตน้ำแข็งซองที่ทำการศึกษานั้นใช้ต้นกำลังเป็นคอมเพรสเซอร์โดยมีสารทำความเย็นเป็นแอมโมเนีย
2. ในงานวิจัยนี้จะกำหนดช่วงอุณหภูมิน้ำเกลือที่ใช้ในการควบคุมเครื่องผลิตน้ำแข็งซองอยู่ในช่วง 0°C ถึง -10°C
3. ทำการศึกษาเฉพาะบ่อผลิตที่มีจำนวนช่องน้ำแข็ง 4 ช่องต่อชุดการจำหน่าย และ 6 ช่อง ต่อชุดการจำหน่ายเท่านั้น
4. พิจารณากลไกการก่อตัวของน้ำแข็งภายในช่องน้ำแข็งเป็นแบบ 1 มิติ
5. พิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำเกลือและน้ำภายในช่องเป็นแบบสภาวะไม่คงตัว (Unsteady State)
6. พิจารณาการถ่ายเทพลังงานในวัฏจักรการทำงานเป็นแบบอัดไอเป็นแบบคงตัว (Steady Flow)
7. ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองนั้นกำหนดให้มีรูปแบบการเดินคอมเพรสเซอร์ได้ไม่เกิน 3 ชุด ต่อ 1 บ่อผลิต
8. การเป่าลมอัดลงในช่องน้ำแข็งจะทำการหยุดจ่ายลมอัดเมื่อน้ำแข็งภายในช่องมีปริมาตรเท่ากับร้อยละ 50 ของปริมาตรช่องน้ำแข็ง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

1. ได้แบบจำลองมาศึกษาปรากฏการณ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของกลไกการก่อกวนของน้ำแข็งภายในช่องน้ำแข็งและพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ น้ำเกลือภายในบ่อผลิต

2. ทราบถึงวิธีการในการหารูปแบบการจัดการการเดินทางเครื่องทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของตลอดจนทราบถึงปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิต เพื่อการประหยัดพลังงาน ภายใต้ความต้องการจำหน่ายน้ำแข็งของโรงงาน



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยของ อเนก หีบสัมฤทธิ์ (2536)

ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในโรงงานผลิตน้ำแข็งของ สำหรับการประมงโดยวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของ โรงงานผลิตน้ำแข็งของและประเมินการสูญเสียต่างๆ เพื่อนำไปสู่การหาแนวทางประหยัดพลังงาน ของโรงงานผลิตน้ำแข็งของ

โดยการศึกษาวิจัยนี้ใช้หลักการสมดุลพลังงานในแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อที่จะ นำไปสู่การวิเคราะห์สมรรถนะของอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น สัมประสิทธิ์สมรรถนะ(COP) ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นต้น และงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพล ของความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิต ใน 3 รูปแบบ คือ 1. ความร้อนจาก ภายนอกที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตผ่านผนังบ่อที่อยู่ในระดับน้ำเกลือ 2. ความร้อนจากภายนอกที่รั่วไหล เข้าสู่บ่อผลิตผ่านผนังบ่อที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ 3. ความร้อนจากภายนอกที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิต ผ่านฝาปิดของน้ำแข็ง

ผลที่ได้จากวิจัยนี้คือ ได้ทราบถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ กระบวนการผลิตน้ำแข็งของ และแนวทางในการประหยัดพลังงานของโรงงานผลิตน้ำแข็งของและ ในงานวิจัยนี้ยังทราบถึงสมรรถนะการทำงานของระบบเครื่องทำความเย็นอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่า ค่ามาตรฐานเนื่องจากการไม่มีการควบคุมการทำงานของเครื่องทำความเย็นให้สัมพันธ์กับภาระการทำ ความเย็นในแต่ละช่วงเวลา จึงเป็นสิ่งที่ควรปรับปรุงให้มีการควบคุมการทำงานของเครื่องทำความเย็น ให้สัมพันธ์กับภาระทำความเย็นที่เครื่องทำความเย็นได้รับ และยังทราบถึงอิทธิพลของ ความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิต ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำ วิทยานิพนธ์นี้

2.2 งานวิจัยของ ชีรวัฒน์ คลับคล้าย และ ชีระชาติ พรพิบูลย์ (2555)

ได้นำเสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบ หลายขั้นตอน เพื่อให้ทราบถึงปริมาณไอหัวหม้อที่จ่ายไปยังหม้ออุ่นและหม้อต้มชุดถัดไปและสอดคล้อง กับความต้องการไอหัวหม้อที่แท้จริงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์เหล่านั้น

โดยใช้วิธีการสมดุลมวลและพลังงาน โดยพิจารณาให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบและกระบวนการอยู่ในสถานะคงตัว (Steady state) และแก้ปัญหาในระบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของอุปกรณ์ความร้อนโดยวิธีนิวตัน-รัปสัน (Newton-Raphson) จากการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถชี้ให้เห็นว่าปริมาณการใช้ไอน้ำที่คำนวณได้จากระบบจริงมีค่าสูงกว่าปริมาณการใช้ไอน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองเล็กน้อยเนื่องจากระบบจริงนั้นได้รับผลกระทบจากความถดถอยของประสิทธิภาพของหม้อต้มและหม้ออุ่นที่เกิดขึ้น

ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน รวมถึงการแก้ปัญหาในระบบสมการด้วยวิธีนิวตัน-รัปสัน (Newton-Raphson) ไปเป็นแนวทางในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์ต่อไป

2.3 งานวิจัยของ ภาณุวัฒน์ เน้อยทอง และ เกียรติกร อัสวมาศบันลือ (2551)

ได้ทำการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของแบบสามมิติเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในช่องน้ำแข็ง การก่อตัวของน้ำแข็ง ผลจากสถานะขอบเขตของน้ำแข็งของ และความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิภายในน้ำแข็งของ

โดยใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการนำความร้อนโดยจำลองการขึ้นรูปของน้ำแข็งด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) โดยใช้โปรแกรม Fluent ในการจำลอง

ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิภายในช่องน้ำแข็งพบว่า อุณหภูมิขอบเขตที่สัมผัสกับบ่อน้ำเกลือ และบริเวณสัมผัสอากาศมีอิทธิพลกับเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งมากที่สุด โดยจะใช้เวลาในการขึ้นรูปน้ำแข็งของ 45 ถึง 50 ชั่วโมง โดยตำแหน่งตรงกลางของผิวด้านบนจะเป็นจุดที่ใช้เวลาในการขึ้นรูปนานที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งภายในช่องทั้งหมด

อีกทั้งงานวิจัยนี้วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งควรจะศึกษาอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของการพาความร้อนด้วย จะทำให้ผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิน้ำแข็ง มีความแม่นยำขึ้น

บทที่ 3

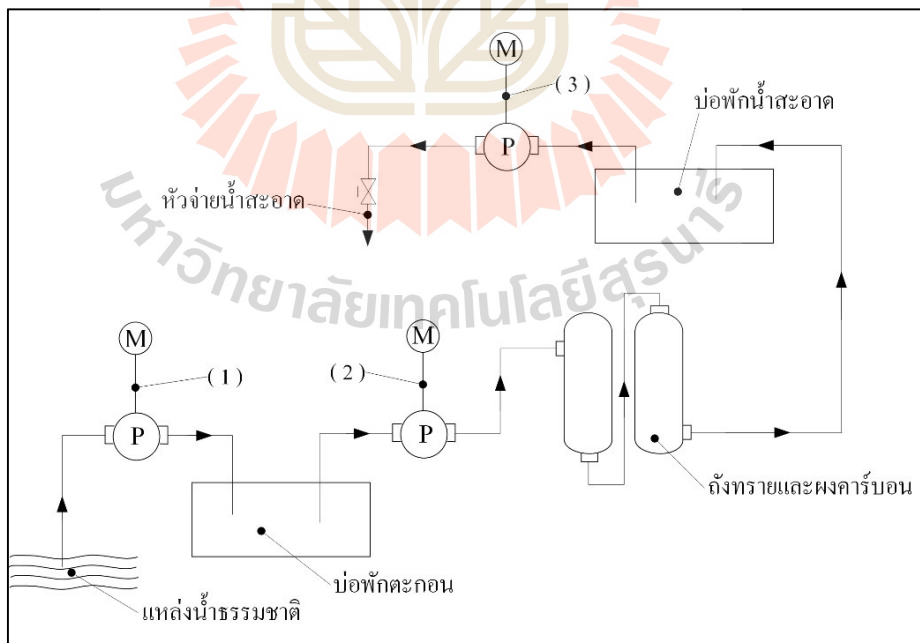
กระบวนการผลิตน้ำแข็งซองและการสมดุลพลังงาน

3.1 กระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

ในอุตสาหกรรมน้ำแข็งซองในประเทศไทยจะมีการดำเนินการผลิตอยู่ 2 ประเภท คือ 1. น้ำแข็งซองเพื่อใช้ในการประมง และ 2. น้ำแข็งซองเพื่อใช้ในการบริโภค โดยโรงงานตัวอย่างที่ใช้ในการทำงานศึกษาวิจัย จะดำเนินการผลิตน้ำแข็งซองอยู่ประเภทเดียวคือ น้ำแข็งซองที่ใช้ในการบริโภค โดยมีกระบวนการผลิตอยู่ 3 กระบวนการ คือ

3.1.1 กระบวนการเตรียมน้ำสะอาดเพื่อใช้ในการผลิต

ในกระบวนการนี้เป็นการจัดหาน้ำดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองให้มีความสะอาดและเพียงพอต่อความต้องการการผลิตของโรงงาน และถูกต้องตามมาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุข แหล่งน้ำดิบที่โรงงานใช้ในการผลิตคือ แหล่งน้ำธรรมชาติ (แม่น้ำ) และน้ำบาดาล โดยรูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมน้ำสะอาด



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมน้ำสะอาด

ปั๊มน้ำแหล่งน้ำธรรมชาติ (หมายเลขที่ 1) ทำหน้าที่สูบน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ขึ้นมายังบ่อพักตะกอน เมื่อได้ปริมาณน้ำที่ต้องการแล้วก็จะหยุดทำงาน โดยลักษณะของปั๊มน้ำจะเป็นปั๊มแบบแรงเหวี่ยง โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง โดยรูปที่ 3.2 แสดงปั๊มน้ำแบบแรงเหวี่ยง โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง



รูปที่ 3.2 ปั๊มน้ำแบบแรงเหวี่ยงโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง

บ่อพักตะกอน ทำหน้าที่รับน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ มาทำการพักให้เกิดการตกตะกอนของของเสียนขนาดใหญ่ที่อยู่ในน้ำดิบ โดยใช้สารส้มเป็นตัวทำให้เกิดตะกอน โดยรูปที่ 3.3 แสดงบ่อพักตะกอน



รูปที่ 3.3 บ่อพักตะกอน

ปั๊มน้ำจากบ่อบักตะกอนไปยังถังทรายและผงคาร์บอน (หมายเลขที่ 2) ทำหน้าที่สูบน้ำจากบ่อบักตะกอนไปยังถังทรายและผงคาร์บอน โดยมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับปั๊มน้ำหมายเลขที่ 1

ถังทรายและผงคาร์บอน ทำหน้าที่กรองของเสียขนาดเล็กและกลิ่นไม่พึงประสงค์ที่อยู่ในน้ำดิบทำให้เป็นน้ำสะอาด โดยที่ถังทรายจะทำหน้าที่กรองของเสียขนาดเล็กและผงคาร์บอนจะทำหน้าที่กำจัดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ โดยรูปที่ 3.4 แสดงถังทรายและผงคาร์บอน



รูปที่ 3.4 ถังทรายและผงคาร์บอน

บ่อบักน้ำสะอาด ทำหน้าที่รับน้ำสะอาดที่ผ่านถังทรายและผงคาร์บอนมาเก็บยังบ่อบักน้ำสะอาดที่มีทั้งบ่อบักน้ำสะอาดที่อยู่ใต้ดินและบ่อบักน้ำสะอาดที่อยู่บนอาคาร เพื่อทำการนำไปผลิตน้ำประปา โดยรูปที่ 3.5 แสดงบ่อบักน้ำสะอาด



รูปที่ 3.5 บ่อบักน้ำสะอาด

ป้อนน้ำจากบ่อกักน้ำสะอาดไปยังหัวจ่ายน้ำสะอาด (หมายเลขที่ 3) ทำหน้าที่สูบน้ำสะอาดจากบ่อกักน้ำสะอาดไปยังหัวจ่ายน้ำสะอาด เมื่อมีการใช้น้ำในการผลิตน้ำแข็งซอง โดยมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับป้อนน้ำหมายเลขที่ 1

หัวจ่ายน้ำสะอาด ทำหน้าที่จ่ายน้ำสะอาดลงในช่องน้ำแข็ง เมื่อมีการผลิตน้ำแข็งซอง โดยรูปที่ 3.6 แสดงหัวจ่ายน้ำสะอาด

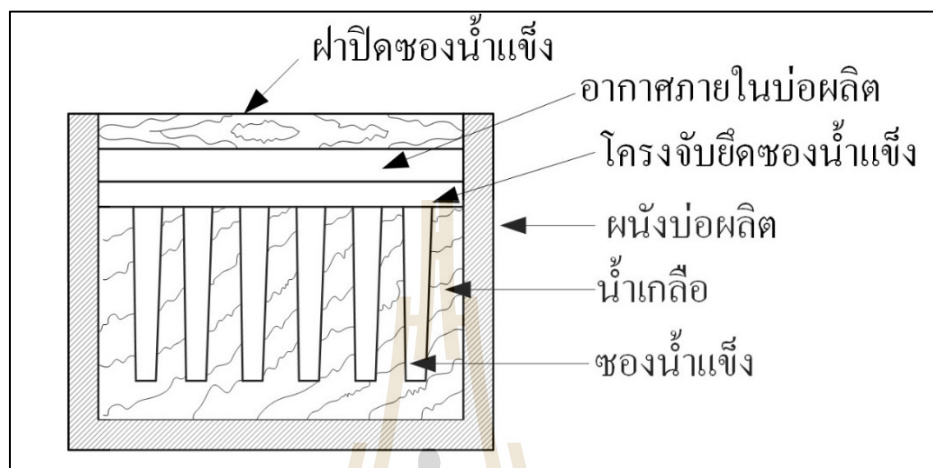


รูปที่ 3.6 หัวจ่ายน้ำสะอาด

3.1.2 ขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งซอง

ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองจะเป็นการทำให้ น้ำสะอาดอุณหภูมิห้องกลายเป็นน้ำแข็ง โดยการทำ ความเย็นของน้ำเกลือภายในบ่อกักผลิต โดยภาพของบ่อกักผลิตน้ำแข็งซองประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ อธิบายได้ในรูปที่ 3.7 แสดงภาพตัดของบ่อกักผลิตน้ำแข็งซอง ลักษณะทั่วไปของบ่อกักผลิตจะเป็นบ่อกอนกรีตขนาดใหญ่ที่ถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน เพื่อให้ ความร้อนจากสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลต่อการทำความเย็นน้อยที่สุด โดยน้ำเกลือที่อยู่ในบ่อกักผลิตจะมีความเข้มข้นของเกลือในน้ำเกลืออยู่ที่ประมาณ 20 % โดยมวล ซึ่งน้ำเกลือทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในช่องผลิตกับสารทำความเย็นในเครื่องทำระเหย (Evaporator) โดยที่น้ำเกลือจะถูกรักษาอุณหภูมิไว้อยู่ในช่วงประมาณ 0 °C ถึง -10 °C สาเหตุที่ต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงกว่า 0 °C เพื่อที่จะไม่ทำให้น้ำภายในช่องในส่วนที่กลายเป็นน้ำแข็งแล้วเกิดการละลาย และถ้าอุณหภูมิน้ำเกลือต่ำกว่า -10 °C ก็จะทำให้ น้ำแข็งมีสภาพแข็งจนเกินไปไม่เป็นไปตามลักษณะของน้ำแข็งที่พร้อมจำหน่ายเช่นกัน ในส่วนของช่องน้ำแข็งจะถูกทำให้เป็นชุดจำหน่ายเพื่อสะดวกต่อการผลิตน้ำแข็ง โดยทั่วไปชุดจำหน่าย 1 ชุดจะประกอบไปด้วย ช่องน้ำแข็ง 4 ช่อง หรือ 6 ช่อง ต่อ 1 ชุดจำหน่าย

ในงานศึกษาวิจัยนี้จะทำการศึกษาที่ชุดจำหน่าย 6 ชุด ต่อ 1 ชุดจำหน่าย และ บ่อผลิตที่มีความจุของน้ำแข็ง ขนาด 220 ชุดจำหน่ายต่อบ่อ และขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งของ สามารถอธิบายได้ดังนี้ โดยรูปที่ 3.8 แสดงบ่อผลิตน้ำแข็งของ



รูปที่ 3.7 ภาพตัดของบ่อผลิตน้ำแข็งของ



รูปที่ 3.8 บ่อผลิตน้ำแข็งของ

หลังจากทำการจำหน่ายน้ำแข็งจะมีการเติมน้ำสะอาดลงในช่องน้ำแข็งและ ถูกลำมาแช่ลงในบ่อน้ำเกลือที่มีอุณหภูมิต่ำ เมื่อน้ำของน้ำแข็งมาแช่ลงในบ่อน้ำเกลือแล้วจะทำการเป่าลมด้วยท่อลมขนาดเล็กตรงกึ่งกลางของช่องน้ำแข็งเพื่อทำการกำจัดสิ่งแปลกปลอมและของเสียที่เหลือจากการกรองมาแล้วให้มารวมอยู่ตรงกึ่งกลางช่องน้ำแข็งซึ่งเป็นส่วนที่ถูกตัดทิ้งไป

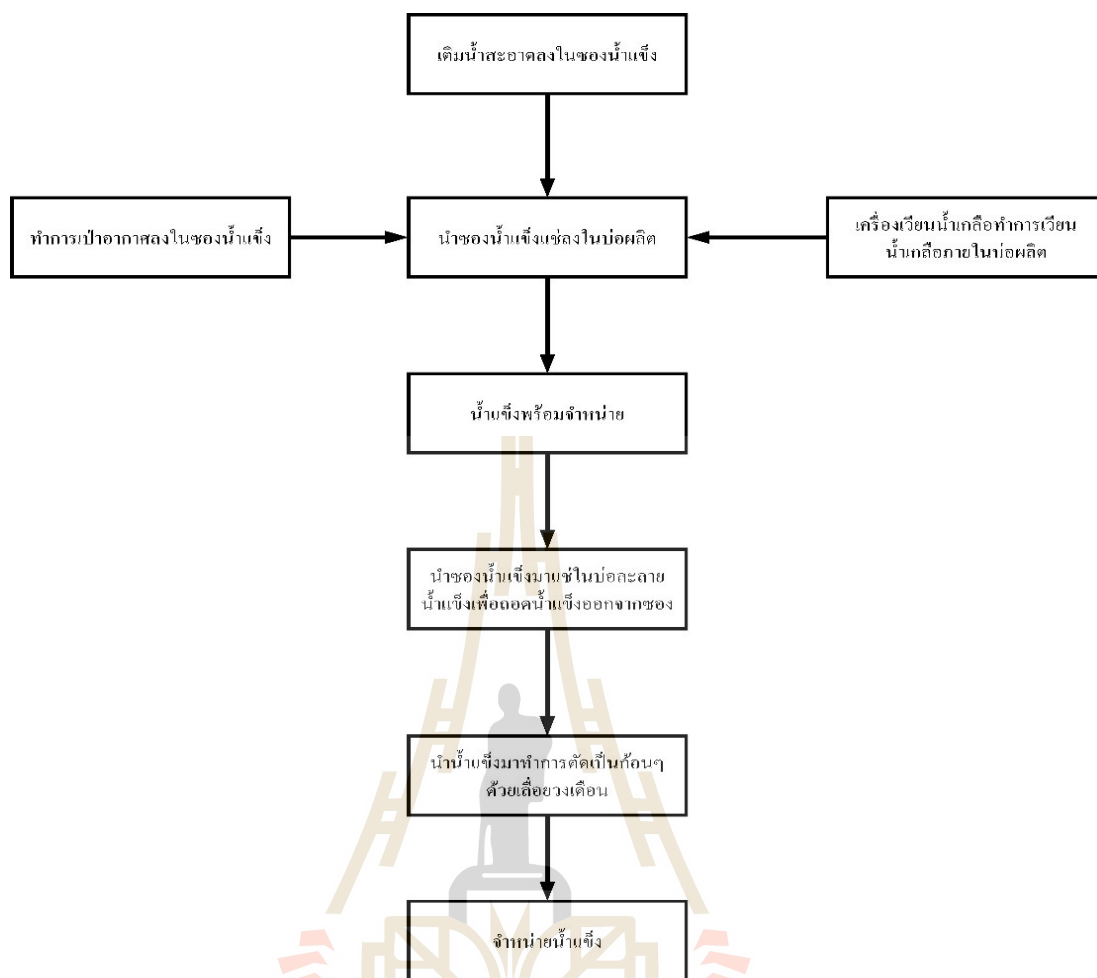
ภายหลังจากการจำหน่ายโดยที่จะทำการหยุดเป่าลมแล้วจะนำท่อลมออกจากช่องน้ำแข็งเมื่อเกิดน้ำแข็งบริสุทธิ์ประมาณ 50 % ของปริมาณน้ำภายในช่อง ในระหว่างที่น้ำภายในช่องถูกทำความเย็นโดยน้ำเกลือจะต้องมีการทำให้น้ำเกลือภายในบ่อผลิตมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาเพื่อที่จะทำให้น้ำเกลือภายในบ่อผลิตแต่ละตำแหน่งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน โดยจะใช้เครื่องเวียนน้ำเกลือที่มีลักษณะเหมือนใบพัดเพื่อที่จะกวนน้ำเกลือให้ไหลเวียนไปรอบๆ บ่อผลิต

เมื่อเวลาผ่านไปน้ำภายในช่องน้ำแข็งที่ถูกทำความเย็นด้วยน้ำเกลือตลอดเวลา ก็จะเริ่มแข็งตัวกลายเป็นน้ำแข็งบริสุทธิ์ที่พร้อมจำหน่าย โดยเมื่อถึงเวลาจำหน่ายก็จะใช้ครนไฟฟ้ายกของน้ำแข็งที่มีน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายออกมาจากบ่อผลิตมาทำการแช่ลงในบ่อละลายน้ำแข็ง โดยที่บ่อละลายน้ำแข็งจะมีน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแช่อยู่ในบ่อ เมื่อช่องน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจึงแวดล้อมถูกนำมาแช่จึงทำให้ผิวของน้ำแข็งที่สัมผัสกับผนังของน้ำแข็งเกิดการละลาย หลังจากนั้นก็ทำการเอาช่องน้ำแข็งที่ผ่านการละลายน้ำแข็งมาแล้ว นำไปถอดน้ำแข็งออกจากช่องที่เครื่องถอดน้ำแข็งซึ่งมีลักษณะลาดเอียงจึงสามารถถอดน้ำแข็งออกจากช่องได้ หลังจากนั้นจึงนำไปตัดเป็นก้อนตามที่ต้องการด้วยเลื่อยวงเดือน หลังจากนั้นก็นำช่องน้ำแข็งที่ถูกถอดเอาน้ำแข็งออกไปแล้วไปเติมน้ำสะอาดแล้วนำกลับไปแช่ลงในบ่อน้ำเกลือเพื่อทำความเย็นอีกครั้งเป็นอันสิ้นสุดขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งของ โดยรูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งของ รูปที่ 3.10 แสดงช่องน้ำแข็ง รูปที่ 3.11 แสดงท่อลมเป่าน้ำภายในช่อง รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องเวียนน้ำเกลือ รูปที่ 3.13 แสดงครนยกของน้ำแข็ง รูปที่ 3.14 แสดงบ่อละลายน้ำแข็งของ รูปที่ 3.15 แสดงเครื่องถอดน้ำแข็งและรูปที่ 3.16 แสดงเลื่อยวงเดือน

3.1.3 กระบวนการทำความเย็นสำหรับการผลิตน้ำแข็งของ

กระบวนการทำความเย็นสำหรับการผลิตน้ำแข็งของนั้นใช้หลักการการทำงานด้วยวัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor-Compression Refrigeration Cycle) โดยมีสารทำความเย็นเป็นแอมโมเนีย (NH_3) โดยสามารถอธิบายกระบวนการทำความเย็นได้ดังรูปที่ 3.17 ซึ่งในกระบวนการทำความเย็นมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความเย็นดังนี้

คอมเพรสเซอร์ (Compressor) รูปที่ 3.18 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพิ่มแรงดันของสารทำความเย็นที่ออกจากแอกคิวลิวเลเตอร์สถานะ ไออิ่มตัว (Saturated Vapor) ความดันต่ำให้เปลี่ยนสถานะเป็นสารทำความเย็นสถานะ ไอยิ่งยวด (Superheated) ความดันสูง โดยคอมเพรสเซอร์นี้มีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังและใช้น้ำในการระบายความร้อน



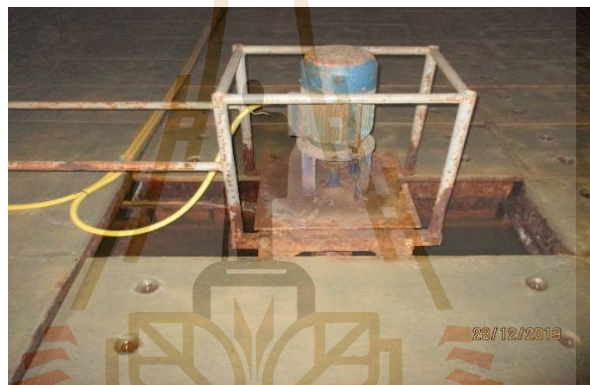
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งซอง



รูปที่ 3.10 ซองน้ำแข็ง



รูปที่ 3.11 ท่อลมเป่าน้ำภายในช่อง



รูปที่ 3.12 เครื่องเวียนน้ำเกลือ



รูปที่ 3.13 เคนนยกของน้ำแข็ง



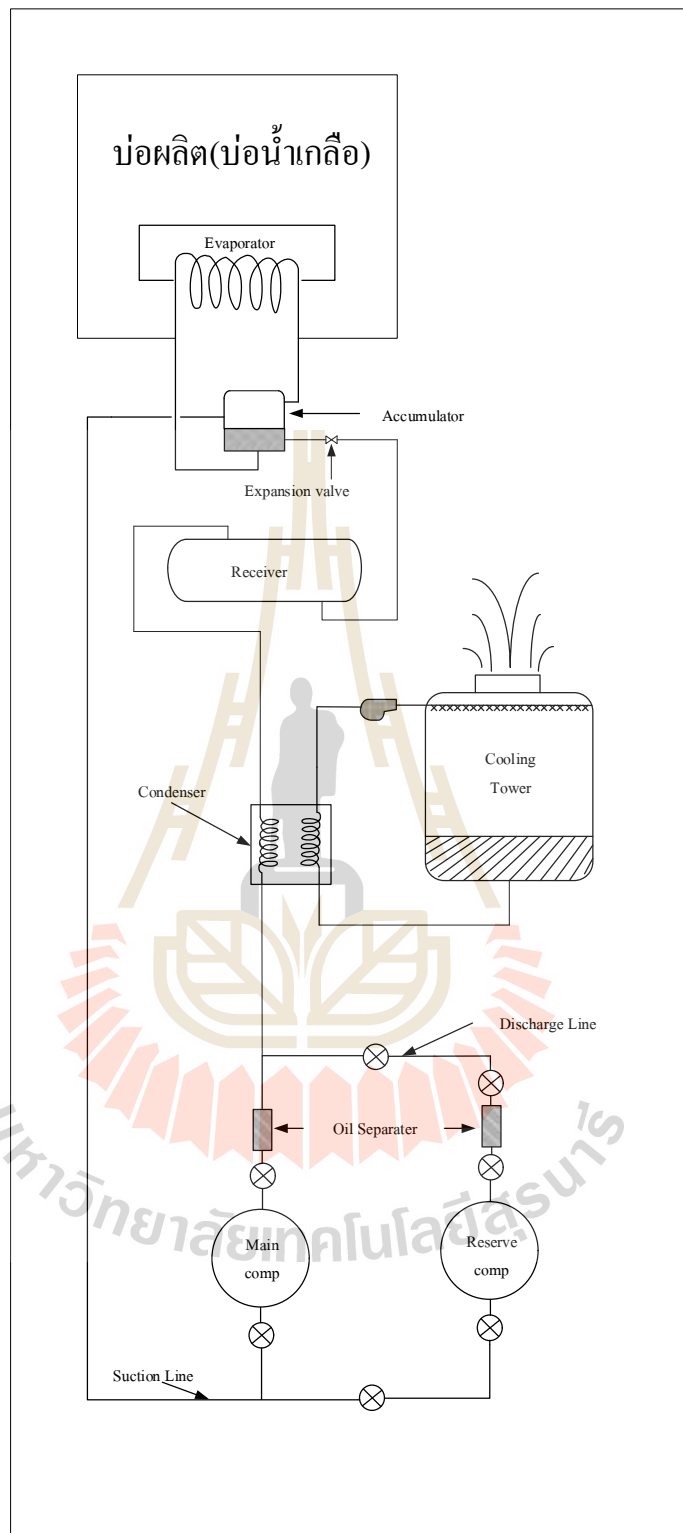
รูปที่ 3.14 ปอละลายน้ำแข็งของ



รูปที่ 3.15 เครื่องถอดน้ำแข็ง



รูปที่ 3.16 เลื่อยวงเดือน



รูปที่ 3.17 กระบวนการทำความเย็นสำหรับการผลิตน้ำแข็งของ



รูปที่ 3.18 คอมเพรสเซอร์ (Compressor)

เครื่องแยกน้ำมันหล่อลื่น (Oil Separator) รูปที่ 3.19 แสดงอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ระหว่างท่อสารทำความเย็นที่ออกจากคอมเพรสเซอร์กับเครื่องควบแน่น ทำหน้าที่แยกน้ำมันหล่อลื่นออกจากสารทำความเย็นไม่ให้เข้าไปในเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย



รูปที่ 3.19 เครื่องแยกน้ำมันหล่อลื่น (Oil Separator)

เครื่องควบแน่น (Condenser) รูปที่ 3.20 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน โดยทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำภายในเครื่องควบแน่น ซึ่งจะช่วยให้สารทำความเย็นสถานะไอยิ่งยวดความดันสูงที่ออกจากคอมเพรสเซอร์กลายเป็นสารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัวความดันสูงในส่วนของน้ำที่รับความร้อนจากสารทำความเย็น

จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งจะถูกนำไปลดอุณหภูมิที่หอผึ่งเย็น และสารทำความเย็นหลังจากที่เปลี่ยนสถานะแล้วก็จะเข้าสู่ถังเก็บสารทำความเย็น



รูปที่ 3.20 เครื่องควบแน่น (Condenser)

หอผึ่งเย็น (Cooling tower) รูปที่ 3.21 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้อากาศจากสิ่งแวดล้อมเป็นตัวระบายความร้อนโดยทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำที่ออกจากเครื่องควบแน่นกับอากาศ ซึ่งจะทำให้ น้ำที่มีอุณหภูมิสูงมีอุณหภูมิลดลงเพื่อที่จะนำน้ำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องควบแน่น



รูปที่ 3.21 หอผึ่งเย็น (Cooling Tower)

ถังเก็บสารทำความเย็น (Refrigerant Receiver) รูปที่ 3.22 แสดงถึงลักษณะทรงกระบอกยาวขนาดใหญ่ทำหน้าที่รับสารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัวจากเครื่องควบแน่นมาเก็บไว้เพื่อรอส่งต่อไปยังวาล์วลดความดัน และยังเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้สารทำความเย็นที่ออกจากถังเก็บสารทำความเย็นมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวที่แน่นอน อีกทั้งยังมีหน้าที่กักเก็บสารทำความเย็นที่อยู่ในระบบทั้งหมดขณะที่ทำการซ่อมบำรุง โดยถังเก็บสารทำความเย็นจะถูกติดตั้งไว้ในส่วนล่างสุดของเครื่องควบแน่น เพื่อที่จะทำให้สารทำความเย็นที่ควบแน่นแล้วไม่คงค้างภายในเครื่องควบแน่น โดยอาศัยน้ำหนักของสารทำความเย็นที่เป็นของเหลวไหลเข้าสู่ถังที่อยู่ต่ำกว่า



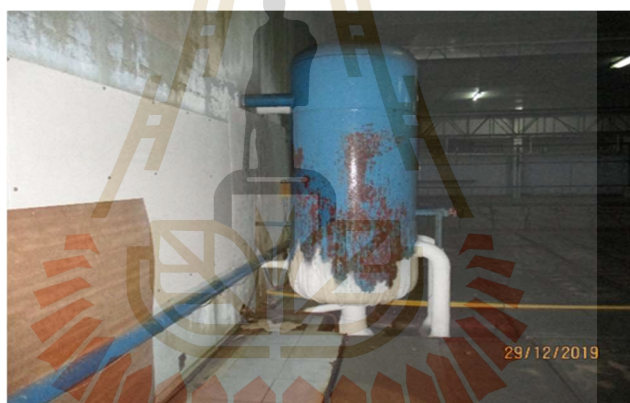
รูปที่ 3.22 ถังเก็บสารทำความเย็น (Refrigerant Receiver)

วาล์วลดความดัน (Expansion Valve) รูปที่ 3.23 แสดงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ลดความดันของสารทำความเย็นที่ออกจากถังเก็บสารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัวความดันสูงให้เป็นสารทำความเย็นสถานะสารผสมของเหลวและไออิ่มตัว (Saturated liquid-Vapor mixture) ความดันต่ำก่อนที่จะเข้าสู่แอกคิวมูเลเตอร์



รูปที่ 3.23 วาล์วลดความดัน (Expansion Valve)

แอกคิวมูเลเตอร์ (Accumulator) รูปที่ 3.24 และ รูปที่ 3.25 แสดงอุปกรณ์สำคัญที่ทำหน้าที่แยกสถานะของสารทำความเย็นที่จะเข้าสู่เครื่องทำระเหยกับที่จะออกสู่คอมเพรสเซอร์ มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกวางตั้งอยู่ระหว่าง วาล์วลดความดัน เครื่องทำระเหย และคอมเพรสเซอร์ อาศัยการทำงานโดยใช้น้ำหนักของสารทำความเย็น เมื่อสารทำความเย็นที่ออกจากวาล์วลดความดันมีสถานะเป็นสารผสมของเหลวและไออีมตัว (หมายเลข 1 ในรูปที่ 3.25) จึงทำให้สารทำความเย็นที่เข้าสู่แอกคิวมูเลเตอร์มี 2 สถานะ ทั้งของเหลวอีมตัวและไออีมตัว สารทำความเย็นที่เป็นของเหลวจะมีน้ำหนักมากกว่าส่วนที่เป็นไอจึงไหลลงสู่ส่วนล่างของแอกคิวมูเลเตอร์ (หมายเลข 2 ในรูปที่ 3.25) ส่วนสารทำความเย็นที่เป็น ไอจะลอยสูงขึ้นอยู่ส่วนบนของแอกคิวมูเลเตอร์ (หมายเลข 3 ในรูปที่ 3.25) จึงทำให้เป็นการป้องกันสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นของเหลวอีมตัวไหลเข้าสู่คอมเพรสเซอร์ และทำให้สารทำความเย็นที่เข้าสู่เครื่องทำระเหยมีสถานะเป็นของเหลวอีมตัวอย่างแน่นอน



รูปที่ 3.24 แอกคิวมูเลเตอร์ (Accumulator)

เครื่องทำระเหย (Evaporator) รูปที่ 3.25 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำภายในชองน้ำแข็ง ซึ่งมีน้ำเกลือภายในบ่อผลิตเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถอธิบายได้ว่าน้ำภายในชองน้ำแข็งจะถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิต และน้ำเกลือภายในบ่อผลิตก็จะถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำความเย็นในเครื่องทำระเหยอีกครั้งหนึ่ง โดยลักษณะของเครื่องทำระเหยจะมีท่อสารทำความเย็นอยู่ 2 ระดับ โดยอยู่ที่พื้นของบ่อผลิต กับ อยู่ใต้ฝาปิดบ่อผลิต ซึ่งจะมีท่อขนาดเล็กจำนวนมากเชื่อมต่อกับท่อที่อยู่ 2 ระดับนี้ โดยท่อที่อยู่ที่พื้นบ่อผลิตจะเป็นท่อที่สารทำความเย็นสถานะของเหลวอีมตัวมารับความร้อนที่น้ำเกลือถ่ายเทให้แล้วสารทำความเย็นก็จะค่อยๆ ระเหยกลายเป็นไออีมตัวผ่านท่อขนาดเล็ก

ไปยังท่อที่อยู่ใต้ฝาปิดบ่อผลิตซึ่งจะกลับเข้าสู่แอกคิวมูเลเตอร์เพื่อทำการแยกสถานะของสารทำความเย็น โดยสารทำความเย็นที่ยังเป็นของเหลวอิ่มตัวก็จะกลับมารับความร้อนกับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตต่อ ส่วนที่เป็นไออิ่มตัวก็จะถูกคอมเพรสเซอร์ดูดเข้าไปเพิ่มแรงดัน และทำงานเป็นวัฏจักรเช่นนี้ต่อไป

3.2 การวิเคราะห์กระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

ในการวิเคราะห์กระบวนการผลิตน้ำแข็งของนั้นเป็นระบบเปิด (Open System) โดยมีการถ่ายพลังงานในรูปแบบของความร้อนและมีการถ่ายโอนมวลผ่านขอบเขตของระบบ หรือที่เรียกว่า ปริมาตรควบคุม (Control Volume, CV) โดยขอบเขตของระบบนั้นขึ้นอยู่กับปริมาตรควบคุมที่สนใจศึกษา โดยกลไกการถ่ายเทพลังงานของปริมาตรควบคุมสามารถวิเคราะห์ได้โดยกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสังเขปดังนี้

3.2.1 ทฤษฎีและหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้อง

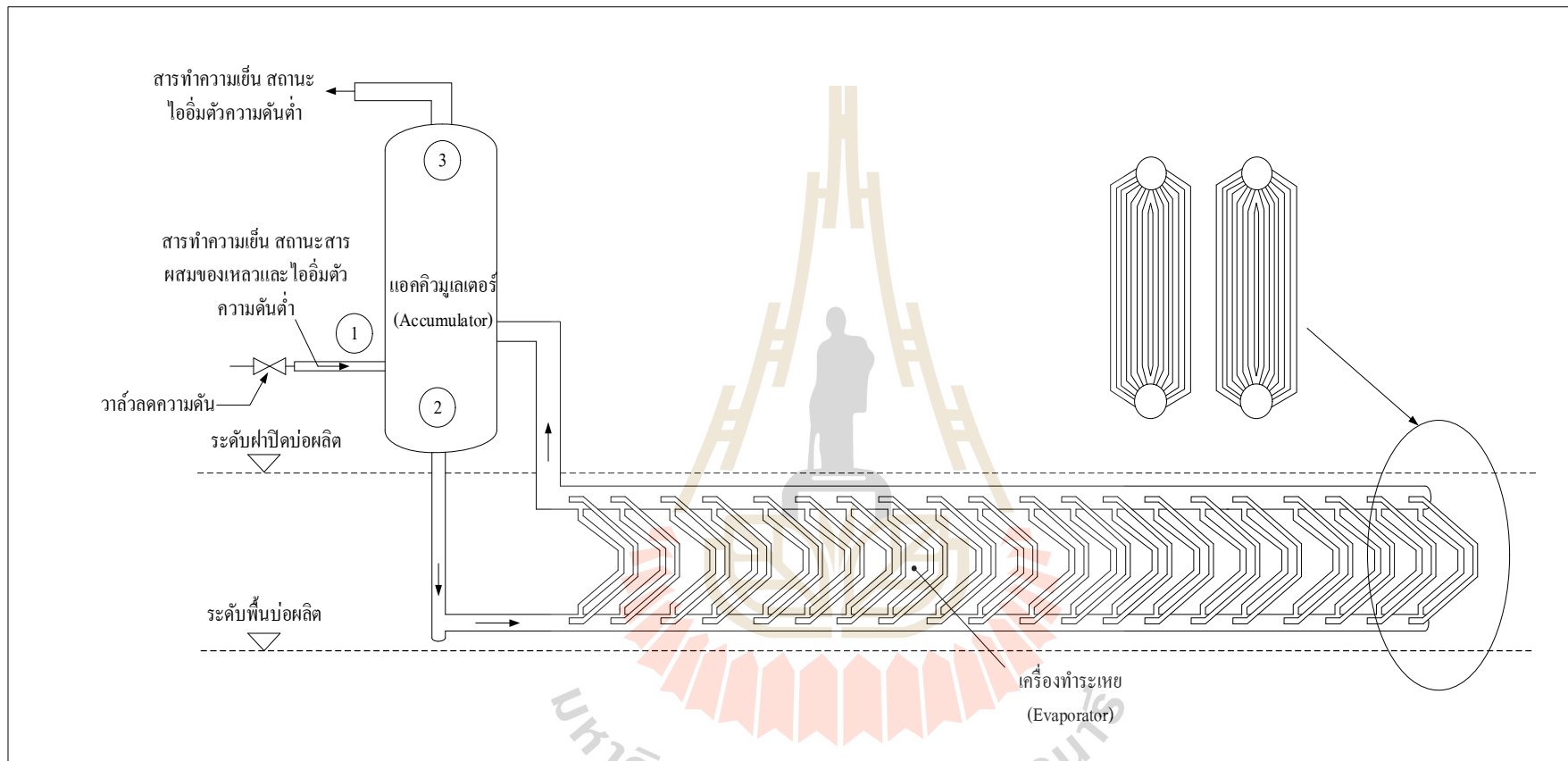
กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass)

มวลภายในระบบเปิดหรือปริมาตรควบคุมจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมวลที่เข้าระบบแตกต่างจากมวลที่ออกจากระบบ กล่าวคือเมื่อมวลที่เข้าระบบมากกว่ามวลที่ออกจากระบบจะทำให้มวลภายในระบบจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่มวลที่เข้าระบบน้อยกว่ามวลที่ออกจากระบบจะทำให้มวลภายในของระบบลดลง มวลของระบบที่เปลี่ยนไปจะเท่ากับผลต่างระหว่างมวลที่เข้าระบบและออกจากระบบนั้น หลักการดังกล่าวเรียกว่า กฎการอนุรักษ์มวล และสามารถแสดงได้ดังสมการนี้

$$\sum m_{in} - \sum m_{out} = \Delta m_{cv} \quad (3.1)$$

ซึ่ง

$\sum m_{in}$	แทน	ผลรวมของมวลที่เข้าระบบ (kg)
$\sum m_{out}$	แทน	ผลรวมของมวลที่ออกจากระบบ (kg)
Δm_{cv}	แทน	การเปลี่ยนแปลงมวลภายในระบบ (kg)



รูปที่ 3.25 เครื่องทำระเหย (Evaporator) และ แอคคิวมิวเลเตอร์ (Accumulator)

กฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy)

ถ้าพิจารณาอิทธิพลที่มีต่อระบบจากการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมจากหลักการอนุรักษ์พลังงานสามารถพิจารณาได้ว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมของระบบเกิดจากการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม โดยรูปแบบของพลังงานที่ระบบเปิดหรือปริมาตรควบคุมถ่ายเทกับสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย 3 รูปแบบคือ 1. พลังงานรูปแบบความร้อน 2. พลังงานรูปแบบงาน 3. พลังงานจากการถ่ายเทมวลระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมวลที่เข้าระบบและมวลที่ออกจากระบบมีการไหล ดังนั้นพลังงานสุทธิของมวลเหล่านั้นจะประกอบด้วยพลังงานรวมและงานเนื่องจากการไหลของมวลเหล่านั้น ถ้าพิจารณาพลังงานสุทธิของมวลเข้าระบบจะได้ดังสมการนี้

$$E_{mass,in} = E_{in} + W_{flow,in} \quad (3.2)$$

ซึ่ง

$E_{mass,in}$	แทน	พลังงานในมวลที่มีการไหลเข้าสู่ระบบ
E_{in}	แทน	พลังงานรวมของมวลที่เข้าสู่ระบบ ($U_{in} + KE_{in} + PE_{in}$)
$W_{flow,in}$	แทน	งานเนื่องจากการไหลของมวลที่เข้าสู่ระบบ ($W_{flow,in} = P_{in} V_{in}$)
P_{in}	แทน	ความดันของมวลที่เข้าระบบ
V_{in}	แทน	ปริมาตรของมวลที่เข้าระบบ

ดังนั้น

จากความสัมพันธ์ของเอนทาลปี ($H_{in} = U_{in} + P_{in} V_{in}$) ดังนั้นจึงสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้

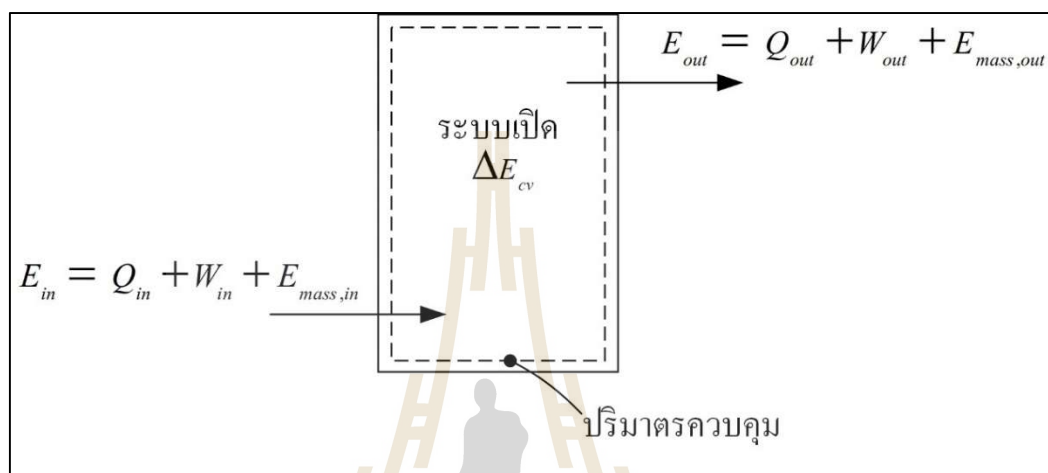
$$E_{mass,in} = H_{in} + KE_{in} + PE_{in} \quad (3.3)$$

ซึ่ง

H_{in} แทน เอนทาลปีของมวลที่เข้าระบบ

เมื่อพิจารณามวลที่ออกจากระบบในทำนองเดียวกัน จะทำให้ได้พลังงานสุทธิของมวลที่ออกจากระบบดังนี้

$$E_{mass,out} = H_{out} + KE_{out} + PE_{out} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.26 การถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบเปิดและสิ่งแวดล้อม

รูปที่ 3.26 แสดงการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบเปิดและสิ่งแวดล้อม ผลของการถ่ายเทพลังงานจะทำให้พลังงานรวมของระบบเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมของระบบ (ΔE_{cv}) เกิดจากความแตกต่างของพลังงานทั้งหมดที่เข้าระบบและพลังงานที่ออกจากระบบ กล่าวคือ

$$\left[\begin{array}{l} Q_{in} + W_{in} \\ + \sum (H_{in} + KE_{in} + PE_{in}) \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} Q_{out} + W_{out} \\ + \sum (H_{out} + KE_{out} + PE_{out}) \end{array} \right] = \Delta E_{cv} \quad (3.5)$$

เครื่องหมาย (Σ) แทน ผลรวมในแต่ละช่องทางเข้าและช่องทางออกของระบบ และถ้าให้ (m_{in}) แทน มวลที่เข้าระบบ และ (m_{out}) แทน มวลที่ออกจากระบบ และ (KE) แทน พลังงานจลน์ ($KE = mv^2/2$) และ (PE) แทน พลังงานศักย์ ($PE = mgz$) ส่วนการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมของระบบจะประกอบไปด้วย การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบ (ΔU_{cv})

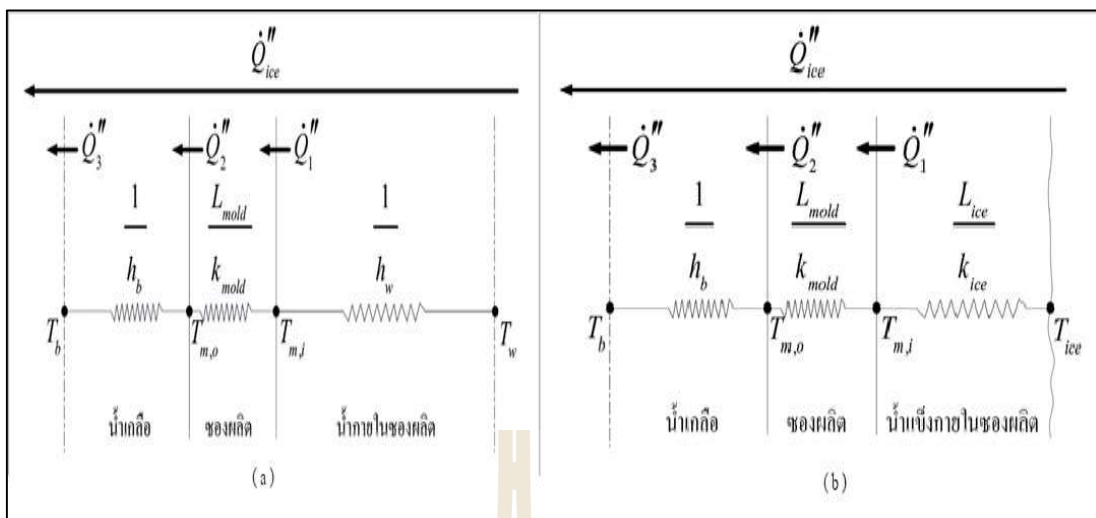
การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของระบบ (ΔKE_{cv}) การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ของระบบ (ΔPE_{cv}) ซึ่งจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\left[\begin{array}{l} (Q_{in} - Q_{out}) - (W_{out} - W_{in}) \\ + \sum m_{in} \left(h_{in} + \frac{v_{in}^2}{2} + gz_{in} \right) \\ - \sum m_{out} \left(h_{out} + \frac{v_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) \end{array} \right] = [\Delta U_{cv} + \Delta KE_{cv} + \Delta PE_{cv}] \quad (3.6)$$

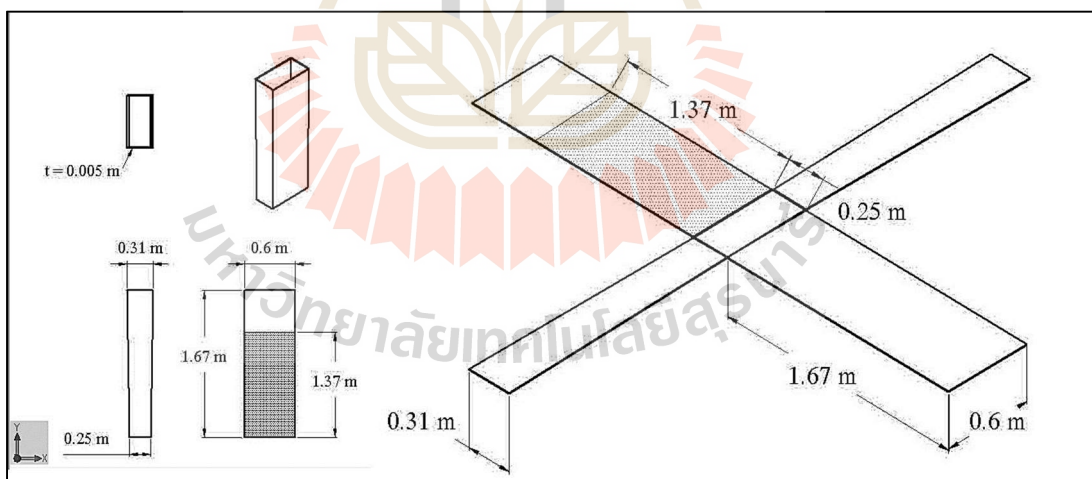
กลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในของกับน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในของกับน้ำเกลือจะเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิน้ำเกลือกับน้ำภายในของมีความแตกต่างกันเนื่องจากความร้อนจะถ่ายเทจากสสารที่มีอุณหภูมิสูงไปที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ ดังนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากน้ำภายในของผลิตให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิต โดยรูปที่ 3.27 แสดงกลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในของผลิตกับน้ำเกลือภายในบ่อผลิต เมื่อทำการพิจารณาน้ำภายในของผลิตขณะที่มีสถานะเป็นของเหลวจะเกิดการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการพาความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำภายในของผลิต จนกระทั่งน้ำภายในของผลิตเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง จะทำให้อุณหภูมิของน้ำมีค่าคงที่ เท่ากับ 0°C จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำภายในของผลิต แต่จะเกิดผิวน้ำแข็งขึ้นบริเวณผิวของน้ำแข็งทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของการนำความร้อน และของน้ำแข็งก็จะรับความร้อนจากน้ำภายในของผลิตในรูปแบบของการนำความร้อนถ่ายเทให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิต และน้ำเกลือก็จะรับความร้อนจากของน้ำแข็งในรูปแบบของการพาความร้อนถ่ายเทให้กับสารทำความเย็นในเครื่องทำระเหย ในขณะที่เดินเครื่องทำความเย็น โดยงานวิจัยนี้มีสมมติฐานในการวิเคราะห์กระบวนการผลิตน้ำแข็งของดังนี้

1. พิจารณากลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในของกับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตให้เป็นแบบ 1 มิติ เนื่องจากกลไกการก่อตัวของน้ำภายในของเกิดขึ้นในรูปแบบ 3 มิติ โดยน้ำแข็งจะเกิดขึ้นแบบสมมาตรภายในของผลิต ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการวิเคราะห์ จึงพิจารณาให้เป็นรูปแบบ 1 มิติ โดยให้สมมติฐานว่าความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นนั้นเกิดเพียงด้านเดียวของของน้ำแข็งวิเคราะห์ได้โดยการหาปริมาตรของของน้ำแข็งและทำการคลี่ของน้ำแข็งเพื่อหาพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนนำไปสู่การหาค่าความหนาเสมือนของน้ำแข็งที่เกิดขึ้น (L_{ice})



รูปที่ 3.27 (a) กลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในช่องกับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตขณะที่น้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของเหลว
 (b) กลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในช่องกับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตขณะที่น้ำภายในช่องเริ่มเกิดน้ำแข็ง



รูปที่ 3.28 พิกัดของช่องผลิตในรูปแบบ 3 มิติและพิกัดของช่องผลิตในรูปแบบ 1 มิติ

ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.28 แสดงพิกัดของช่องผลิตในรูปแบบ 3 มิติและพิกัดของช่องผลิตในรูปแบบ 1 มิติ และวิเคราะห์หาความหนาเสมือนของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นได้ดังสมการดังนี้

พิจารณาสมการความหนาแน่นของสสารจะได้

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.7)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ดังนี้

$$m = \rho V \quad (3.8)$$

เนื่องจาก $V=AL$ จึงสามารถจัดรูปสมการเพื่อหาความหนาเสมือนของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$L_{ice} = \frac{m_{block-ice}}{\rho_{ice} A_{block-ice}} \quad (3.9)$$

ซึ่ง

L_{ice}	แทน	ความหนาเสมือนของน้ำแข็งที่เกิดขึ้น (m)
$m_{block-ice}$	แทน	มวลของน้ำภายในผลิต (kg)
ρ_{ice}	แทน	ความหนาแน่นของน้ำแข็ง (kg/m^3)
$A_{block-ice}$	แทน	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของช่องน้ำแข็งในรูปแบบ 1 มิติ (m^2)

2. พิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของช่องผลิตและผนังน้ำแข็งที่เกิดขึ้นเป็นสถานะคงตัว (Steady State) คือไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในขณะที่ทำการวิเคราะห์เนื่องจากช่องผลิตมีลักษณะเป็นผิวบางจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่าน้อยมากถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและผนังน้ำแข็งที่เกิดขึ้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวลของผนังน้ำแข็งและมีอุณหภูมิคงที่ เท่ากับ 0°C

จากสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้นนำไปสู่การวิเคราะห์กลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในช่องผลิตและน้ำเกลือภายในบ่อผลิตจะเกิด 4 กลไกการถ่ายเทความร้อน ตามลำดับดังนี้

1. กลไกการพาความร้อนระหว่างน้ำภายในช่องผลิต (T_w) และ ผนังชั้นน้ำแข็ง (T_{ice})
2. กลไกการนำความร้อนระหว่างผนังชั้นน้ำแข็ง (T_{ice}) และ ผนังผิวของด้านใน ($T_{m,i}$)
3. กลไกการนำความร้อนระหว่างผนังผิวของด้านใน ($T_{m,i}$) และ ผนังผิวของด้านนอก ($T_{m,o}$)
4. กลไกการพาความร้อนระหว่างผนังผิวของด้านนอก ($T_{m,o}$) และ น้ำเกลือภายในบ่อผลิต (T_b)

พบว่าอัตราการความร้อนที่วัสดุต่างๆ จะเท่ากับอัตราการความร้อนที่วัสดุนั้นถ่ายเทให้กับวัสดุที่อยู่ถัดไป และเนื่องจากวัสดุทั้งหมดมีพื้นที่ผิวเท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้อัตราความร้อนต่อพื้นที่ที่ถ่ายเทผ่านวัสดุทั้ง 4 ชนิด มีขนาดเท่ากันด้วย จึงพิจารณาทั้ง 4 กลไกด้วยอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ด้วย \dot{Q}'' (W/m^2)

1. กลไกการพาความร้อนระหว่างน้ำภายในช่องผลิต (T_w) และผนังชั้นน้ำแข็ง (T_{ice})

การถ่ายเทความร้อนนี้เกิดจากกลไกการพาความร้อนเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำภายในช่อง (T_w) กับผนังชั้นน้ำแข็ง (T_{ice}) โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่สามารถหาได้ดังสมการนี้

$$\dot{Q}_1'' = \frac{T_w - T_{ice}}{\frac{1}{h_w}} \quad (3.10)$$

ซึ่ง

h_w	แทน	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่อง ($W/m^2 \cdot K$)
T_w	แทน	อุณหภูมิน้ำภายในช่อง ($^{\circ}C$)
T_{ice}	แทน	อุณหภูมิผิวน้ำแข็ง ($^{\circ}C$)

2. กลไกการนำความร้อนระหว่างผนังชั้นน้ำแข็ง (T_{ice}) และผนังผิวของด้านใน ($T_{m,i}$)

การถ่ายเทความร้อนนี้เกิดจากกลไกการนำความร้อนเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของผนังชั้นน้ำแข็ง (T_{ice}) และผนังผิวของด้านใน ($T_{m,i}$) โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่สามารถหาได้ดังสมการนี้

$$\dot{Q}_2'' = \frac{T_{ice} - T_{m,i}}{\frac{L_{ice}}{k_{ice}}} \quad (3.11)$$

ซึ่ง

L_{ice}	แทน	ความหนาเสมือนของน้ำแข็งที่เกิดขึ้น (m)
k_{ice}	แทน	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำแข็ง (W/m • k)
$T_{m,i}$	แทน	อุณหภูมิผนังผิวของด้านใน (°C)

3. กลไกการนำความร้อนระหว่างผนังผิวของด้านใน ($T_{m,i}$) และ ผนังผิวของด้านนอก ($T_{m,o}$)

การถ่ายเทความร้อนนี้เกิดจากกลไกการนำความร้อนเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของผนังผิวของด้านใน ($T_{m,i}$) และผนังผิวของด้านนอก ($T_{m,o}$) โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่สามารถหาได้ดังสมการนี้

$$\dot{Q}_3'' = \frac{T_{m,i} - T_{m,o}}{\frac{L_{mold}}{k_{mold}}} \quad (3.12)$$

ซึ่ง

L_{mold}	แทน	ความหนาของวัสดุของน้ำแข็ง (m)
k_{mold}	แทน	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุของน้ำแข็ง (W/m • k)
$T_{m,o}$	แทน	อุณหภูมิผนังผิวของด้านนอก (°C)

การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการนำความร้อนระหว่างผนังผิวของด้านในกับผนังผิวของด้านนอกเป็นสภาวะคงตัวเนื่องจากความหนาของผนังของผลิตภัณฑ์มีขนาดบางมากและอุณหภูมิระหว่างผนังผิวของด้านในกับผนังผิวของด้านนอกขณะที่ทำการวิเคราะห์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงทำให้ $\dot{Q}_1'' = \dot{Q}_2''$ ดังสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้น

4. กลไกการพาความร้อนระหว่างผนังผิวของด้านนอก ($T_{m,o}$) และน้ำเกลือภายในบ่อผลิต (T_b)

การถ่ายเทความร้อนนี้เกิดจากกลไกการพาความร้อนเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของผนังผิวของด้านนอก ($T_{m,o}$) และน้ำเกลือภายในบ่อผลิต (T_b) โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่สามารถหาได้ดังสมการนี้

$$\dot{Q}_4'' = \frac{T_{m,o} - T_b}{\frac{1}{h_b}} \quad (3.13)$$

ซึ่ง

h_b	แทน	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k}$)
T_b	แทน	อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ($^{\circ}\text{C}$)

เนื่องจากทั้ง 4 กลไกมีอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่เท่ากันทั้ง 4 กลไก จึงสามารถวิเคราะห์ทั้ง 4 กลไกการถ่ายเทความร้อนได้ดังสมการนี้

กรณีน้ำภายในช่องผลิตมีสถานะเป็นของเหลว

$$\dot{Q}_{ice}'' = \frac{T_w - T_b}{\left(\frac{1}{h_w} + \frac{L_{mold}}{k_{mold}} + \frac{1}{h_b} \right)} \quad (3.14a)$$

กรณีน้ำภายในช่องผลิตเริ่มเกิดน้ำแข็ง

$$\dot{Q}_{ice}'' = \frac{T_w - T_b}{\left(\frac{L_{ice}}{k_{ice}} + \frac{L_{mold}}{k_{mold}} + \frac{1}{h_b} \right)} \quad (3.14b)$$

ดังนั้นจะได้อัตราการความร้อนที่น้ำภายในช่องผลิตถ่ายเทให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตดังสมการนี้

กรณีน้ำภายในช่องผลิตมีสถานะเป็นของเหลว

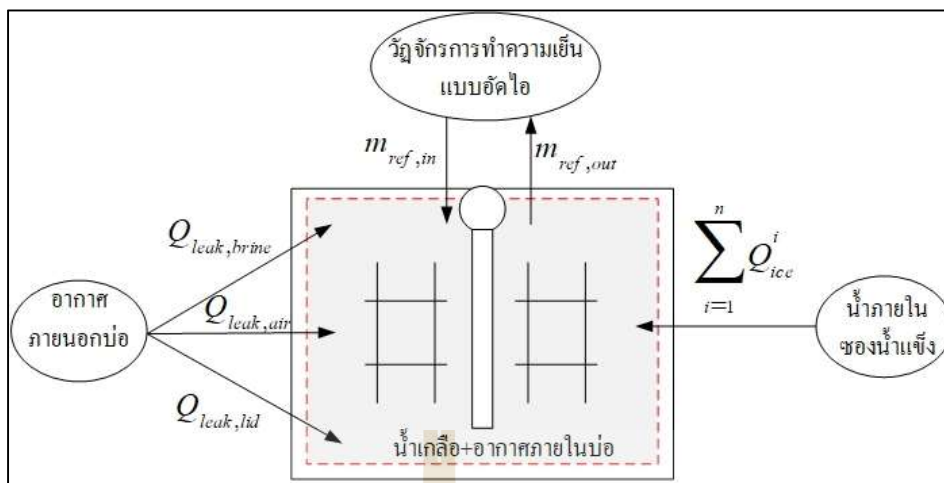
$$\dot{Q}_{ice} = \frac{A_{block-ice} (T_w - T_b)}{\left(\frac{1}{h_w} + \frac{L_{mold}}{k_{mold}} + \frac{1}{h_b} \right)} \quad (3.15a)$$

กรณีน้ำภายในช่องผลิตเริ่มเกิดน้ำแข็ง

$$\dot{Q}_{ice} = \frac{A_{block-ice} (T_w - T_b)}{\left(\frac{L_{ice}}{k_{ice}} + \frac{L_{mold}}{k_{mold}} + \frac{1}{h_b} \right)} \quad (3.15b)$$

สมดุลพลังงานของบ่อผลิตโดยให้น้ำเกลือภายในบ่อผลิตและอากาศภายในบ่อผลิตเป็น
ปริมาตรควบคุม

จากรูปที่ 3.29 แสดงสมดุลพลังงานของบ่อผลิต โดยให้น้ำเกลือภายในบ่อผลิตและอากาศภายในบ่อผลิตเป็นปริมาตรควบคุม เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการสมดุลพลังงานของบ่อผลิตโดยพิจารณาให้ระบบคือ น้ำเกลือ และอากาศภายในบ่อผลิต



รูปที่ 3.29 สมดุลพลังงานของบ่อผลิตโดยให้น้ำเกลือภายในบ่อผลิตและอากาศภายในบ่อผลิตเป็นปริมาณควบคุม

สมดุลพลังงานของระบบ

สมดุลพลังงานจากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{cv} \tag{3.16}$$

ซึ่ง

$$E_{in} = \left[(U + PV + KE + PE)_{ref,in} + \sum_{i=1}^n Q_{ice}^i + Q_{leak,total} \right] \tag{3.17}$$

$$E_{out} = \left[(U + PV + KE + PE)_{ref,out} \right] \tag{3.18}$$

$$\begin{aligned} \Delta E_{cv} &= \left[\Delta E_{brine} + \Delta E_{air} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \\ &= \left[(\Delta U + \Delta KE + \Delta PE)_{brine} + (\Delta U + \Delta KE + \Delta PE)_{air} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \end{aligned} \tag{3.19}$$

เนื่องจากภายในระบบไม่มีการเคลื่อนที่และไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ภายในระบบ (ΔKE) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ภายในระบบ (ΔPE) มีค่าเท่ากับ 0 และพิจารณาให้อัตราการไหลของสารทำความเย็นมีความเร็วคงที่และไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งจึงทำให้พลังงานจลน์ (KE) และพลังงานศักย์ (PE) ของสารทำความเย็นมีค่าเท่ากับ 0 และพิจารณาให้สารทำความเย็นมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในและมีการเคลื่อนที่จึงพิจารณาให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของสารทำความเย็นอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของเอนทาลปี (Enthalpy) (H) ซึ่ง ($H = U + PV$) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\left[\begin{array}{c} \left(H_{ref,in} + \sum_{i=1}^n Q_{ice}^i + Q_{leak,total} \right) \\ - (H_{ref,out}) \end{array} \right] = \left[(U_{t+\Delta t} - U_t)_{brine} + (U_{t+\Delta t} - U_t)_{air} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.20)$$

พิจารณาสมการใหม่ให้อยู่ในรูปจำเพาะ (Specific) ได้ดังนี้

$$\left[\begin{array}{c} \left(m_{ref,in} h_{ref,in} + \sum_{i=1}^n Q_{ice}^i \right) \\ + Q_{leak,total} - (m_{ref,out} h_{ref,out}) \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} (m_{t+\Delta t} u_{t+\Delta t} - m_t u_t)_{brine} \\ + (m_{t+\Delta t} u_{t+\Delta t} - m_t u_t)_{air} \end{array} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.21)$$

เนื่องจากมวลของสารทำความเย็นที่เข้าและออกจากระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวลของสารทำความเย็นจึงทำให้มวลของสารทำความเย็นที่เข้าและออกจากระบบเป็นค่าคงที่ อีกทั้งระบบที่พิจารณาเป็นระบบปิดทำให้ระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวลจึงทำให้มวลของน้ำเกลือและมวลของอากาศที่อยู่ในระบบเป็นค่าคงที่ จึงทำการสมมูลมวลของระบบได้ดังนี้

$$m_{ref,in} = m_{ref,out} = m_{ref} \quad (3.22)$$

$$m_{brine,t+\Delta t} = m_{brine,t} = m_{brine} \quad (3.23)$$

$$m_{air,t+\Delta t} = m_{air,t} = m_{air} \quad (3.24)$$

สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \dot{Q}_{ice}^i + \dot{Q}_{leak,total} \\ + (m_{ref} (h_{in} - h_{out})_{ref}) \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} (m_{brine} (u_{t+\Delta t} - u_t)_{brine}) \\ + (m_{air} (u_{t+\Delta t} - u_t)_{air}) \end{array} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.25)$$

เนื่องจากมวลของน้ำเกลือภายในระบบมีมากกว่ามวลของอากาศแบบมีนัยสำคัญ จึงพิจารณาให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของอากาศมีค่าน้อยมาก จึงพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบของน้ำเกลือเพียงอย่างเดียว และน้ำเกลือที่พิจารณาเป็นของเหลวอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ซึ่งจะสามารถจัดรูปสมการของการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบได้ดังนี้

$$\left[\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{ice}^i + \dot{Q}_{leak,total} + (m_{ref} (h_{in} - h_{out})_{ref}) \right] = \left[(m_b c_b (T_{b,t+\Delta t} - T_{b,t})) \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.26)$$

พิจารณาให้อยู่ในรูปของหน่วยเวลาจึงสามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\left[\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{ice}^i + \dot{Q}_{leak,total} + (\dot{m}_{ref} (h_{in} - h_{out})_{ref}) \right] = \frac{1}{\Delta t} \left[(m_b c_b (T_{b,t+\Delta t} - T_{b,t})) \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.27)$$

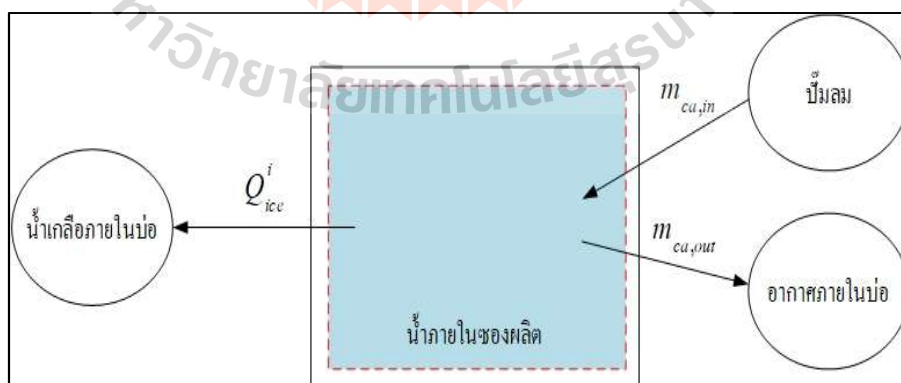
เนื่องจากในเทอมของ $\dot{m}_{ref} (h_{in} - h_{out})_{ref}$ คือพลังงานที่สารทำความเย็นกระทำกับระบบที่ทำการพิจารณาจึงกำหนดให้เป็นค่าคงที่คือ อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งซอง (\dot{Q}_{ref}) และสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\left[\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{ice}^i + \dot{Q}_{leak,total} - \dot{Q}_{ref} \right] = \frac{1}{\Delta t} \left[\left(m_b c_b (T_{b,t+\Delta t} - T_{b,t}) \right) \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.28)$$

ซึ่ง

$\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{ice}^i$	แทน	ผลรวมอัตราความร้อนที่น้ำภายในช่องถ่ายเทให้กับน้ำเกลือภายในระบบ (kW)
$\dot{Q}_{leak,total}$	แทน	อัตราความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อผลิต และฝาปิดบ่อผลิตสุทธิ (kW)
\dot{Q}_{ref}	แทน	อัตราการทำความเย็นของเครื่องผลิตน้ำแข็งช่อง (kW)
m_b	แทน	มวลของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต (kg)
c_b	แทน	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเกลือ (kJ/kg • K)
T_b	แทน	อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต (°C)
t	แทน	เวลาเริ่มต้น (sec)
$t + \Delta t$	แทน	เวลาเมื่อเวลาผ่านไป Δt (sec)
Δt	แทน	การเปลี่ยนแปลงเวลา (sec)

สมดุลพลังงานของน้ำภายในช่องผลิตโดยให้น้ำภายในช่องผลิตเป็นปริมาตรควบคุม



รูปที่ 3.30 สมดุลพลังงานและสมดุลมวลของน้ำภายในช่องผลิตโดยให้น้ำภายในช่องผลิตเป็นปริมาตรควบคุม

จากรูปที่ 3.30 แสดงสมดุลพลังงานและสมดุลมวลของน้ำภายในช่องผลิต โดยให้น้ำภายในช่องผลิตเป็นปริมาตรควบคุม เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการสมดุลพลังงานของน้ำภายในช่องผลิต โดยพิจารณาให้ระบบคือ น้ำภายในช่องผลิต

สมดุลพลังงานของระบบ

สมดุลพลังงานจากกฎ ข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{cv} \quad (3.16)$$

ซึ่ง

$$E_{in} = \left[(U + PV + KE + PE)_{ca,in} \right] \quad (3.29)$$

$$E_{out} = \left[(U + PV + KE + PE)_{ca,out} + Q_{ice}^i \right] \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \Delta E_{sys} &= \left[\Delta E_{block-ice} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \\ &= \left[(\Delta U + \Delta KE + \Delta PE)_{block-ice} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \end{aligned} \quad (3.31)$$

เนื่องจากภายในระบบไม่มีการเคลื่อนที่และไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ภายในระบบ (ΔKE) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ภายในระบบ (ΔPE) มีค่าเท่ากับ 0 และพิจารณาให้อัตราการไหลของลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิตมีความเร็วคงที่และไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งจึงทำให้พลังงานจลน์ (KE) และพลังงานศักย์ (PE) ของลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิตมีค่าเท่ากับ 0 และพิจารณาให้ลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิตมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในและมีการเคลื่อนที่จึงพิจารณาให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิตอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของเอนทัลปี (Enthalpy) (H) ซึ่ง ($H = U + PV$) จึงสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\left[H_{ca,in} \right] - \left[H_{ca,out} + Q_{ice}^i \right] = \left[\Delta U_{block-ice} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.32)$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของน้ำภายในของผลิตประกอบไปด้วย การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของน้ำและการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของน้ำแข็ง สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\left[H_{ca,in} \right] - \left[H_{ca,out} + Q_{ice}^i \right] = \left[(U_{t+\Delta t} - U_t)_w + (U_{t+\Delta t} - U_t)_{ice} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.33)$$

เนื่องจากมวลของลมอัดเป่าน้ำภายในของผลิตที่เข้าและออกจากระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวลจึงทำให้มวลของลมอัดเป่าน้ำภายในของผลิตที่เข้าและออกจากระบบเป็นค่าคงที่ อีกทั้งระบบที่พิจารณาเป็นระบบปิดทำให้ระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวลจึงทำให้มวลของน้ำภายในของผลิตที่อยู่ในระบบเป็นค่าคงที่ จึงทำการสมมูลมวลของระบบได้ดังนี้

$$m_{ca,in} = m_{ca,out} = m_{ca} \quad (3.34)$$

$$m_{block-ice,t+\Delta t} = m_{block-ice,t} = m_{block-ice} \quad (3.35)$$

และมวลของน้ำภายในของผลิตประกอบไปด้วยมวลของน้ำภายในของรวมกับมวลของน้ำแข็ง ได้ดังนี้

$$m_{block-ice} = m_{w,t+\Delta t} + m_{ice,t+\Delta t} \quad (3.36)$$

$$m_{block-ice} = m_{w,t} + m_{ice,t} \quad (3.37)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$m_{w,t+\Delta t} = m_{block-ice} - m_{ice,t+\Delta t} \quad (3.38)$$

$$m_{w,t} = m_{block-ice} - m_{ice,t} \quad (3.39)$$

พิจารณาสมการใหม่ให้อยู่ในรูปจำเพาะ (Specific) ได้ดังนี้

$$\left[m_{ca} \left(h_{ca,in} - h_{ca,out} \right)_{ca} - \dot{Q}_{ice}^i \right] = \left[\begin{array}{l} ((m_{block-ice} - m_{ice,t+\Delta t})u_{w,t+\Delta t})_w \\ -(m_{block-ice} - m_{ice,t})u_{w,t})_w \\ +(m_{ice,t+\Delta t}u_{ice,t+\Delta t} - m_{ice,t}u_{ice,t})_{ice} \end{array} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.40)$$

พิจารณาให้ลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิตเป็นแก๊สอุดมคติที่ความดันคงที่จึงมีแต่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิตและพิจารณาให้ลมอัดที่ออกจากท่อลมอัดจะถ่ายเทความร้อนกับน้ำภายในช่องผลิตโดยตรงจนเกิดสภาวะสมดุลทางความร้อน (Thermal Equilibrium) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ นั่นคือลมอัดจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำภายในช่องผลิตพอดีเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ จึงสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\left[m_{ca} c_{p,ca} \left(T_{ca,in} - T_w^i \right)_{ca} - \dot{Q}_{ice}^i \right] = \left[\begin{array}{l} ((m_{block-ice} - m_{ice,t+\Delta t})u_{w,t+\Delta t})_w \\ -(m_{block-ice} - m_{ice,t})u_{w,t})_w \\ +(m_{ice,t+\Delta t}u_{ice,t+\Delta t} - m_{ice,t}u_{ice,t})_{ice} \end{array} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.41)$$

พิจารณาให้อยู่ในรูปของหน่วยเวลาจึงสามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\left[\dot{m}_{ca} c_{p,ca} \left(T_{ca,in} - T_w^i \right)_{ca} - \dot{Q}_{ice}^i \right] = \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{l} ((m_{block-ice} - m_{ice,t+\Delta t})u_{w,t+\Delta t})_w \\ -(m_{block-ice} - m_{ice,t})u_{w,t})_w \\ +(m_{ice,t+\Delta t}u_{ice,t+\Delta t} - m_{ice,t}u_{ice,t})_{ice} \end{array} \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.42)$$

ซึ่ง

\dot{m}_{ca}	แทน	อัตราการไหลเชิงมวลของลมอัดเป่าน้ำภายในช่อง (kg/s)
$c_{p,ca}$	แทน	ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ของลมอัดเป่าน้ำภายในช่อง (kJ/kg • K)
$T_{ca,in}$	แทน	อุณหภูมิลมอัดเป่าน้ำภายในช่อง (°C)
T_w^i	แทน	อุณหภูมิของน้ำภายในช่อง (°C)
$m_{block-ice}$	แทน	มวลของน้ำแข็งช่อง (kg)
m_w	แทน	มวลของน้ำภายในช่อง (kg)
m_{ice}	แทน	มวลของน้ำแข็งภายในช่อง (kg)
u_w	แทน	พลังงานภายในจำเพาะของน้ำภายในช่องผลิต (kJ/kg)
u_{ice}	แทน	พลังงานภายในจำเพาะของน้ำแข็งภายในช่องผลิต (kJ/kg)
t	แทน	เวลาเริ่มต้น (sec)
$t + \Delta t$	แทน	เวลาเมื่อเวลาผ่านไป Δt (sec)
Δt	แทน	การเปลี่ยนแปลงเวลา (sec)

บทที่ 4

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

จากบทที่ 3 เมื่อทำการวิเคราะห์กระบวนการผลิตน้ำแข็งซองและทำการสมดุลพลังงาน สมดุลมวลจะนำไปสู่การสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง เพื่อนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการหารูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นและปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างในบ่อผลิตให้เหมาะสมเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยทำการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตและกลไกการก่อตัวของน้ำแข็ง ภายใต้กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นจริงของโรงงาน โดยแบบจำลองนั้นสามารถทำนายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองได้ เพื่อนำไปสู่การหารูปแบบการเดินเครื่องที่เหมาะสม ภายใต้กรณีศึกษาต่างๆ ที่ทำการศึกษา ด้วยวิธีการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization method) ด้วยวิธีกำหนดการพลวัต (Dynamics Programming) ในบทถัดไป

4.1 การสร้างแบบจำลองทางแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

จากสมการที่ 3.42 เมื่อทำการสมดุลพลังงานและสมดุลมวลแล้วจะทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วย ผลรวมอัตราความร้อนที่น้ำภายในช่องผลิตถ่ายเทให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิต อัตราความร้อนจากสิ่งแวดล้อมที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตสุทธิ อัตราการทำความเย็นของเครื่องผลิตน้ำแข็งซอง การเปลี่ยนแปลงเวลา มวลของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ค่าความจุความร้อนของน้ำเกลือ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต จากสมการที่ 3.28 เมื่อทำการสมดุลพลังงานและสมดุลมวลแล้วจะทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วย อัตราความร้อนที่น้ำภายในช่องผลิตถ่ายเทให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิต อัตราการไหลของลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิต ค่าความจุความร้อนของลมอัดเป่าน้ำภายในช่องที่ความดันคงที่ อุณหภูมิลมอัดเป่าน้ำภายในช่อง อุณหภูมิของน้ำภายในช่องผลิต การเปลี่ยนแปลงเวลา และการเปลี่ยนแปลงสภาวะของน้ำภายในช่องผลิต หลังจากทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วจะทำการจำแนกเป็นกลุ่มตัวแปรต่างๆ ได้ 3 กลุ่มด้วยกันคือ

1. กลุ่มตัวแปรอิสระคือตัวแปรที่ต้องการทำการศึกษา
2. ตัวแปรตามคือตัวแปรที่ได้จากผลของตัวแปรอิสระ
3. กลุ่มตัวแปรควบคุมหรือค่าคงที่ คือตัวแปรค่าคงที่ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรอิสระ ซึ่งสามารถสรุปกลุ่มตัวแปรได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1.1 จำแนกตัวแปรในการวิเคราะห์แบบจำลอง

ตัวแปรอิสระ

1. อุณหภูมิน้ำเกลือเมื่อเวลาผ่านไป : $T_{b,t+\Delta t}$
2. การเปลี่ยนแปลงของสภาวะของน้ำภายในช่อง : $U_{block-ice,t+\Delta t}$

ตัวแปรควบคุม

1. มวลของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต : m_b
2. ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเกลือ : c_b
3. อัตราความร้อนจากสิ่งแวดล้อมที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตสุทธิ : $\dot{Q}_{leak,total}$
4. อัตราการไหลโดยมวลของลมอัดเป่าน้ำภายในช่อง : \dot{m}_{ca}
5. ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของลมอัดเป่าน้ำภายในช่อง : $C_{p,ca}$
6. อุณหภูมิลมอัดเป่าน้ำภายในช่อง : T_{ca}
7. ความหนาวัสดุของน้ำแข็ง : L_{mold}
8. สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุของน้ำแข็ง : K_{mold}
9. สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำแข็ง : K_{ice}
10. พื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในช่องน้ำแข็งกับน้ำเกลือภายในบ่อผลิต : $A_{block-ice}$
11. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต : h_b
12. การเปลี่ยนแปลงเวลา : Δt

ตัวแปรตาม

1. ผลรวมอัตราความร้อนที่น้ำภายในช่องถ่ายเทให้กับน้ำเกลือภายในระบบ : $\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{ice}^i$
2. อัตราการทำความเย็นของเครื่องผลิตน้ำแข็งช่อง : \dot{Q}_{ref}
3. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องน้ำแข็ง : h_w^i
4. ความหนาเสมือนของน้ำแข็งที่เกิดขึ้น : $L_{ice,t}^i$
5. อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตเมื่อเวลาเริ่มต้น : $T_{b,t}$
6. อุณหภูมิน้ำภายในช่องเมื่อเวลาเริ่มต้น : $T_{w,t}^i$

4.1.2 ระบบสมการจากการสมดุลพลังงานและการสมดุลมวลสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

จากการวิเคราะห์กระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง ดังในบทที่ 3 จะนำไปสู่การสร้างระบบสมการเพื่อหา การเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำภายในซอง และ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเกลือ ได้ดังตารางที่ 4.1

4.2 การจำลองระบบทางความร้อนด้วยวิธีการแทนค่าแบบต่อเนื่อง

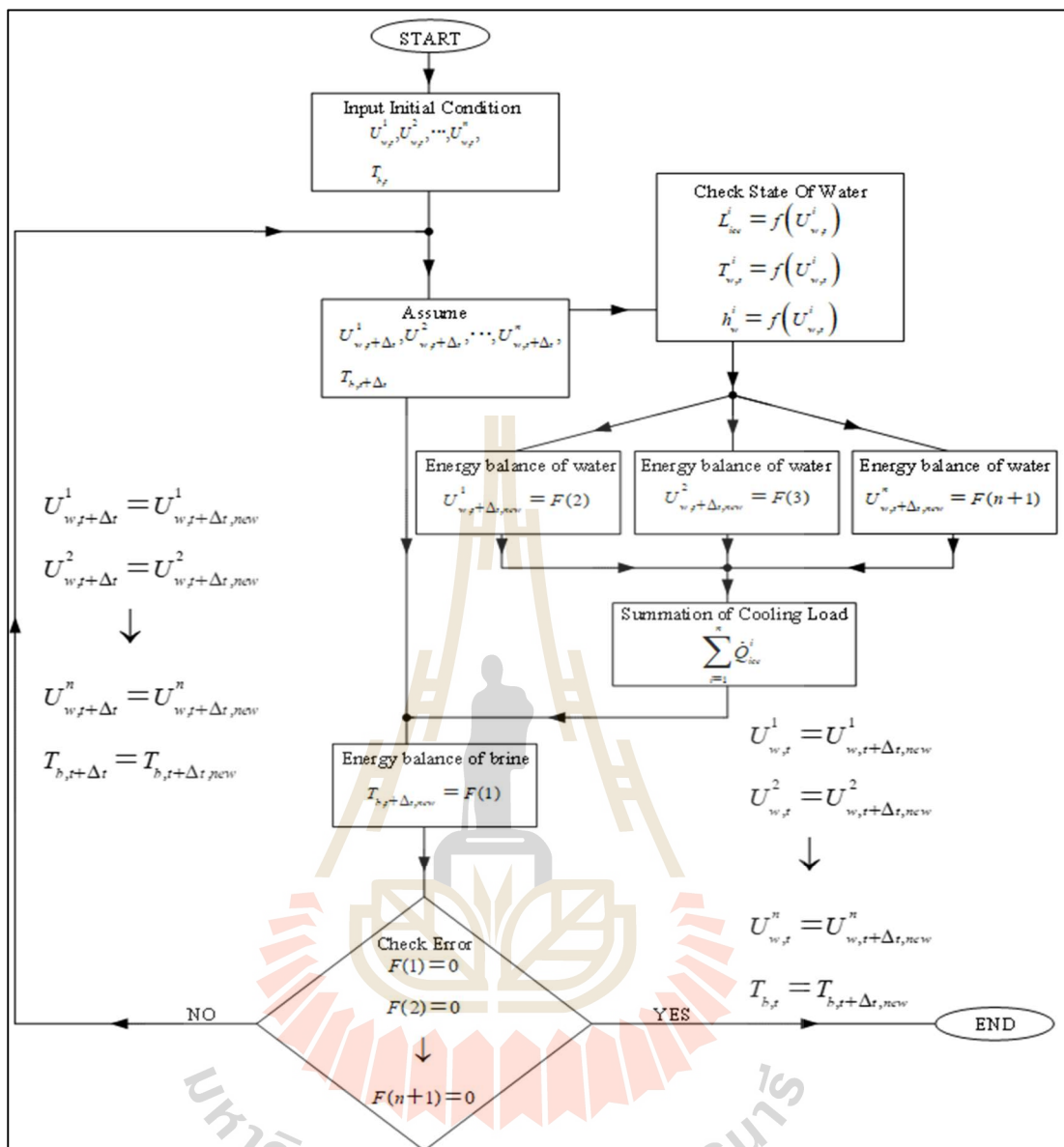
(Successive Substitution)

เนื่องจากระบบสมการที่ได้จากการสมดุลพลังงานและมวลของกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองจำเป็นต้องทราบสถานะของน้ำภายในซองเมื่อเวลาผ่านไป และ อุณหภูมิของน้ำเกลือเมื่อเวลาผ่านไป เพื่อจะทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเกลือ และ กลไกการก่อตัวของน้ำแข็งภายในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การจำลองระบบขึ้นมาช่วยแก้ระบบสมการให้สามารถแก้ปัญหาของระบบสมการนี้ได้ โดยวิธีการจำลองระบบทางความร้อนมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีนิวตัน-รัปสัน (Newton-Raphson) วิธีระบบสมการจะต้องสามารถหาค่าอนุพันธ์ (Differential) ได้ทุกสมการ ซึ่งจะเหมาะสมกับระบบที่เป็นสถานะคงตัว (Steady State) แต่ในงานวิจัยนี้เป็นระบบที่อยู่ในสถานะไม่คงตัว (Unsteady State) ดังนั้นจึงเป็นการยากและซับซ้อนในการแก้ปัญหาด้วยวิธี นิวตัน-รัปสัน ส่วนวิธีที่ 2 คือ วิธีการแทนค่าลำดับ (Sequential Simulation) เป็นการแทนค่าลำดับของตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา แต่งานวิจัยที่ทำการศึกษาย่างที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าเป็นระบบที่เป็นสถานะไม่คงตัว คือ มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระอยู่ตลอดเวลา วิธีนี้จึงไม่เหมาะสมเช่นกัน ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้คือวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง (Successive Substitution) เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องแทนค่าลำดับและระบบไม่จำเป็นต้องหาอนุพันธ์ได้ โดยมีหลักการคือการสุ่มค่าตัวแปรอิสระของระบบที่ทำการศึกษา ซึ่งก็คือ สถานะของน้ำภายในซองเมื่อเวลาผ่านไป และ อุณหภูมิของน้ำเกลือเมื่อเวลาผ่านไป แล้วแทนลงในระบบสมการผลลัพธ์ที่ได้คือ ค่าของตัวแปรอิสระค่าใหม่ เมื่อได้ค่าใหม่แล้วก็จะนำค่าใหม่ที่ได้ไปแทนค่าตัวแปรที่ทำการสุ่ม แล้วคำนวณซ้ำจนกว่าค่าที่ได้ใหม่จะไม่มี การเปลี่ยนแปลงหรืออยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ โดยสามารถอธิบายการลู่เข้าของค่าตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษาได้ดังตารางที่ 4.2 แสดงการลู่เข้าของค่าตัวแปรอิสระของกลุ่มตัวอย่างที่ทำการศึกษาคณ เวลาเริ่มต้น และแผนภาพความสัมพันธ์ของระบบสมการจากการสมดุลพลังงานและสมดุลมวล โดยรูปที่ 4.1 แสดง แผนภาพความสัมพันธ์ของระบบสมการจากการสมดุลพลังงานและสมดุลมวล

ตารางที่ 4.1 ระบบสมการจากการสมดุลพลังงานและสมดุลมวลของระบบสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

ฟังก์ชัน	ความสัมพันธ์
$F_1 = \left[\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{ice}^i + \dot{Q}_{icek,total} - \dot{Q}_{ref} \right] - \left[\frac{1}{\Delta t} (m_b c_b (T_{b,t+\Delta t} - T_{b,t})) \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} = 0 \quad (3.28)$	$F_1 = f \begin{pmatrix} T_{b,t} \\ T_{b,t+\Delta t} \end{pmatrix}$
$F_2 = \left[(\dot{m}_{ca} c_{p,ca} (T_{ca,in} - T_{w,t}^1)) - \dot{Q}_{ice}^1 \right] - \left[\frac{1}{\Delta t} (U_{block-ice,t+\Delta t}^1 - U_{block-ice,t}^1) \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} = 0 \quad (3.42)$	$F_2 = f \begin{pmatrix} T_{b,t} \\ T_{b,t+\Delta t} \\ U_{block-ice,t}^1 \\ U_{block-ice,t+\Delta t}^1 \end{pmatrix}$
<p style="text-align: center;">⋮</p>	<p style="text-align: center;">⋮</p>
$F_{n+1} = \left[(\dot{m}_{ca} c_{p,ca} (T_{ca,in} - T_{w,t}^n)) - \dot{Q}_{ice}^n \right] - \left[\frac{1}{\Delta t} (U_{block-ice,t+\Delta t}^n - U_{block-ice,t}^n) \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} = 0 \quad (3.42)$	$F_{n+1} = f \begin{pmatrix} T_{b,t} \\ T_{b,t+\Delta t} \\ U_{block-ice,t}^n \\ U_{block-ice,t+\Delta t}^n \end{pmatrix}$

* n คือ ชุดจำหน่ายน้ำแข็งซองที่อยู่ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง



รูปที่ 4.1 แผนภาพความสัมพันธ์ของระบบสมการจากการสมดุลพลังงานและสมดุลมวล

ตารางที่ 4.2 แสดงการลู่เข้าของค่าตัวแปรอิสระของกลุ่มตัวอย่างที่ทำการศึกษา ณ เวลาเริ่มต้น

Iteration	น้ำภายในของผลิต ตำแหน่งที่ 1	น้ำภายในของผลิต ตำแหน่งที่ 100	น้ำเกลือภายในป้อผลิต
1	1019.171	48.61644	0.352326
2	0.518038	1.599741	-0.00239
3	-0.00449	-0.01249	-3.90E-05
4	-7.17E-05	-0.00017	7.17E-06
5	1.33E-05	3.35E-05	-8.46E-07
6	-1.57E-06	-3.97E-06	9.73E-08
7	1.80E-07	4.56E-07	-1.12E-08
8	-2.07E-08	-5.23E-08	1.28E-09
9	2.37E-09	6.00E-09	-1.47E-10
10	-2.72E-10	-6.88E-10	1.68E-11
11	3.12E-11	7.89E-11	-1.93E-12
12	-3.58E-12	-9.06E-12	2.23E-13
13	4.12E-13	1.05E-12	-2.58E-14
14	-4.62E-14	-1.14E-13	3.91E-15
15	1.07E-14	2.13E-14	-1.53E-16
16	0	0	0

4.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลกับแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

ในแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของนั้นมีปัจจัยที่มีอิทธิพลกับแบบจำลองหลายปัจจัยด้วยกัน ประกอบไปด้วย

4.3.1 การหาสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องและอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

การที่จะสามารถทราบถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำภายในช่อง และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตนั้น จำเป็นที่จะต้องทราบสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องทั้งหมดที่แช่อยู่ในบ่อผลิต โดยสถานะของน้ำภายในช่องคือคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาในส่วนของพลังงานภายในของน้ำภายในช่อง ซึ่งน้ำภายในช่องทั้งหมดที่อยู่ในบ่อผลิตนั้นประกอบไปด้วยหลายสถานะด้วยกัน ซึ่งสามารถจำแนกเป็นกลุ่มของการจำหน่ายได้ เนื่องจากเมื่อมีการจำหน่ายน้ำแข็ง น้ำที่ถูกนำลงมาแช่ในบ่อผลิตจะมีสถานะเดียวกันกล่าวคือมีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์เหมือนกันนั่นเอง การที่จะทราบถึงสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องนั้นทำได้โดย เมื่อน้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของเหลวและยังไม่เกิดน้ำแข็งจะทำการวัดอุณหภูมิของน้ำภายในช่องได้ และสามารถทราบถึงพลังงานภายในของน้ำภายในช่องนั้นได้ แต่ถ้าน้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของผสมของเหลวและของแข็งอิมตัว จะไม่สามารถทำการตรวจวัดอุณหภูมิได้เนื่องจากน้ำภายในช่องมีอุณหภูมิมืดที่ คือ 0°C ที่ความดันบรรยากาศ แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำภายในช่องแทน ดังนั้นการที่จะทราบค่าสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องขณะที่กำลังเกิดน้ำแข็งนั้นต้องทำการสร้างการทดลองขึ้นมาโดยใช้วิธีการตรวจวัดความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในช่องน้ำแข็งทดลองสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในช่องน้ำแข็ง อธิบายการทดลองไว้ในภาคผนวก ข.2 ซึ่งหลังจากนั้นจะใช้วิธีการวัดความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมาคำนวณหาสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องเมื่อมีสถานะเป็นของผสมของเหลวและของแข็งอิมตัวได้ โดยสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องแต่ละชุดจำหน่ายในบ่อผลิตจัดให้อยู่ในรูปของพลังงานภายในของน้ำภายในช่อง ในส่วนสถานะเริ่มต้นของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตสามารถทำได้โดยการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

4.3.2 ความร้อนจากภายนอกที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิต

เนื่องจากกระบวนการผลิตน้ำแข็งของคือการทำความเย็นให้กับน้ำภายในช่อง เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันไม่ให้มีความร้อนจากภายนอกเข้ามา มีอิทธิพลกับกระบวนการผลิตโดยการสร้างบ่อผลิตด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อน และฝาปิดของน้ำแข็งก็เป็นฉนวนกันความร้อนเช่นกัน แต่ก็ยังมีความร้อนบางส่วนที่รั่วไหลเข้ามาสู่บ่อผลิตโดยงานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์พลังงานในโรงงานทำน้ำแข็งของ จัดทำโดย เอก ธิบสัมฤทธิ์ (2536)

ในส่วนหนึ่งของงานวิจัยได้ทำการศึกษาถึงอัตราการร้อนที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตในส่วนของผนังที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ ผนังในส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ และฝาปิดของน้ำแข็งโดยงานวิจัยนี้ได้นำผลจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นมาใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการผลิตน้ำแข็งของ เนื่องจากโครงสร้างของบ่อผลิตมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยอธิบายผลการวิเคราะห์อัตราการร้อนสุทธิที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตไว้ในภาคผนวก ข.3 ซึ่งสามารถสรุปค่าของอัตราการร้อนที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตรวมทุกส่วนได้ดังตารางที่ 4.3

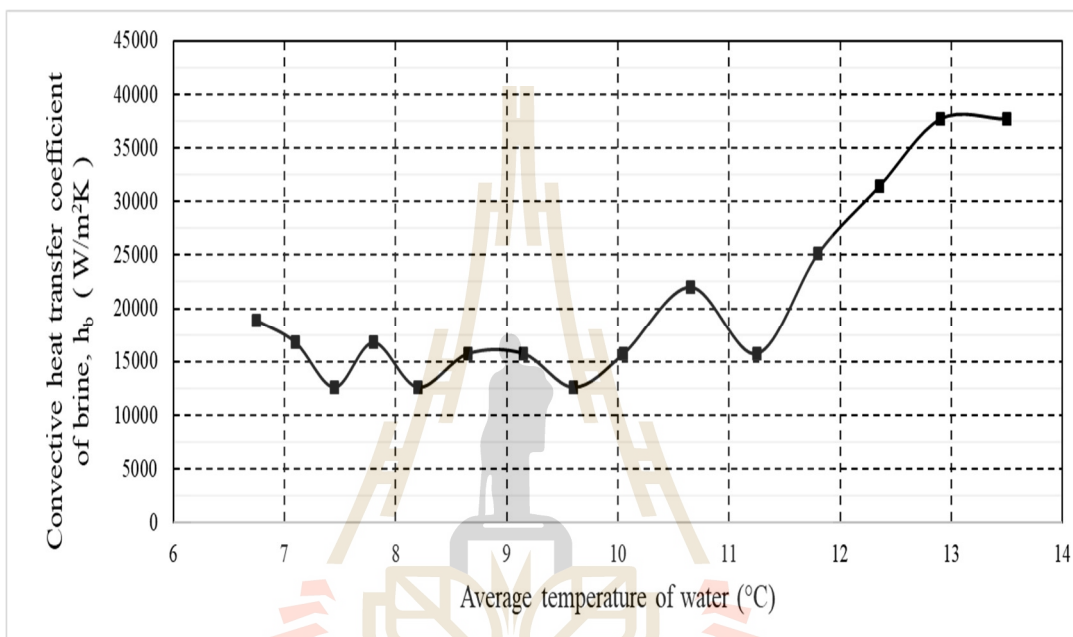
ตารางที่ 4.3 อัตราความร้อนที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตรวมทุกส่วน

อัตราการร้อนสุทธิที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิต $\dot{Q}_{leak, total}$ (kW)		
ผนังส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ	ผนังส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ	ฝาปิดของน้ำแข็ง
0.51	0.20	2.01
อัตราการร้อนสุทธิที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิต		2.72

4.3.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective Heat transfer Coefficient) ของน้ำภายในช่องผลิต และน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

อย่างที่ทราบกันว่าเมื่อของไหลมีการเคลื่อนที่ผ่านผิวของแข็งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจะเกิดการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของการพาความร้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยการวัดความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลกับผิวของแข็งในส่วนของน้ำภายในช่องนั้นมีการเป่าลมอัดเข้ามาจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำภายในช่องซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตนั้นจะเกิดเฉพาะขณะที่น้ำภายในช่องผลิตมีสถานะเป็นของเหลวเท่านั้นเนื่องจากมีความแตกต่างกันของอุณหภูมิระหว่างน้ำภายในช่องผลิตกับผิวของน้ำแข็ง ถ้าหากน้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของผสมของเหลวและของแข็งอิมัลชันกล่าวคือน้ำภายในช่องเริ่มเกิดน้ำแข็งทำให้ไม่สามารถหาความแตกต่างของอุณหภูมิได้เพราะว่าน้ำภายในช่องผลิตจะมีอุณหภูมิกึ่งที่ คือ 0°C ที่ความดันบรรยากาศ และที่ผิวของน้ำแข็งที่สัมผัสกับน้ำก็จะมีอุณหภูมิกึ่งที่ เท่ากับ เช่นกัน ซึ่งเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตขึ้นกับอุณหภูมิน้ำภายในช่องผลิต จึงสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตกับอุณหภูมิน้ำภายในช่องผลิตโดยรูปที่ 4.2 แสดง ความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตกับอุณหภูมิน้ำภายในช่องผลิต

เมื่อสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตได้แล้วนั้นสามารถนำไปสู่การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตได้จากกลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในช่องผลิตกับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตสามารถหาได้โดยการวัดอุณหภูมิน้ำเกลือที่อยู่ในบ่อผลิตกับอุณหภูมิผิวของด้านที่สัมผัสกับน้ำเกลือ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตกับอุณหภูมิน้ำภายในช่องผลิต

ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเกลือกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือได้ เนื่องจากอุณหภูมิน้ำเกลือในบ่อผลิตแต่ละตำแหน่งมีความแตกต่างกัน จึงทำการตรวจวัดในแต่ละตำแหน่งของบ่อผลิตแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

โดยที่ตำแหน่งการตรวจวัดจุดที่ 2 และ 4 น้ำเกลือเกิดการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากอยู่ใกล้เครื่องเวียนน้ำเกลือจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือมีแนวโน้มสูงกว่าค่าเฉลี่ยและในตำแหน่งการตรวจวัดจุดที่ 6 อยู่ที่ขอบบ่อผลิตการไหลของน้ำจะค่อนข้างต่ำเนื่องจากมีช่องน้ำแข็งจำนวนมากขวางการไหลของน้ำเกลือจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าเฉลี่ย อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่งการตรวจวัดจุดที่ 2, 4 และ 6

จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือเบียงเบนไปจากค่าเฉลี่ยมาก แต่บริเวณของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตที่ตำแหน่งการตรวจวัดจุดที่ 2, 4 และ 6 คิดเป็น 10 % ของบริเวณน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ซึ่งเป็นบริเวณน้ำเกลือส่วนน้อย กล่าวได้ว่าที่ตำแหน่งตรวจวัดจุดอื่นๆ คิดเป็นบริเวณน้ำเกลือภายในบ่อผลิตส่วนใหญ่ จึงสามารถนำค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือ ไปใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งชอง โดยอธิบายผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในชองและน้ำเกลือไว้ในภาคผนวก ข.4

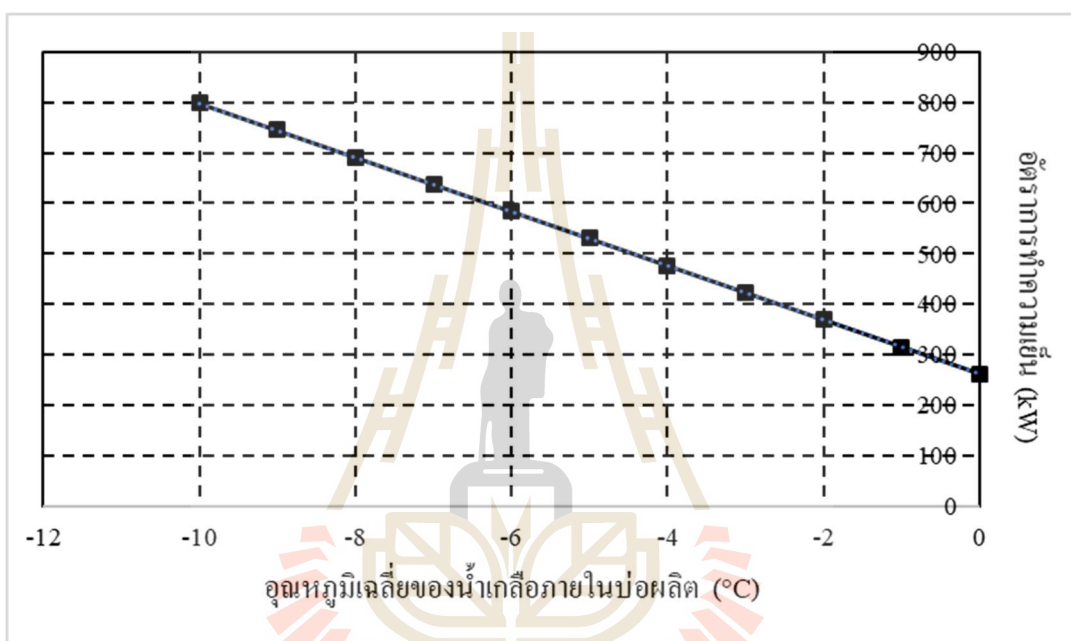
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

ตำแหน่งการตรวจวัดจุดที่	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือ ภายในบ่อผลิต $h_b \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$
1	228.10
2	486.81
3	238.18
4	362.79
5	236.26
6	72.24
7	218.12
8	249.97
เฉลี่ย	262

4.3.4 อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็น

อีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการผลิตน้ำแข็งชองคือการทำความเย็นให้กับน้ำเกลือในบ่อผลิต โดยขณะที่ทำการเดินเครื่องทำความเย็นสารทำความเย็นในเครื่องทำระเหยจะรับความร้อนจากน้ำเกลือภายในบ่อผลิตซึ่งน้ำเกลือเป็นตัวกลางในการรับความร้อนจากน้ำภายในชองผลิตที่อยู่ในบ่อผลิต ซึ่งอัตราการทำความเย็นในที่นี้หมายถึงอัตราการระเหยของสารทำความเย็นที่อยู่ในเครื่องทำระเหยให้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวอิ่มตัวเป็นไออิ่มตัว โดยสามารถหาอัตราทำความเย็นได้โดยทำการทดลองการหาภาระการทำความเย็นสุทธิที่น้ำภายในชองถ่ายเทให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิต โดยทำการตรวจวัดสถานะของน้ำภายในชองแต่ละชุดจำหน่ายจำแนก

เป็นกลุ่ม โดยแบ่งกลุ่มตามคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำภายในช่องและทำการตรวจวัด อุณหภูมิน้ำเกลือที่เวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุด จากนั้นจะนำไปคำนวณหาอัตราการทำความเย็น ด้วยวิธีการสมดุลพลังงานและมวล โดยให้น้ำเกลือภายในบ่อผลิตเป็นปริมาตรควบคุม จะได้ ความสัมพันธ์ของอัตราการทำความเย็นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ซึ่งอธิบายผลการวิเคราะห์อัตราการทำความเย็นไว้ในภาคผนวก ข.5 โดยรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของ อัตราการทำความเย็นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของอัตราการทำความเย็นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

4.3.5 ลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิต

ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งของนั้นจะมีการเป่าลมเข้าสู่ น้ำภายในช่องดังอธิบายไว้ในบทที่ 3 แล้วนั้น เมื่อลมอัดออกจากเครื่องผลิตลมอัดจะมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากกระบวนการอัด ทำให้น้ำภายในช่องที่ถูกลมอัดเป่านั้นได้รับความร้อนจากลมอัดจึงทำให้น้ำภายในช่องมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน จึงต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าพลังงานความร้อนที่ลมอัดถ่ายเทให้กับน้ำภายในช่อง โดยทำการตรวจวัดอัตราการไหล โดยมวลของลมอัดที่เป่าน้ำในแต่ละช่อง รวมถึงอุณหภูมิของลมอัดที่เป่าในน้ำแต่ละช่องด้วย โดยอธิบายผลการตรวจวัดอัตราการไหล โดยมวลของลมอัดและอุณหภูมิลมอัดที่เป่าน้ำภายในช่องไว้ในภาคผนวก ข.6 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าอัตราการไหลโดยมวลของลมอัดและอุณหภูมิลมอัดที่เป่าน้ำภายในช่อง

อัตราการไหลโดยมวลของลมอัด	อุณหภูมิลมอัดที่เป่าน้ำภายในช่อง
$\dot{m}_{ca} \left(\frac{kg}{s} \right)$	$T_{ca,in} \left(^\circ C \right)$
0.0000544	31.5

4.4 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยบ่อผลิต

จำลอง

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้ทำการสร้างขึ้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความแม่นยำก่อนที่จะนำแบบจำลองไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการศึกษา โดยทำการตรวจสอบความแม่นยำด้วยการสร้างบ่อผลิตและช่องผลิตจำลองขึ้นมาให้ใกล้เคียงกับบ่อผลิตจริงให้มากที่สุดแล้วกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองให้มีสัดส่วนใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตจริง เช่น สัดส่วนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตจำลอง ปริมาณน้ำภายในช่องผลิตจำลอง สาเหตุที่ไม่สามารถตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองกับสถานะจริงที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองได้ เนื่องจากไม่สามารถทำการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเกลือได้ตลอดเวลา เพราะในช่วงที่มีการยกจำหน่ายในแต่ละช่วงของวัน ภายในบ่อผลิตจะเป็นพื้นที่ทำงานของพนักงานและมีเครื่องจักรที่ทำงานตลอดเวลาที่ทำการยกจำหน่าย ซึ่งมีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายแก่ผู้ทำวิจัย จึงหลีกเลี่ยงที่จะทำการตรวจวัดในขณะที่มีการยกจำหน่าย จึงทำการทดสอบด้วยการนำน้ำภายในช่องผลิตจำลองไปแช่ในน้ำเกลือที่ถูกทำความเย็นด้วยน้ำแข็งภายในบ่อผลิตจำลองแล้วศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตจำลอง หลังจากนั้นก็นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง มาทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือที่ได้จากแบบจำลอง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแนวโน้มของอุณหภูมิน้ำเกลือที่ได้จากการตรวจวัดจากบ่อผลิตจำลอง โดยผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่สร้างขึ้นนั้นมีความแม่นยำเป็นที่น่าพึงพอใจสามารถนำแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ไปใช้วิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการศึกษาภายใต้กระบวนการผลิตจริงของโรงงานผลิตน้ำแข็งซองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถอธิบายผลการตรวจสอบความแม่นยำไว้ในภาคผนวก ข.7

โดยรูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลการตรวจวัดจริงในบ่อผลิตจำลอง

4.5 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

การศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตทำให้เห็นถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเกลือที่เกิดขึ้นภายใต้รูปแบบการเดินเครื่องและเงื่อนไขการผลิตของโรงงานผลิตน้ำแข็งซอง โดยได้ทำการศึกษาภายใต้การเดินเครื่องทำความเย็นในวันธรรมดา (จันทร์-ศุกร์) ไม่เว้นวันหยุดนักขัตฤกษ์และวันหยุดพิเศษตามประกาศของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค) ซึ่งโรงงานจะเดินเครื่องในเวลาประมาณ 22.00 น. ถึง 09.00 น. และมีการยกน้ำแข็งจำหน่ายในช่วงเวลา 02.00 น. (ช่วงเช้า) และ 14.00 น. (ช่วงบ่าย) ของทุกๆ วัน โดยอุณหภูมิน้ำเกลือที่ได้จะเป็นอุณหภูมิน้ำเกลือต่ำสุดภายในบ่อผลิตซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งใกล้กับแอกคิวมูเลเตอร์และอุณหภูมิน้ำเกลือนี้เป็นอุณหภูมิที่บันทึกไว้ในระบบคอมพิวเตอร์ของโรงงานผลิตน้ำแข็งซอง ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือได้ดังนี้

ในขณะที่เริ่มทำการเดินเครื่องทำความเย็นนั้นอุณหภูมิน้ำเกลือจะมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีการยกจำหน่ายช่วงเช้าอุณหภูมิน้ำเกลือจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากยกจำหน่ายช่วงเช้าแล้วเสร็จอุณหภูมิน้ำเกลือก็จะมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งหยุดเดินเครื่องทำความเย็นอุณหภูมิน้ำเกลือก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนเมื่อถึงเวลายกจำหน่ายช่วงบ่ายอุณหภูมิน้ำเกลือจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยและก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนเมื่อถึงเวลาเดินเครื่องทำความเย็นอีกครั้ง อุณหภูมิน้ำเกลือก็จะมีแนวโน้มลดลง เป็นไปตามรูปที่ 4.5 แสดง พฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้รูปแบบการเดินเครื่องและเงื่อนไขการผลิตของโรงงานผลิตน้ำแข็งซอง

4.6 ผลที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

หลังจากที่สร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยจะต้องทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมที่ได้จากแบบจำลองกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง เพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองก่อนที่จะนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์หารูปแบบการเดินเครื่องและปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยผลที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถสรุปได้ดังนี้

4.6.1 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับค่าอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ทำการตรวจวัด

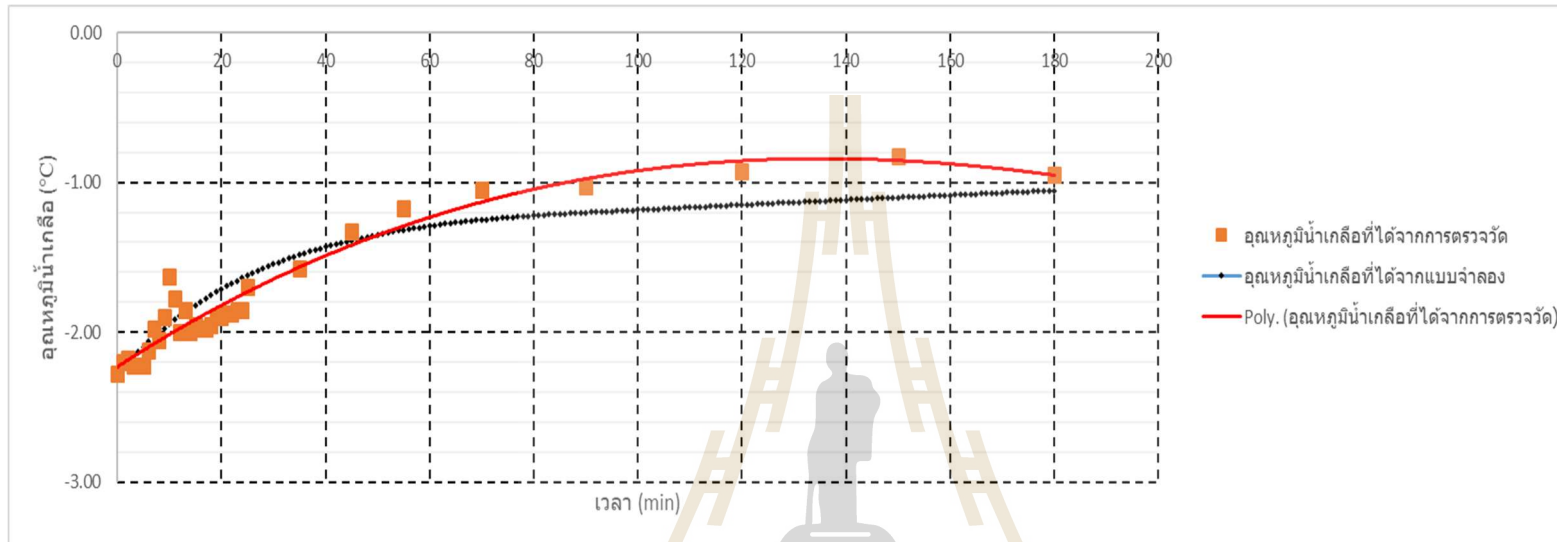
เมื่อนำค่าอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ได้จากแบบจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ทำการตรวจวัด โดยรูปที่ 4.6 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ได้จากแบบจำลองและอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ทำการตรวจวัดเทียบกับเวลา จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของอุณหภูมิอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

4.6.2 อัตราการเกิดน้ำแข็งภายในช่องผลิตภายใต้เงื่อนไขการผลิตจริงเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

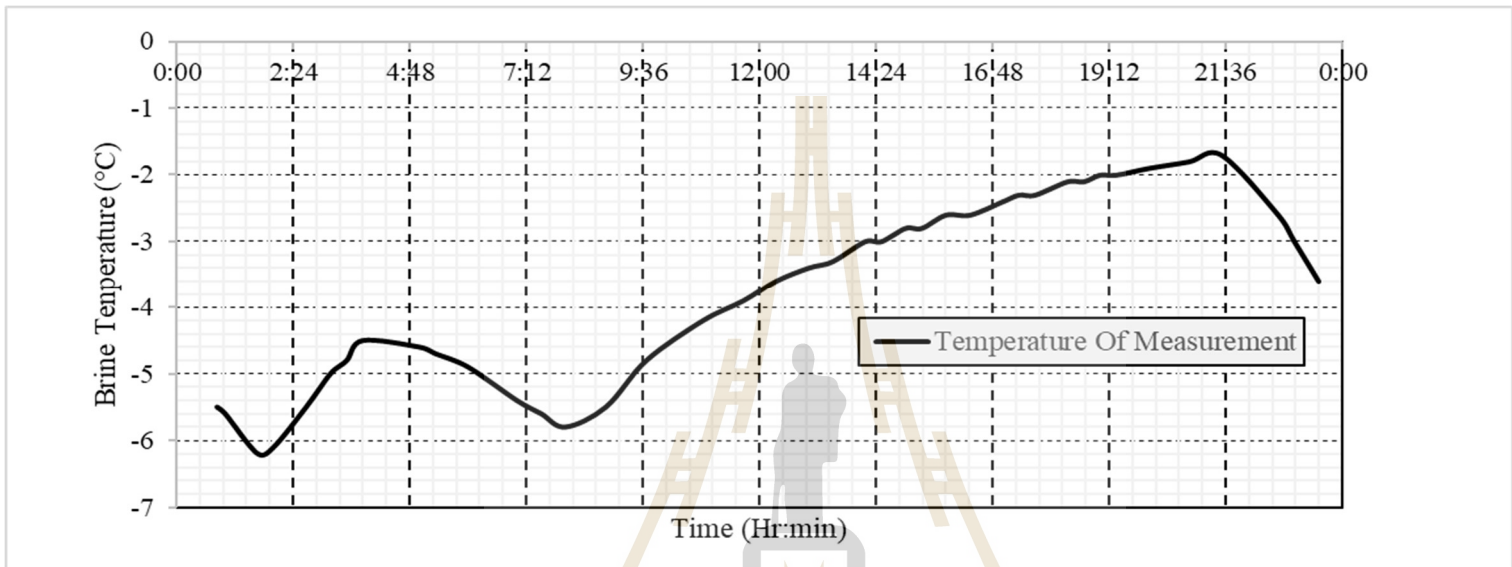
เมื่อนำระยะเวลาของการผลิตน้ำแข็งภายในช่องผลิตที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับระยะเวลาการผลิตน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจริงจากการตรวจวัดซึ่งใช้เวลาในการผลิตน้ำแข็งจริงประมาณ 5 วัน โดยผลที่ได้จากแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ระยะเวลาผลิตน้ำแข็งภายในช่องผลิตในแต่ละกลุ่มจำหน่ายที่ได้จากแบบจำลอง

4.6.3 พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำเกลือขณะที่มีการยกจำหน่าย

เมื่อมีการยกจำหน่ายน้ำแข็งออกไปแล้วเติมน้ำเข้ามาแช่ลงในบ่อน้ำเกลืออีกครั้งจะทำให้ภาระการทำความเย็นสุทธิหรือพลังงานความร้อนสุทธิที่น้ำภายในช่องคายให้กับน้ำเกลือมีค่าสูงมากในช่วงแรกซึ่งเป็นระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่เติมเข้ามาใหม่กับอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตมีความแตกต่างกันมาก ส่งผลให้อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากมีภาระการทำความเย็นสุทธิสูงกว่าอัตราการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นในขณะนั้น เมื่อระยะเวลาผ่านไปภาระการทำความเย็นสุทธิจะลดลงอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิของน้ำที่ถูกเติมเข้าไปใหม่จนกระทั่งใกล้เคียงกับอัตราการทำความเย็นของเครื่อง ส่งผลให้อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่ยังทำการเดินเครื่องทำความเย็นอยู่ โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ภาระการทำความเย็นสุทธิ และเวลาที่ทำการยกจำหน่ายน้ำแข็งช่วงเช้า (02.00 น.) โดยรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ภาระการทำความเย็นสุทธิ และเวลาที่ทำการยกจำหน่ายน้ำแข็งช่วงเช้า

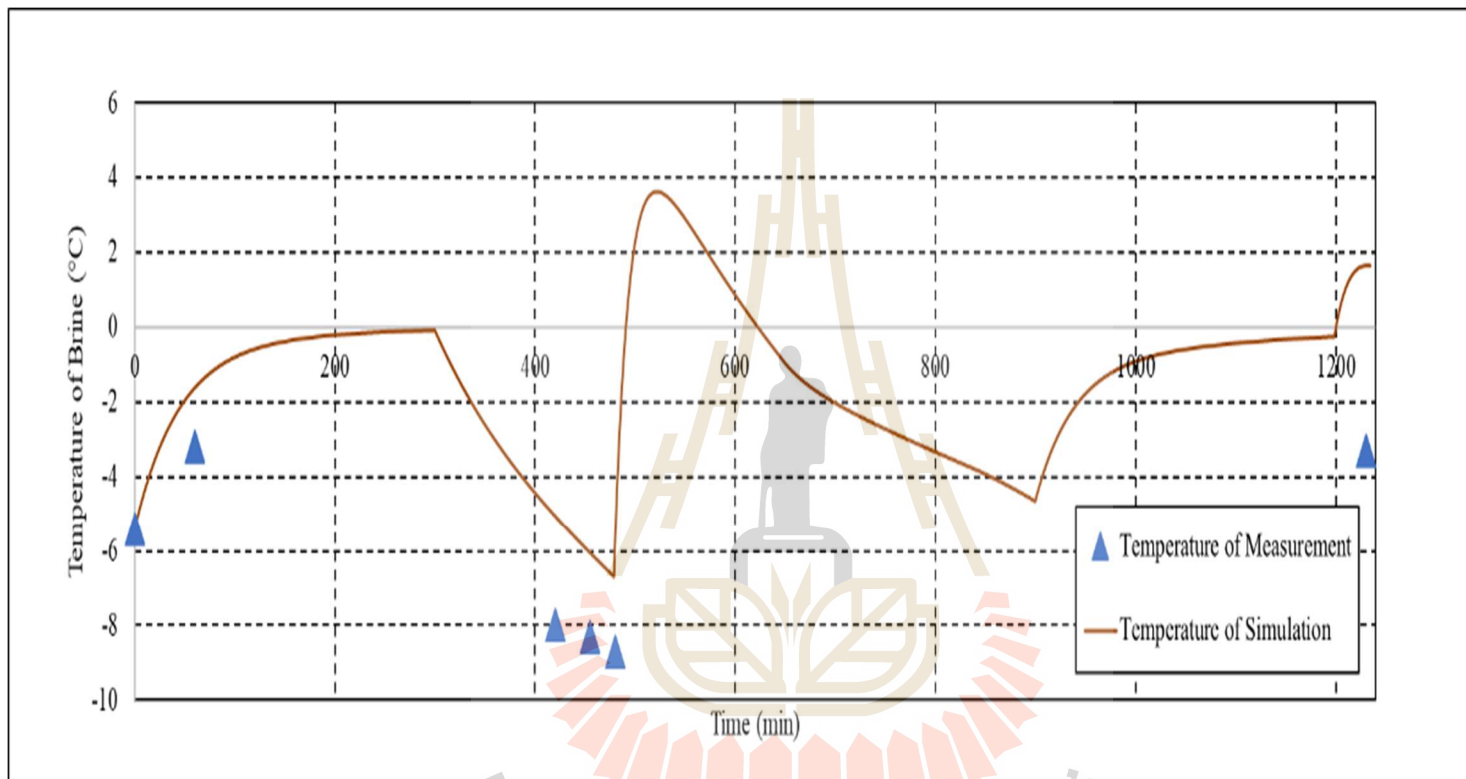


รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลการตรวจวัดจริงในบ่อผลิตจำลอง

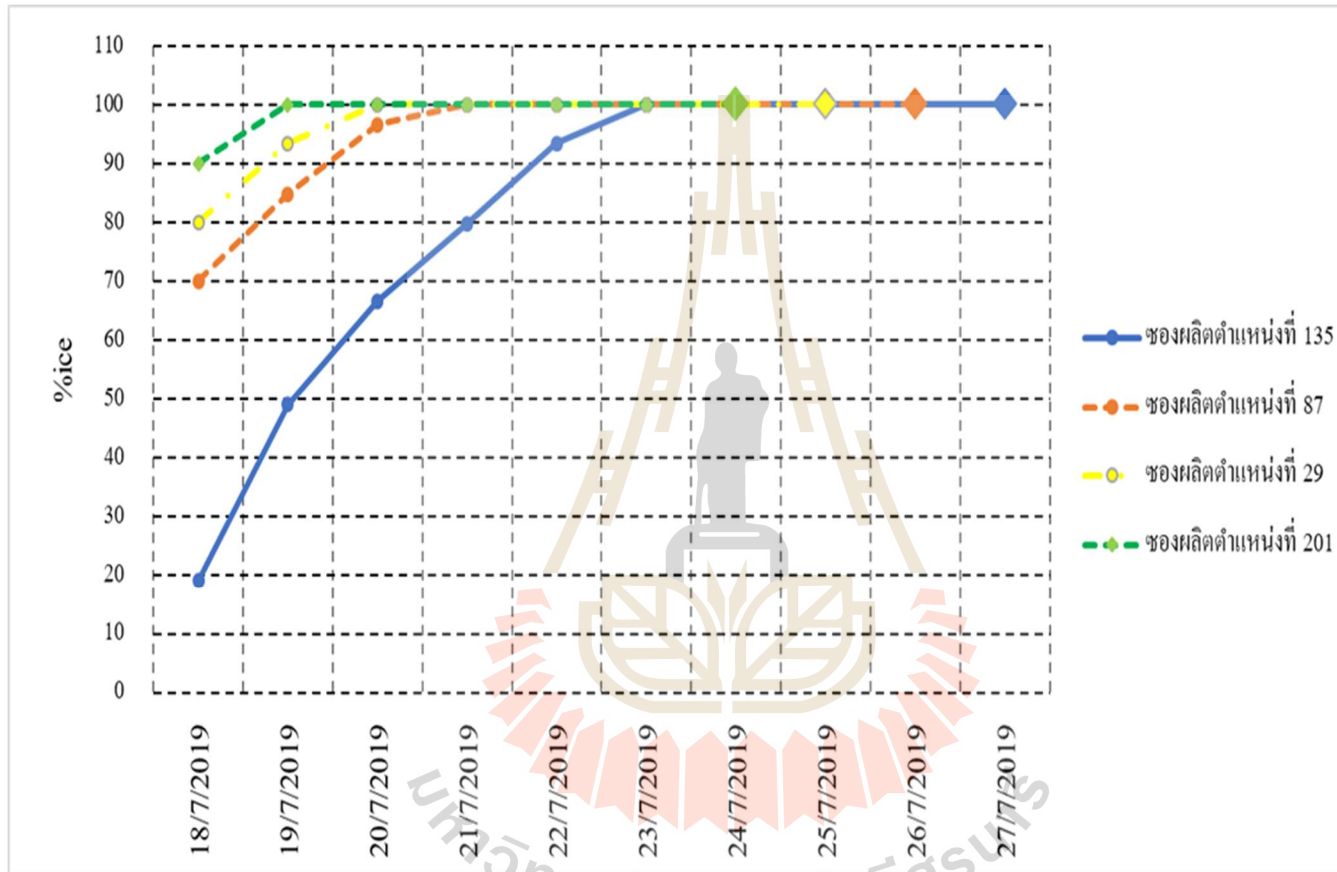


รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้รูปแบบการเดินเครื่องและเงื่อนไขการผลิตของ โรงงานผลิตน้ำแข็งซอง

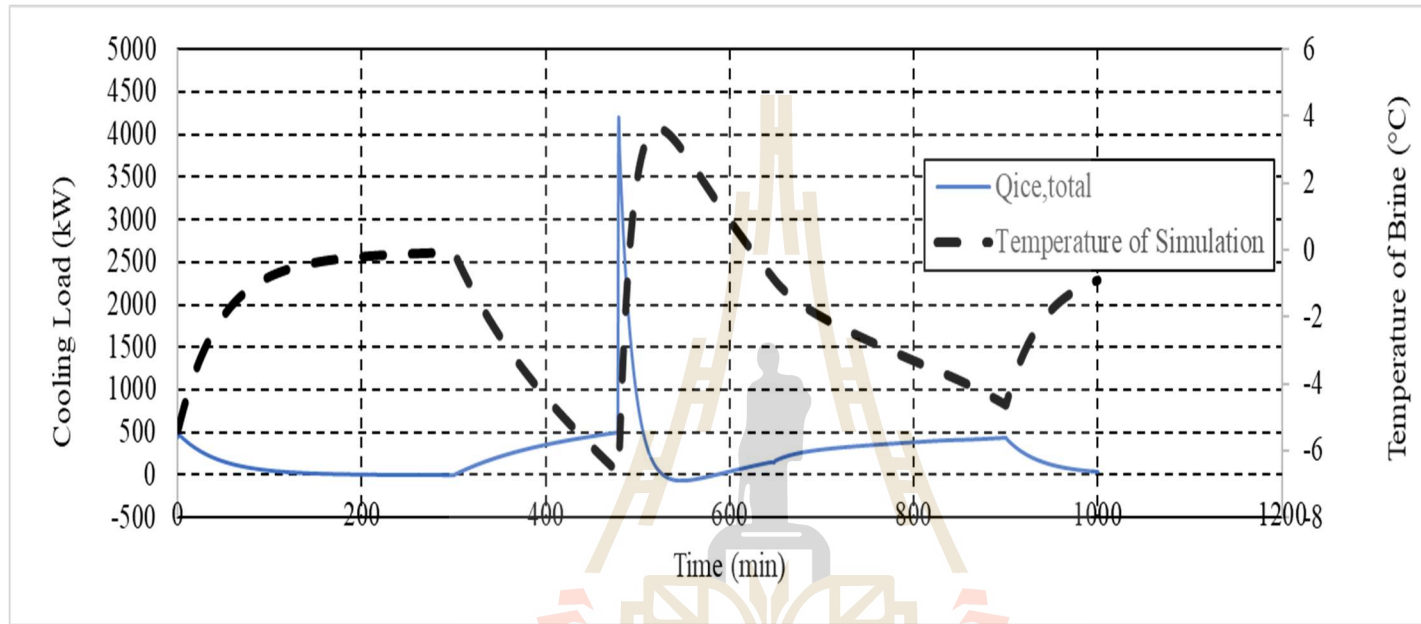




รูปที่ 4.6 ค่าอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ได้จากแบบจำลองและอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตที่ทำการตรวจวัดเทียบกับเวลา



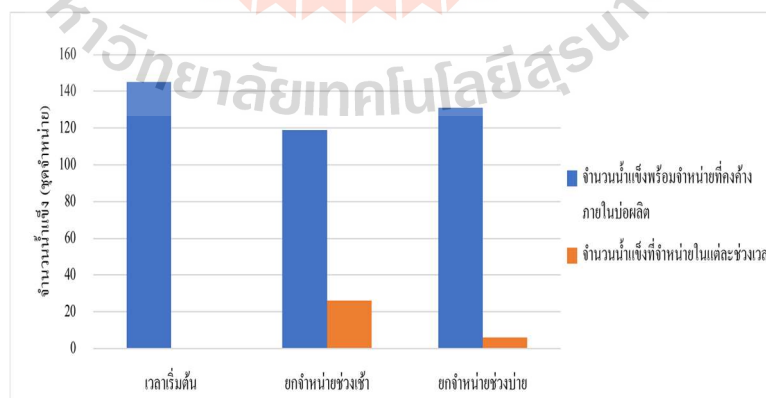
รูปที่ 4.7 ระยะเวลาผลิตน้ำแข็งภายในช่องผลิตในแต่ละกลุ่มจำนวนที่ได้จากแบบจำลอง



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ภาระการทำความเย็นสุทธิ และเวลาที่ทำการยกจำหน่ายน้ำแข็งช่วงเช้า

4.6.4 จำนวนน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิต

ในบ่อผลิตจำเป็นต้องมีน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายคงค้างในบ่อผลิตเพื่อทำหน้าที่ชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต โดยน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายนั้นจะมีสภาพเป็นน้ำแข็งเต็มชองน้ำแข็งซึ่งมีภาระการทำความเย็นหรือพลังงานความร้อนที่คายให้กับน้ำเกลือน้อยมาก เนื่องจากน้ำแข็งที่พร้อมจำหน่ายจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ซึ่งหากมีน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายคงค้างภายในบ่อผลิตมีจำนวนที่มากเกินไปจะทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำเกลือในขณะที่หยุดทำการเดินเครื่องทำความเย็นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการเดินเครื่องทำความเย็นได้ แต่โรงงานผลิตน้ำแข็งจะสูญเสียโอกาสในการจำหน่ายน้ำแข็งเช่นกัน แต่ถ้ามีน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตในจำนวนที่น้อยเกินไป จะทำให้อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่หยุดการเดินเครื่องทำความเย็น ส่งผลให้ต้องเดินเครื่องทำความเย็นก่อนเวลาการเดินเครื่องที่เหมาะสม เนื่องจากต้องรักษาอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิน้ำเกลืออยู่ในช่วงประมาณ 0°C ถึง -10°C ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตให้มีปริมาณที่เหมาะสมและสอดคล้องต่อเงื่อนไขการผลิตและรูปแบบการเดินเครื่องเพื่อการประหยัดพลังงาน ซึ่งจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถบ่งบอกถึงปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตได้ เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่ายในแต่ละช่วงเวลา จะต้องมีน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตมากกว่าจำนวนน้ำแข็งที่จำหน่าย จึงจะสามารถจำหน่ายน้ำแข็งได้เพียงพอต่อความต้องการจำหน่าย โดยรูปที่ 4.9 แสดงจำนวนน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตเทียบกับจำนวนน้ำแข็งที่จำหน่ายในแต่ละช่วงเวลา



รูปที่ 4.9 จำนวนน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตเทียบกับจำนวนน้ำแข็งที่จำหน่ายในแต่ละช่วงเวลา

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิต น้ำแข็งซองเพื่อการประหยัดพลังงาน

จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองนำไปสู่การประยุกต์ใช้เพื่อแบบจำลองในการหารูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นและปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตให้เหมาะสมเพื่อการประหยัดพลังงาน กล่าวคือต้องการทราบปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตที่เหมาะสมและมีปริมาณที่เพียงพอต่อการจำหน่ายและช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำเกลือในขณะที่หยุดเดินเครื่องทำความเย็นนำไปสู่รูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยจะใช้วิธีการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization method) เนื่องจากการหาค่าที่เหมาะสมมีหลายวิธีด้วยกันงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองและแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยจะใช้วิธีกำหนดการพลวัต (Dynamics Programming) เป็นวิธีในการหาค่าที่ดีที่สุด

5.1 การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์อย่างหนึ่ง ซึ่งจะให้ผลในเชิงปริมาณ (Quantity) เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จะเป็น จำนวนหรือค่าตัวเลขของปัญหาที่ทำการศึกษา ดังนั้นปัญหาที่นำมาหาค่าที่ดีที่สุด จะอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทั่วไปแล้ววัตถุประสงค์ของการหาค่าที่ดีที่สุด คือเพื่อต้องการหาค่าที่มากที่สุด (Maximum) หรือ ค่าที่ต่ำที่สุด (Minimum) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการศึกษา (Objective function) โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือสิ่งที่เราต้องทราบจากการหาค่าที่ดีที่สุด และต้องกำหนดตัวแปรออกแบบ (Design variable) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และในบางปัญหาอาจจะมีเงื่อนไข (Constraints) หรือขอบเขตที่ต้องทำการศึกษามาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดด้วย โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นที่น้อยที่สุดที่สามารถผลิตน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการจำหน่ายภายใต้เงื่อนไขการผลิตของโรงงานดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นที่น้อยที่สุดและมีตัวแปรออกแบบคือ อุณหภูมิน้ำเกลือในช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา และปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตในช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา

และมีเงื่อนไขคือปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่ายในแต่ละช่วงเวลาในการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้เป็นชั่วโมงการเดินเครื่องมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิตจะทำการเดินเครื่องทำความเย็นในช่วงเวลาความต้องการไฟฟ้าต่ำ (Off-Peak) เท่านั้น เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าต่ำสุดในอัตราคงที่ตลอดเวลา และการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงถือว่าเป็นค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อเราสามารถหาชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นที่น้อยที่สุด และทราบถึงปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่ายในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา จะนำไปสู่การหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็นต่อปริมาณน้ำแข็งจำหน่ายที่น้อยที่สุด ที่สามารถผลิตน้ำแข็งให้เพียงพอต่อความต้องการจำหน่ายภายใต้เงื่อนไขการผลิตของโรงงานได้ ซึ่งวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดนั้นทำได้หลายวิธี โดยวิธีที่เหมาะสมในการหาค่าที่ดีที่สุดนั้นคือ วิธีกำหนดการพลวัต (Dynamics Programming) เนื่องจากปัญหาที่ทำการวิเคราะห์เป็นปัญหาแบบต่อเนื่องและสามารถแยกออกมาวิเคราะห์ในแต่ละช่วงเวลาได้ โดยวิธีกำหนดการพลวัต สามารถอธิบายหลักการทำงานไว้ในภาคผนวก ง.1 และอธิบายการคิดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของไว้ในภาคผนวก ง.2 ดังนั้นจึงสามารถสรุปตัวแปรที่ใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุด ได้ดังนี้

ตัวแปรอิสระของการหาค่าที่ดีที่สุด

1. เวลาเริ่มต้นของการเดินเครื่องทำความเย็นในแต่ละวันผลิต
2. ช่วงเวลาของการเดินเครื่องทำความเย็นในแต่ละวันผลิต

ชุดตัวแปรเงื่อนไขของการหาค่าที่ดีที่สุด

1. ความต้องการการจำหน่ายน้ำแข็งของในแต่ละวันผลิตของโรงงาน

วัตถุประสงค์ของการหาค่าที่ดีที่สุด

1. ชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นต่ำที่สุดในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำ (Off-Peak)

5.2 กรณีศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของด้วยวิธีกำหนดการพลวัตของโรงงานผลิตน้ำแข็งของตัวอย่าง

กรณีศึกษาที่ทำการศึกษาวเคราะห์จากกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตน้ำแข็งโดยทำการหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็นต่อปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่ายใน 1 เดือนตัวอย่าง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีกำหนดการพลวัต ว่ามีผลประหยัดด้านพลังงานไฟฟ้าเป็นอย่างไร ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถที่จะระบุชัดได้ว่า โรงงานผลิตน้ำแข็งของมีความต้องการการผลิตน้ำแข็งในแต่ละวันเป็นอย่างไรเนื่องจากเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ อีกทั้งยังไม่สามารถทราบถึงรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นที่โรงงานใช้เดินเครื่องได้ จึงต้องศึกษาภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดดังนี้

	ชุดจำหน่ายเข้า	ชุดจำหน่ายขาย
วันธรรมดา	22	4
วันหยุดราชการ	20	1
จำนวนน้ำแข็งที่จำหน่ายภายใต้กรณีศึกษา	1314 ชอง	
ระยะเวลาการผลิตที่ทำการวิเคราะห์ภายใต้กรณีศึกษา	9 วัน	
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็น	147 kW	

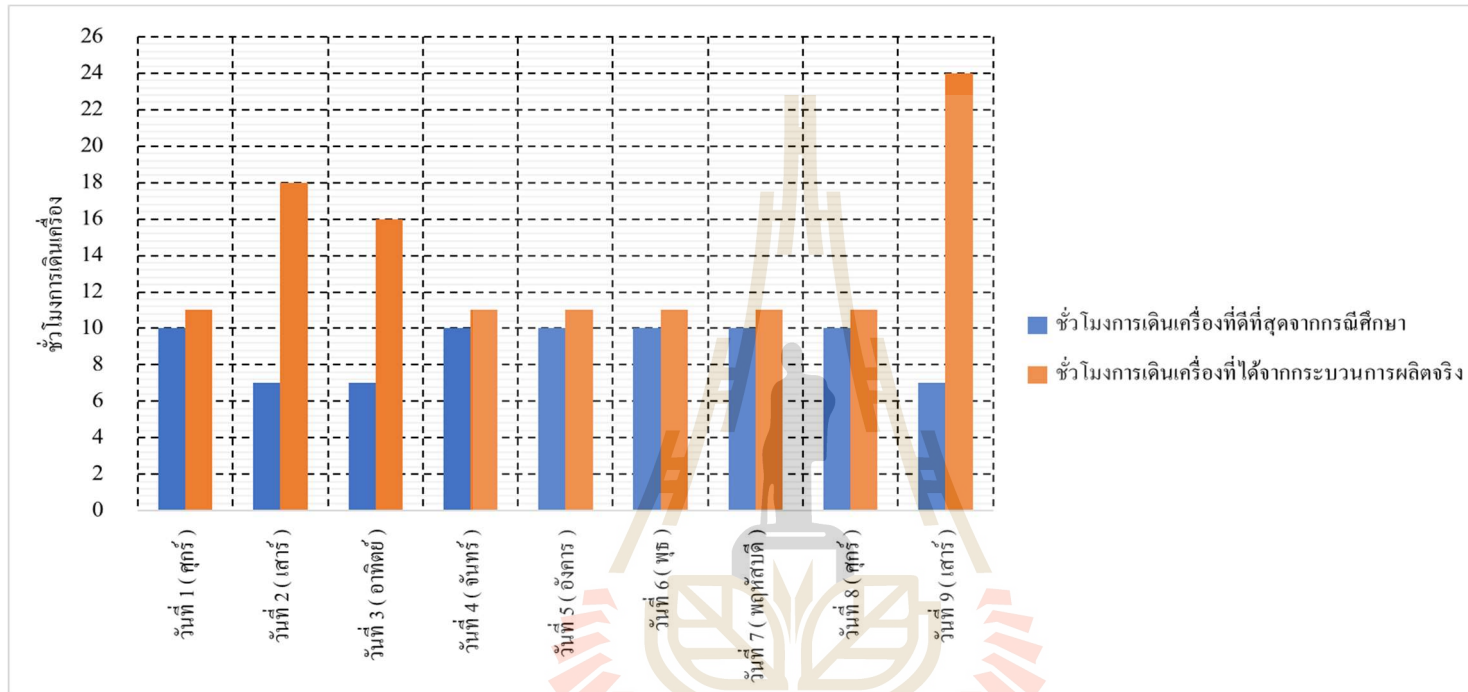
5.3 ผลที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำหนดการพลวัตและ

ข้อเสนอแนะ

จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกำหนดการพลวัตได้ทำการศึกษาโดยแบ่งเป็นกรณีศึกษาทั้งหมด 287 กรณี โดยมีกรณีศึกษาที่สามารถผลิตน้ำแข็งได้เพียงพอต่อความต้องการจำหน่ายและมีรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดคือ มีชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นเท่ากับ 81 ชั่วโมงต่อรอบผลิตน้ำแข็งชอง โดยสามารถคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็นต่อปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่าย ได้เท่ากับ 9.06 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อชอง และอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็นต่อปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่ายของโรงงานนั้น มีค่าเท่ากับ 13.97 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อชอง ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินเครื่องทำความเย็น คิดเป็น 35.15 % และยังมีปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตเพียงพอต่อความต้องการจำหน่าย

เมื่อทำการเปรียบเทียบชั่วโมงการเดินเครื่องที่ได้จากการหาค่าที่ดีที่สุดกับชั่วโมงการเดินเครื่องที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิตน้ำแข็งชอง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 แสดง ชั่วโมงการเดินเครื่องที่ได้จากการหาค่าที่ดีที่สุดเทียบกับชั่วโมงการเดินเครื่องที่เกิดขึ้นจริง โดยอ้างอิงข้อมูลชั่วโมงการเดินเครื่องที่ได้จากกระบวนการผลิตจริง แสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.8 และ ชั่วโมงการเดินเครื่องที่ดีที่สุดจากกรณีศึกษา แสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.3

จากรูปที่ 5.1 พบว่าโรงงานผลิตน้ำแข็งชองเดินเครื่องทำความเย็นในวันเสาร์และอาทิตย์เกินความจำเป็น เนื่องจากสามารถเดินเครื่องทำความเย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตได้ตลอดเวลา เพราะวันดังกล่าวมีรูปแบบการคิดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าแบบความต้องการไฟฟ้าต่ำ (Off-Peak) ตลอดช่วงเวลาของวัน ซึ่งมีอัตราค่าไฟฟ้าที่ต่ำกว่าหากเดินในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูง (On-Peak) ในวันธรรมดา และการจำหน่ายน้ำแข็งในแต่ละวันมีปริมาณที่แตกต่างกันทำให้อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นรูปแบบ



รูปที่ 5.1 แสดงชั่วโมงการเดินเครื่องที่ได้จากการหาค่าที่ดีที่สุดเปรียบเทียบกับชั่วโมงการเดินเครื่องที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิต



รูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างอุนหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตในแต่ละวันผลิตของกรณีศึกษาที่มีรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นที่ดีที่สุด

โดยทั่วไปแล้วการเดินเครื่องทำความเย็นในกระบวนการผลิตจริงนั้น จะทำการเดินเครื่องทำความเย็นจนกว่าอุณหภูมิน้ำเกลือจะมีค่าเข้าใกล้ -10°C เนื่องจากขาดความมั่นใจในการเดินเครื่องทำความเย็นเพื่อที่จะผลิตน้ำแข็งให้เพียงพอต่อความต้องการจำหน่าย ทำให้ขาดประสิทธิภาพในด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็นจากรูปที่ 5.2 พบว่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตที่ได้จากกรณีศึกษาที่มีชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นน้อยที่สุด ในช่วงวันเสาร์และอาทิตย์แสดงให้เห็นว่าภายใต้เงื่อนไขการผลิตของกรณีศึกษา ไม่จำเป็นที่จะต้องเดินเครื่องทำความเย็นเพื่อที่จะรักษาอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตให้มีอุณหภูมิต่ำตลอดเวลา ก็ยังสามารถที่จะจำหน่ายน้ำแข็งได้เพียงพอต่อความต้องการจำหน่ายของโรงงาน ซึ่งทำให้ชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นในช่วงวันเสาร์และวันอาทิตย์ที่ได้จากกรณีศึกษามีชั่วโมงการเดินเครื่องที่แตกต่างกับชั่วโมงการเดินเครื่องในวันเสาร์และวันอาทิตย์ของกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นจริงอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้คือ โรงงานผลิตน้ำแข็งจะต้องมีการจัดการเรื่องแผนการจำหน่ายน้ำแข็งในแต่ละวันให้มีสัดส่วนการจำหน่ายที่ใกล้เคียงกันในแต่ละวัน จะทำให้อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันไม่มาก ส่งผลให้ชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นในแต่ละวันมีความใกล้เคียงกัน

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัย

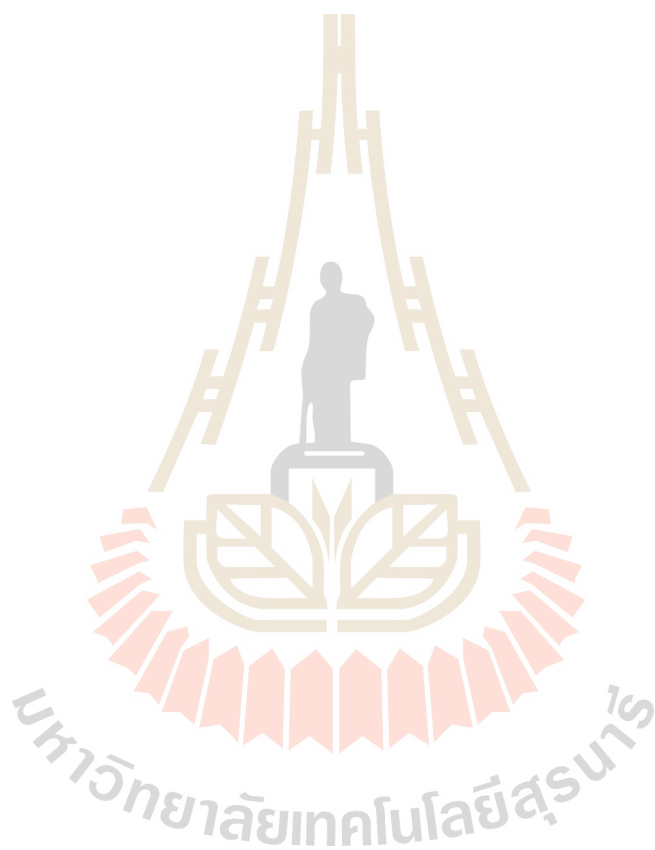
6.1 สรุปผลที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของสามารถทำนายสภาวะของน้ำภายในช่องเมื่อเวลาผ่านไป และ อุณหภูมิน้ำเกลือเมื่อเวลาผ่านไป ได้อย่างแม่นยำ และยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในบ่อผลิตกับอุณหภูมิน้ำเกลือที่ทำการตรวจวัดเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และระยะเวลาในการผลิตน้ำแข็งที่ได้จากแบบจำลองยังมีความใกล้เคียงกับระยะเวลาผลิตน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังสามารถบ่งบอกถึงพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำเกลือขณะที่มีการยกจำหน่ายมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเกลือต่ำสุดที่ได้จากการบันทึกของโรงงาน และยังสามารถทราบถึงปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตได้ ซึ่งสามารถนำแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์นี้ไปใช้เป็นเครื่องมือในการหาค่าที่ดีที่สุดของรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นและปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตให้เหมาะสมภายใต้เงื่อนไขการผลิตของโรงงานเพื่อการประหยัดพลังงาน

6.2 สรุปผลที่ได้จากวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีกำหนดการพลวัต

จากการนำแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีกำหนดการพลวัตเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์หารูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นและปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตให้เหมาะสมเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยจากวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดสามารถวิเคราะห์หารูปแบบการเดินเครื่องหรือชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นที่เดินในช่วงเวลาความต้องการไฟฟ้าต่ำใน 1 รอบผลิตน้ำแข็งได้เท่ากับ 81 ชั่วโมง และคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็นต่อปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่ายได้เท่ากับ 9.06 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อชอง โดยที่อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความเย็นต่อปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่ายของโรงงานผลิตน้ำแข็งตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 13.97 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อชอง ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินเครื่องทำความเย็นคิดเป็น 35.15 %

แต่รูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นและปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตที่ได้จากงานวิจัยนี้ไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงในกระบวนการผลิตน้ำแข็งของโรงงานเนื่องจากในกระบวนการผลิตจริงมีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้คือปริมาณการจำหน่ายน้ำแข็งในแต่ละวัน ผู้วิจัยจึงมุ่งหวังเพียงได้นำเสนอวิธีการนำแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการหารูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็นและปริมาณน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายที่คงค้างภายในบ่อผลิตเพื่อการประหยัดพลังงาน ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย



รายการอ้างอิง

- อเนก หีบสัมฤทธิ์ (2536). การวิเคราะห์พลังงานในโรงงานทำน้ำแข็งซอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธีรวัฒน์ คลับคล้าย (2555). การศึกษาอิทธิพลของความไม่แน่นอนที่มีต่ออัตราการใช้น้ำที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตน้ำตาล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- พงศธร สุ่มันตกุล (2533). การพาความร้อนในท่อวงรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ธีรวัฒน์ คลับคล้าย และ ธีระชาติ พรพิบูลย์ (2555). แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาล. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 (E-NETT8). 2-4 พฤษภาคม 2555
- ภาณุวัฒน์ เน้อยทอง และ เกียรติกร อัสวมาศบันดือ (2551). การจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งแบบสามมิติโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 (ME-NETT22). 15 -17 ตุลาคม 2551
- ธีระชาติ พรพิบูลย์ (2559). เทอร์โมไดนามิกส์.ม.ป.ท.
- Cengel , Y.A , and Boles , M.A. (1994). **Thermodynamics an engineering approach (3rd edition)**, McGrawHill.
- Frank, M.White. (2009). **Fluid Mechanics (7th edition)**, McGrawHill
- Stoecker , W.F. (1983). **Refrigeration and Air Conditioning (2nd edition)**, McGrawHill
- Stoecker , W.F. (1989). **Design of Thermal System (3rd edition)**, McGrawHill
- Necati, M.Ozisik. (1985). **Heat transfer a basic approach, international edition**, McGrawHill
- ASHRAE Fundamentals Handbook, (2001). **Thermophysical Properties Refrigerants**

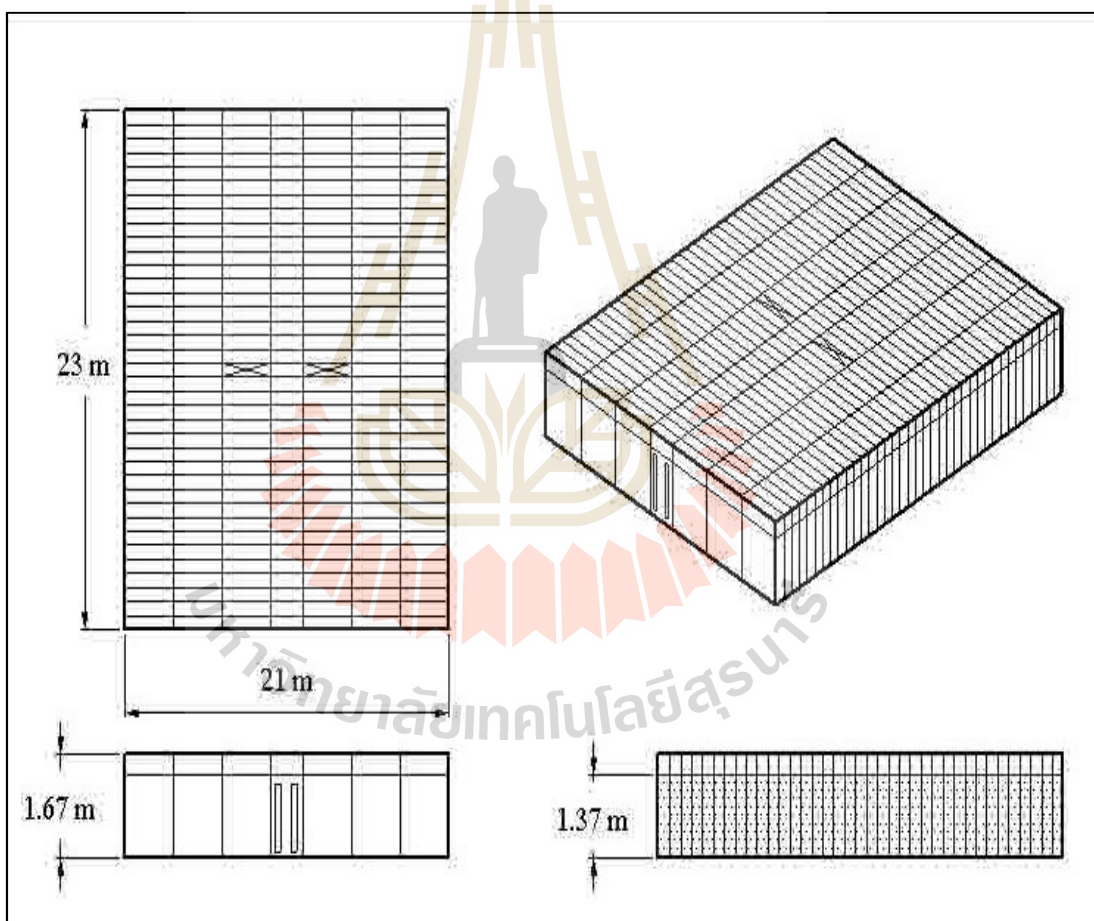
ภาคผนวก ก

ปัจจัยการผลิตของโรงงานและตารางแสดงคุณสมบัติทางเทอร์ไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้องกับ
กระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

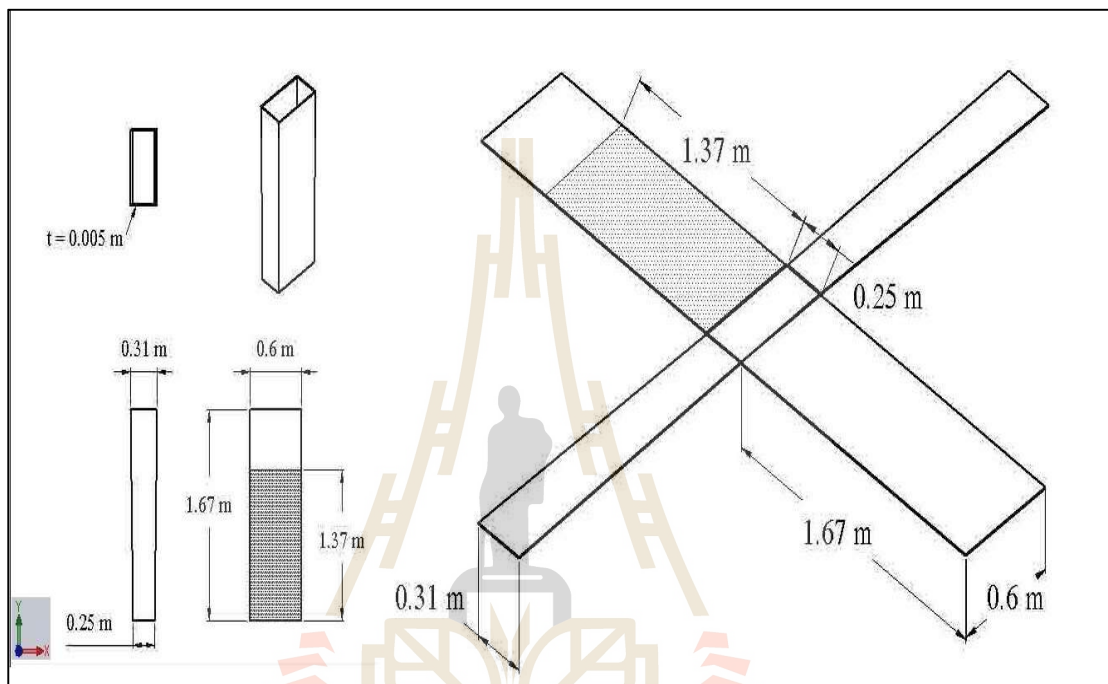
ก.1 พิกัดขนาดของบ่อผลิตและขนาดของน้ำแข็ง

พิกัดขนาดบ่อผลิตน้ำแข็งของของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา มีกำลังการผลิต 1,320 ชอง วางตัวเป็นแถว 37 แถวแต่ละแถวมี 36 ชอง (6 ชุดจำหน่าย) โดยจะมีเครื่องทำระเหยติดตั้งอยู่กึ่งกลางบ่อผลิตและแถวที่ 19 จะมีเครื่องเวียนน้ำเกลือติดตั้งอยู่ที่ผนังที่ติดกับเครื่องทำระเหยทั้งสองด้าน ทำการตรวจวัดขนาดของบ่อผลิตได้ดังนี้ ด้านกว้างมีขนาด 12 เมตร ด้านยาวมีขนาด 23 เมตร และมีความลึกขนาด 1.7 เมตร ซึ่งระดับความลึกของน้ำเกลือที่อยู่ภายในบ่อผลิตอยู่ที่ 1.4 เมตรโดยประมาณ โดยรูปที่ ก.1.1 แสดงพิกัดบ่อผลิตกำลังการผลิต 1,320 ชองของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา



รูปที่ ก.1.1 พิกัดบ่อผลิตกำลังการผลิต 1,320 ชองของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา

และช่องน้ำแข็งมีรูปร่างเป็นทรงพีระมิดหัวตัดโดยได้ทำการตรวจวัดขนาดพิกัดของช่องน้ำแข็งได้ดังนี้ ด้านยาวมีขนาด 0.6 เมตร ด้านกว้างส่วนบนมีขนาด 0.31 เมตร ด้านกว้างส่วนล่างมีขนาด 0.26 เมตร และมีความลึกขนาด 1.67 เมตร ซึ่งระดับน้ำที่บรรจุอยู่ในช่องอยู่ที่ 1.37 เมตร โดยประมาณ โดยรูปที่ ก.1.2 แสดงขนาดพิกัดของน้ำแข็งของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา



รูปที่ ก.1.2 ขนาดพิกัดของน้ำแข็งของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา

ก.2 มวลของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตและมวลของน้ำภายในของน้ำแข็ง

หลังจากที่ทำการตรวจวัดขนาดพิกัดของบ่อผลิตและช่องน้ำแข็งแล้ว สามารถคำนวณหา มวลของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตและมวลของน้ำภายในช่องได้ดังนี้

มวลของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

การหาปริมาตรของน้ำเกลือหาได้ดังนี้

ปริมาตรของน้ำเกลือ = ปริมาตรของบ่อผลิตที่ระดับน้ำเกลือ – ปริมาตรของช่องน้ำแข็ง ทั้งหมดที่เชื่อมอยู่ในบ่อผลิต

โดยที่

รูปทรงของบ่อผลิตนั้นเป็นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากจึงสามารถคำนวณหาปริมาตรของบ่อผลิต ที่ระดับน้ำเกลือได้ดังนี้

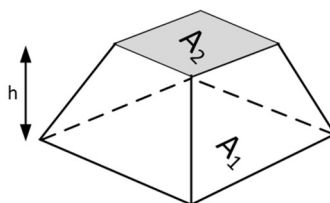
ปริมาตรบ่อผลิตที่ระดับน้ำเกลือ = กว้าง x ยาว x ระดับของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

ทำการแทนค่าจะได้

$$\text{ปริมาตรบ่อผลิต} = 23 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 1.36 \text{ m} = \underline{375.36 \text{ m}^3}$$

ทำการหาปริมาตรของช่องน้ำแข็งที่เชื่อมอยู่ในบ่อผลิตจากรูปทรงของช่องน้ำแข็งที่เป็นทรง พีระมิดหัวตัดซึ่งสามารถหาปริมาตรได้ดังนี้

$$\text{Volume} = \frac{h}{3} (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2})$$



ซึ่ง

h	แทน	ความลึกของระดับน้ำภายในช่องน้ำแข็ง
A_1	แทน	พื้นที่หน้าตัดด้านบนของน้ำแข็ง
A_2	แทน	พื้นที่หน้าตัดด้านล่างของน้ำแข็ง

ทำการแทนค่าจะได้

$$A_1 = 0.31 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} = 0.186 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0.26 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} = 0.156 \text{ m}^2$$

$$Volume = \frac{1.37}{3} (0.186 + 0.156 + \sqrt{0.186 \times 0.156}) = 0.2339 \text{ m}^3 / \text{ช่อง}$$

$$\text{ปริมาตรของช่องน้ำแข็งที่อยู่ภายในบ่อผลิต} = 0.2339 \text{ m}^3 / \text{ช่อง} \times 1,320 \text{ ช่อง} = \underline{\underline{308.75 \text{ m}^3}}$$

ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำเกลือภายในบ่อผลิตได้ดังนี้

$$\text{ปริมาณน้ำเกลือภายในบ่อผลิต} = 375.36 - 308.75 = \underline{\underline{66.61 \text{ m}^3}}$$

จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของสสารจะสามารถคำนวณหามวลของสสารนั้นได้

จาก

$$\rho = \frac{mass}{Volume}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$mass = Volume \times \rho$$

ซึ่ง

ρ แทน ความหนาแน่นของน้ำเกลือซึ่งสามารถหาได้จากคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำเกลือ โดยอ้างอิงจากตารางคุณสมบัติของน้ำเกลือความเข้มข้น 20 % จะมีค่าเท่ากับ $1,176.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

แทนค่าจะได้

$$mass = 66.61 \text{ m}^3 \times 1176.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 78,367 \text{ kg}$$

ดังนั้นมวลของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตมีค่าเท่ากับ **78,367 kg**

มวลของน้ำภายในช่อง

สามารถคำนวณหามวลของน้ำภายในช่องได้ด้วยความสัมพันธ์เดียวกันกับการหามวลของน้ำเกลือ โดยที่ค่าความหนาแน่นของน้ำที่ความดันบรรยากาศโดยอ้างอิงจากตารางคุณสมบัติของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ $1,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ และแทนค่าลงในสมการจะได้

$$mass = 0.2339 \text{ m}^3 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 233.9 \text{ kg}$$

ดังนั้นมวลของน้ำภายในช่องน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ **233.9 kg**

ก.3 ตารางแสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ ก.3.1 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศ

Temperature, T ($^{\circ}C$)	Sat. pressure, P_{sat} (kPa)	Internal energy, $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$		
		Sat. liquid, u_f	Evap, u_{fg}	Sat. vapor, u_g
0.01	0.6117	0.000	2,374.9	2,374.9
5	0.8725	21.019	2,360.8	2,381.8
10	1.2281	42.020	2,346.6	2,388.7
15	1.7057	62.980	2,332.5	2,395.5
20	2.3392	83.913	2,318.4	2,402.3
25	3.1698	104.83	2,304.3	2,409.1
30	4.2469	125.73	2,290.2	2,415.9
35	5.6291	146.63	2,276.0	2,422.7
40	7.3851	167.53	2,261.9	2,429.4
45	9.5953	188.43	2,247.7	2,436.1

ก.4 ตารางแสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำแข็งที่ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ ก.4.1 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำแข็งที่ความดันบรรยากาศ

Temperature, T ($^{\circ}C$)	Sat. pressure, P_{sat} (kPa)	Internal energy, $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$			Thermal Conductivity, k $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$
		Sat. Ice u_i	Subl, u_{ig}	Sat. vapor, u_g	
0.01	0.61169	-333.40	2,707.9	2,374.5	-
0	0.61115	-333.43	2,707.9	2,374.5	2.2140
-2	0.51772	-337.63	2,709.4	2,371.8	2.2312
-4	0.43748	-341.80	2,710.8	2,369.0	2.2484
-6	0.36873	-345.94	2,712.2	2,366.2	2.2656
-8	0.30998	-350.04	2,713.5	2,363.5	2.2828
-10	0.25990	-354.12	2,714.8	2,360.7	2.3000
-12	0.21732	-358.17	2,716.1	2,357.9	2.3172
-14	0.18121	-362.18	2,717.3	2,355.2	2.3344
-16	0.15068	-366.17	2,718.6	2,352.4	2.3516

ก.5 ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 20 %

ตารางที่ ก.5.1 แสดงคุณสมบัติของน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 20 %

Temperature, T ($^{\circ}C$)	Density, ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	Specific Heat, c ($\frac{kJ}{kg \cdot K}$)
0	1,165.0	3.366
-1	1,165.8	3.365
-2	1,166.3	3.362
-3	1,166.6	3.362
-4	1,166.8	3.361
-5	1,167.1	3.359
-6	1,167.5	3.356
-7	1,167.9	3.354
-8	1,168.3	3.352
-9	1,168.7	3.350
-10	1,169.0	3.348
-11	1,169.5	3.346
-12	1,170.0	3.344
-13	1,170.3	3.342
-14	1,170.7	3.339
-15	1,171.0	3.336
-16	1,171.3	3.333
-17	1,171.7	3.330
-18	1,172.0	3.328
-19	1,180.0	3.307
-20	1,188.0	3.290

ก.6 ตารางแสดงคุณสมบัติของอากาศแห้งที่ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ ก.6.1 แสดงคุณสมบัติของอากาศแห้งที่ความดันบรรยากาศ

Temperature, T ($^{\circ}C$)	Density, ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	Specific Heat, c_p ($\frac{kJ}{kg \cdot K}$)
50	1.058	1.015
45	1.075	1.014
40	1.092	1.014
35	1.110	1.013
30	1.128	1.013
25	1.146	1.012
20	1.164	1.012
15	1.186	1.012
10	1.208	1.011
5	1.231	1.011
0	1.252	1.011
-5	1.328	1.010
-10	1.352	1.010

ก.7 ตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุของน้ำแข็ง

วัสดุที่ใช้ผลิตของน้ำแข็งคือ AISI 1020 ซึ่งมีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังแสดงในตารางที่ ก.7.1

ตารางที่ ก.7.1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุของน้ำแข็ง AISI 1020

Density, $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	7,870
Thermal Conductivity, $k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	51.9



ก.8 ตารางแสดงปริมาณจำหน่ายน้ำแข็งและการใช้พลังงานไฟฟ้า ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2562 ของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา

ตารางที่ ก.8.1 แสดงปริมาณจำหน่ายน้ำแข็งและการใช้พลังงานไฟฟ้า ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2562 ของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา

วัน/เดือน/ปี	จันทร์ 01/07/62	อังคาร 02/07/62	พุธ 03/07/62	พฤหัสบดี 04/07/62	ศุกร์ 05/07/62	เสาร์ 06/07/62	อาทิตย์ 07/07/62
ปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่าย (ซอง)	119	142	135	144	150	162	144
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องทำความเย็น (kWh)	1,648	1,652	1,690	1,698	1,717	2,981	2,443

วัน/เดือน/ปี	จันทร์ 08/07/62	อังคาร 09/07/62	พุธ 10/07/62	พฤหัสบดี 11/07/62	ศุกร์ 12/07/62	เสาร์ 13/07/62	อาทิตย์ 14/07/62
ปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่าย (ซอง)	167	169	150	141	145	237	110
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องทำความเย็น (kWh)	1,665	1,692	1,712	1,645	1,711	3,792	2,612

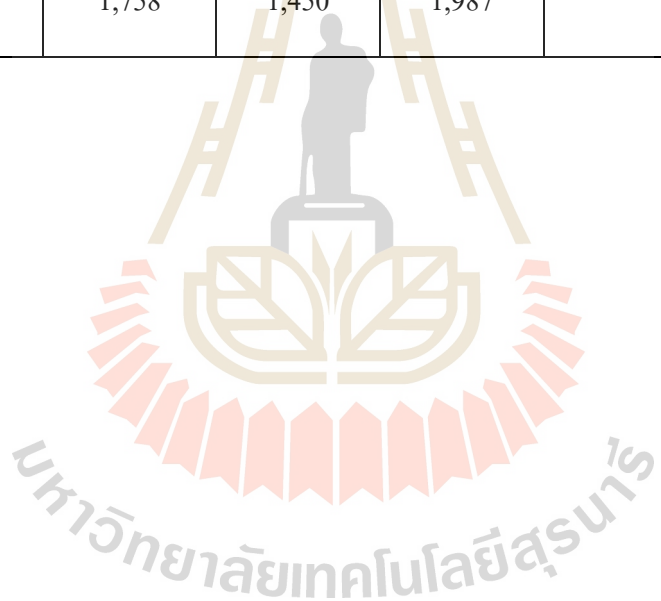
ตารางที่ ก.8.1 ตารางแสดงปริมาณจำหน่ายน้ำแข็งและการใช้พลังงานไฟฟ้า ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2562 ของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	จันทร์ 15/07/62	อังคาร 16/07/62	พุธ 17/07/62	พฤหัสบดี 18/07/62	ศุกร์ 19/07/62	เสาร์ 20/07/62	อาทิตย์ 21/07/62
ปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่าย (ซอง)	191	133	180	134	191	105	136
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องทำความเย็น (kWh)	1,692	3,217	2,931	1,617	1,712	3,701	2,595

วัน/เดือน/ปี	จันทร์ 22/07/62	อังคาร 23/07/62	พุธ 24/07/62	พฤหัสบดี 25/07/62	ศุกร์ 26/07/62	เสาร์ 27/07/62	อาทิตย์ 28/07/62
ปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่าย (ซอง)	200	161	145	155	156	121	143
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องทำความเย็น (kWh)	1,505	1,798	1,751	1,643	1,811	3,166	2,751

ตารางที่ ก.8.1 ตารางแสดงปริมาณจำหน่ายน้ำแข็งและการใช้พลังงานไฟฟ้า ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2562 ของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่ทำการศึกษา (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	จันทร์ 29/07/62	อังคาร 30/07/62	พุธ 31/07/62	ทั้งหมด	kWh/ซอง
ปริมาณน้ำแข็งที่จำหน่าย (ซอง)	144	121	171	4,702	13.97
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องทำความเย็น (kWh)	1,758	1,450	1,987	65,683	



ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์กระบวนการผลิตน้ำแข็งของและตัวอย่างการคำนวณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมวล อุณหภูมิ พลังงานภายในจำเพาะ และพลังงานภายในของน้ำบริสุทธิ์ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

เนื่องจากน้ำภายในช่องผลิตเมื่อถูกทำความเย็นด้วยน้ำเกลือภายในบ่อผลิตจึงทำให้น้ำภายในช่องผลิตมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในจำเพาะหรือมีการเปลี่ยนสถานะและมวลของน้ำภายในช่องผลิตไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะเกิดกระบวนการอยู่ 3 กระบวนการคือ 1. การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในจำเพาะของน้ำภายในช่องผลิตในสถานะของเหลว 2. การเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำภายในช่องผลิตจากของเหลวกลายเป็นน้ำแข็ง 3. การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของน้ำภายในช่องผลิตในสถานะของแข็ง และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างมวล อุณหภูมิ และพลังงานภายในจำเพาะของทั้ง 3 กระบวนการได้ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในจำเพาะของน้ำภายในช่องผลิตในสถานะของเหลว

จากการตรวจวัดมวลของน้ำภายในช่องน้ำแข็งในภาคผนวก ก. จะได้มวลของน้ำภายในช่องผลิตเท่ากับ 233.9 kg ซึ่งมวลของน้ำภายในช่องจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการนี้และพลังงานภายในจำเพาะของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำภายในช่องผลิต จึงทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ ข.1.1 และรูปที่ ข.1.1 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำภายในช่องผลิตและพลังงานภายในของน้ำภายในช่องผลิตในสถานะของเหลว

การเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำภายในช่องผลิตจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง

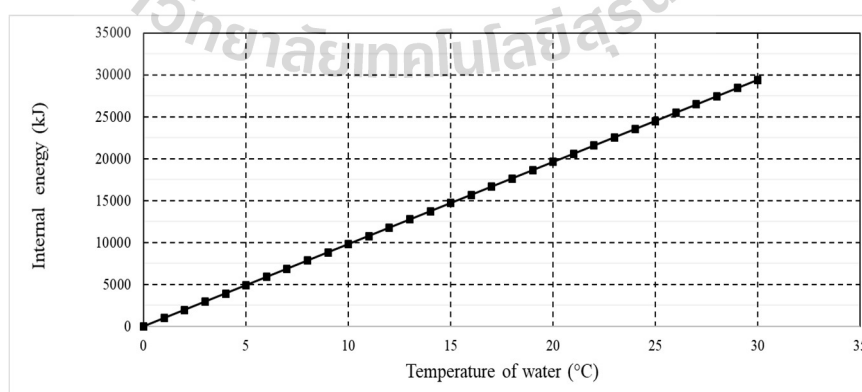
โดยที่กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นขณะที่น้ำภายในช่องผลิตมีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C พลังงานภายในจำเพาะของน้ำจะมีค่าคงที่ เท่ากับ 0 kJ/kg และพลังงานภายในจำเพาะของน้ำแข็งจะมีค่าเท่ากับ -333.43 kJ/kg และเกิดการเปลี่ยนแปลงมวลขึ้น โดยที่มวลของน้ำภายในช่องผลิตจะเริ่มเปลี่ยนเป็นมวลของน้ำแข็งและจะสิ้นสุดกระบวนการนี้เมื่อน้ำภายในช่องผลิตกลายเป็นน้ำแข็งจนเต็มช่อง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงมวลนั้นทำให้เกิดความหนาเสมือนของน้ำแข็ง จึงสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความหนาเสมือนของน้ำแข็ง พลังงานภายในจำเพาะ และพลังงานภายในของน้ำภายในช่องผลิตในขณะที่กำลังเปลี่ยนสถานะได้ดังตารางที่ ข.1.1

ตารางที่ ข.1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ พลังงานภายในจำเพาะ และพลังงานภายใน
ของน้ำภายในของผลึกในสถานะของเหลว

อุณหภูมิของน้ำภายในของ T_w ($^{\circ}C$)	พลังงานภายในจำเพาะของน้ำ u_w $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	พลังงานภายในของน้ำ $U_{block-ice}$ (kJ)
30	125.6753	29,403.9883
28	117.3006	27,444.5957
26	108.926	25,485.2030
24	100.5514	23,525.8104
22	92.17678	21,566.4178
20	83.80217	19,607.0252
18	75.42755	17,647.6326
16	67.05293	15,688.2399
14	58.67831	13,728.8473
12	50.30369	11,769.4547
10	41.92908	9,810.0621
8	33.55446	7,850.6694
6	25.17984	5,891.2768
4	16.80522	3,931.8842
2	8.430604	1,972.4916
0	0	0

ตารางที่ ข.1.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความหนาเสมือนของน้ำแข็ง พลังงานภายใน
จำเพาะ พลังงานภายในของน้ำภายในช่องในขณะที่กำลังเปลี่ยนสถานะ

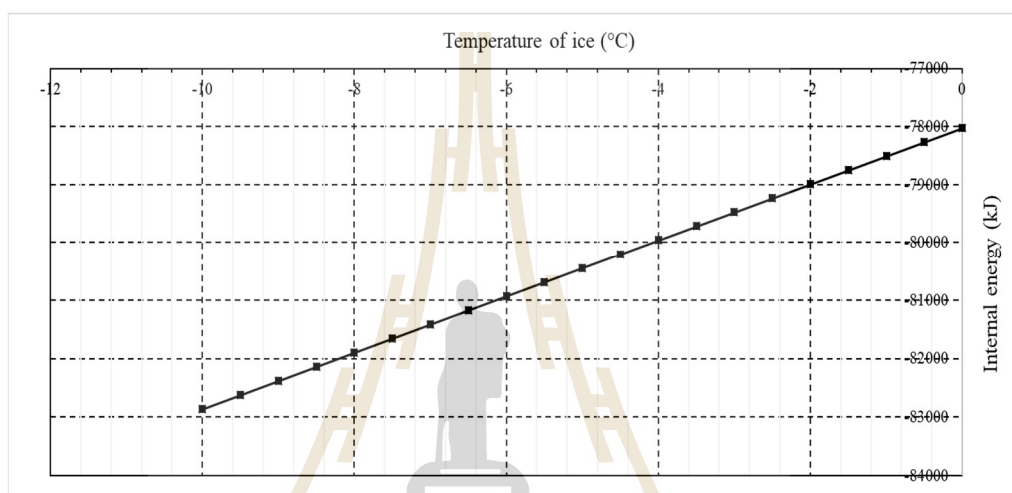
อุณหภูมิ ของน้ำ ภายในช่อง T_w ($^{\circ}C$)	มวลของ น้ำภายใน ช่อง m_w (kg)	มวลของ น้ำแข็ง ภายในช่อง m_{ice} (kg)	พลังงาน จำเพาะของ น้ำ u_w $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	พลังงาน จำเพาะ ของ น้ำแข็ง u_i $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	พลังงาน ภายในของน้ำ ภายในช่อง $U_{block-ice}$ (kJ)	ความ หนา เสมือน ของ น้ำแข็ง L_{ice} (m)
0	233.968	0	0	-333.43	0	0
0	210.2911	23.67694	0	-333.43	-7,895	0.01
0	186.6141	47.35388	0	-333.43	-15,789	0.02
0	162.9372	71.03082	0	-333.43	-23,684	0.03
0	139.2602	94.70776	0	-333.43	-31,578	0.04
0	115.5833	118.3847	0	-333.43	-39,473	0.05
0	91.90636	142.06164	0	-333.43	-47,368	0.06
0	68.22942	165.73858	0	-333.43	-55,262	0.07
0	44.55248	189.41552	0	-333.43	-63,157	0.08
0	20.87554	213.09246	0	-333.43	-71,051	0.09
0	0	233.968	0	-333.43	-78,012	0.098817



รูปที่ ข.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำภายในช่องผลิตและพลังงานภายในของน้ำภายใน
ช่องผลิตในสถานะของเหลว

การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของน้ำภายในช่องผลิตในสถานะของแข็ง

จากการตรวจวัดมวลของน้ำภายในช่องน้ำแข็งในภาคผนวก ก. จะได้มวลของน้ำภายในช่องน้ำแข็งเท่ากับ 233.9 kg ซึ่งมวลของน้ำภายในช่องจะไม่มีเปลี่ยนแปลงในกระบวนการนี้ และพลังงานภายในจำเพาะของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำภายในช่อง จึงทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ ข.1.3 และรูปที่ ข.1.2 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำภายในช่องและพลังงานภายในของน้ำภายในช่องในสถานะของแข็ง



รูปที่ ข.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำภายในช่องและพลังงานภายในของน้ำภายในช่องในสถานะของแข็ง

ตารางที่ ข.1.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ พลังงานภายในจำเพาะ และพลังงานภายในของน้ำภายในช่องในสถานะของแข็ง

อุณหภูมิของน้ำภายในช่อง T_w ($^{\circ}C$)	พลังงานภายในจำเพาะของ น้ำแข็ง u_i $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	พลังงานภายในของน้ำภายใน ช่อง $U_{block-ice}$ (kJ)
0	-333.482	-78,024
-0.5	-334.517	-78,266
-1	-335.551	-78,508
-1.5	-336.586	-78,750
-2	-337.62	-78,992
-2.5	-338.655	-79,234
-3	-339.689	-79,476
-3.5	-340.723	-79,718
-4	-341.758	-79,960
-4.5	-342.792	-80,202
-5	-343.827	-80,444
-5.5	-344.861	-80,686
-6	-345.896	-80,928
-6.5	-346.93	-81,171
-7	-347.964	-81,413
-7.5	-348.999	-81,655
-8	-350.033	-81,897
-8.5	-351.068	-82,139
-9	-352.102	-82,381
-9.5	-353.137	-82,623
-10	-354.171	-82,865

ข.2 การทดลองหาสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องที่อยู่ในบ่อผลิต

ในการวิเคราะห์กระบวนการผลิตน้ำแข็งชองนั้นจำเป็นต้องทราบสถานะของน้ำภายในชองแต่ละช่องที่อยู่ภายในบ่อผลิตเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งชองจากบทที่ 3 นั้นเมื่อน้ำภายในชองมีการเปลี่ยนสถานะจะทำการตรวจวัดสถานะของน้ำภายในชองด้วยการวัดอุณหภูมิของน้ำภายในชองไม่ได้เนื่องจากน้ำมีอุณหภูมิคงที่ 0°C จึงต้องสร้างการทดลองขึ้นมาเพื่อหาสถานะของน้ำเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะโดยการจำลองบ่อผลิตและชองน้ำแข็งขึ้นมาในอัตราส่วน 1 ต่อ 6 เพื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำภายในชองทดลองความหนาของผนังน้ำแข็งที่เกิดขึ้น นำไปสู่การหาอัตราส่วนของน้ำแข็งต่อมวลน้ำภายในชองทดลอง และจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของผนังน้ำแข็งและอัตราส่วนของน้ำแข็งต่อมวลน้ำภายในชองทดลอง เพื่อนำไปใช้ในการหาสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในชองแต่ละช่องที่อยู่ในบ่อผลิตด้วยการวัดความหนาของผนังน้ำแข็งที่เกิดขึ้น โดยทำการทดลองจากการสร้างชองน้ำแข็งจำลองขึ้นมาดังแสดงโดยรูปที่ ข.2.1 แสดงชองน้ำแข็งจำลอง



รูปที่ ข.2.1 ชองน้ำแข็งจำลอง

โดยชองน้ำแข็งจำลองนั้นใช้วัสดุที่ใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้ผลิตชองน้ำแข็งจริง และมีอัตราส่วนของขนาดชองน้ำแข็งทดลองเทียบกับขนาดของชองน้ำแข็งจริงเท่ากับ 1 ต่อ 6

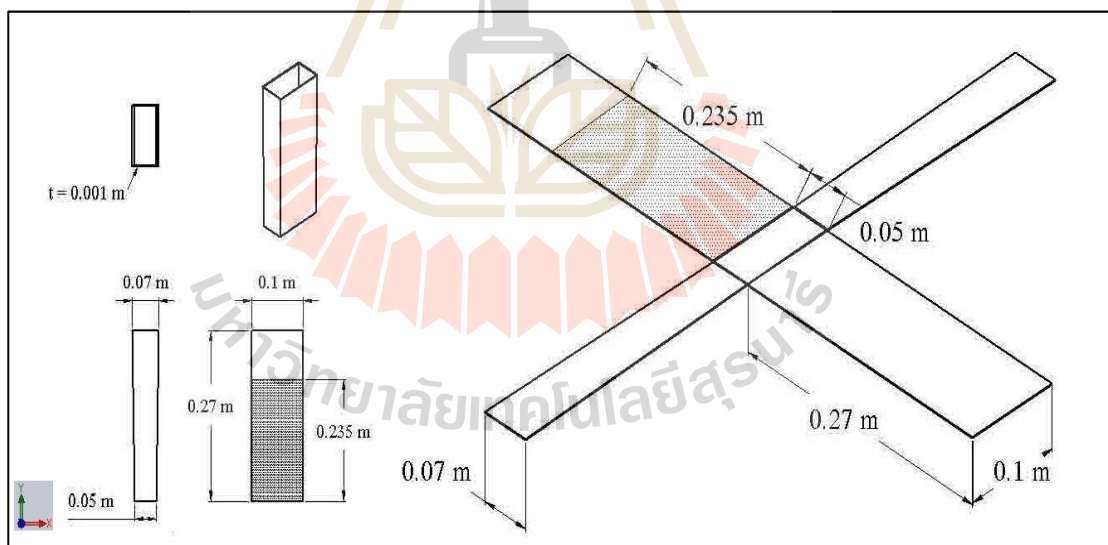
ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมแก่การทดลอง โดยสามารถหามวลของน้ำภายในช่องทดลองได้จากความสัมพันธ์ของความแน่นได้จากสมการที่ 3.8 สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$m = \rho V \quad (3.8)$$

โดยที่ปริมาตรของช่องน้ำแข็งทดลองสามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกันกับการหาปริมาตรของช่องน้ำแข็งจริงดังนี้

$$Volume = \frac{h}{3} (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2})$$

ซึ่งอธิบายพิคัดขนาดของช่องน้ำแข็งทดลอง โดยรูปที่ ข.2.2 แสดงพิคัดขนาดของช่องน้ำแข็งทดลอง



รูปที่ ข.2.2 พิคัดขนาดของช่องน้ำแข็งทดลอง

ซึ่ง

h	แทน	ความลึกของระดับน้ำภายในช่องน้ำแข็ง
A_1	แทน	พื้นที่หน้าตัดด้านบนของน้ำแข็ง
A_2	แทน	พื้นที่หน้าตัดด้านล่างของน้ำแข็ง

ทำการแทนค่าจะได้

$$A_1 = 0.07 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} = 0.007 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0.05 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} = 0.005 \text{ m}^2$$

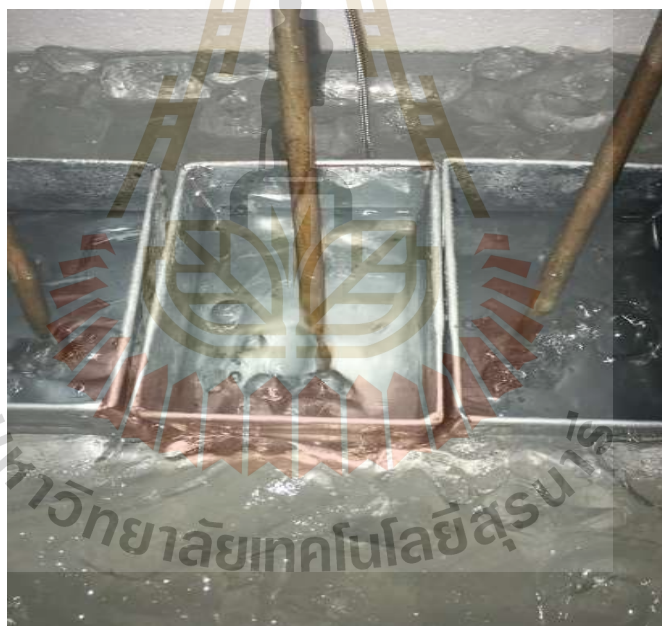
$$Volume = \frac{0.235}{3} (0.007 + 0.005 + \sqrt{0.007 \times 0.005}) = 0.0014 \text{ m}^3 / \text{ช่อง}$$

$$\text{ปริมาตรของช่องน้ำแข็งทดลอง} = 0.0014 \text{ m}^3$$

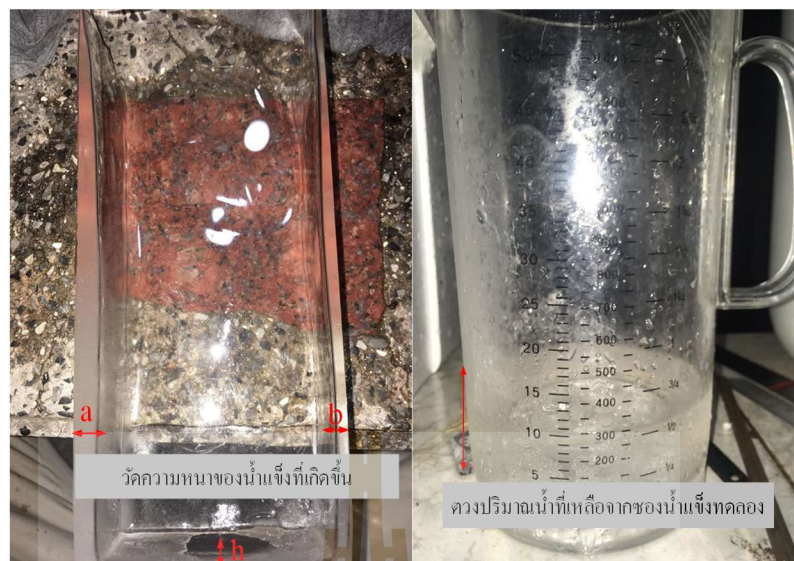
ดังนั้นมวลของน้ำภายในช่องทดลองมีค่าเท่ากับ $0.0014 \times 1000 = 1.4 \text{ kg}$ หรือเท่ากับ 1.4 ลิตร

หลังจากนั้นจึงทำการทดลองโดยทำการเติมน้ำลงในช่องทดลองปริมาณ 1.4 ลิตร แล้วนำช่องน้ำแข็งทดลองไปแช่ลงในบ่อผลิตจำลองซึ่งภายในมีเกลือที่ละลายผสมกับน้ำแข็งหลอดและมีการเวียนน้ำเกลือภายในบ่อผลิตจำลองด้วยปั้มน้ำ อีกทั้งยังมีการเป่าลมให้กับน้ำภายในช่องทดลอง เพื่อที่จะจำลองให้เสมือนกับบ่อผลิตจริง หลังจากทำความเย็นให้กับน้ำภายในช่องทดลองโดยสังเกตว่าเริ่มเกิดน้ำแข็งที่ผิวผนังช่องทดลองจึงทำการตรวจวัดความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นโดยวัดความหนาทั้งสามด้านและตวงวัดปริมาณของน้ำที่เหลืออยู่ภายในช่องน้ำแข็งทดลองจะสามารถหามวลน้ำแข็งที่เกิดขึ้นได้และนำไปหาอัตราส่วนของน้ำแข็งต่อมวลน้ำภายในช่องทดลองเปรียบเทียบกับความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้น

โดยรูปที่ ข.2.3 แสดงการจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง และรูปที่ ข.2.4 แสดงการตรวจวัดความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นและการตวงปริมาณน้ำที่เหลือจากซองน้ำแข็งทดลอง และทำการทดลองซ้ำแบบเดิมแต่ให้เพิ่มระยะเวลาการทำความเย็นเพื่อที่จะให้เกิดมวลน้ำแข็งเพิ่มขึ้นจนสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ของความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นและอัตราส่วนของน้ำแข็งต่อมวลของน้ำภายในซองทดลอง %ice และสามารถเปรียบเทียบความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจริงได้ ดังตารางที่ ข.2.1 หลังจากได้ความสัมพันธ์ของความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นนำไปสู่การตรวจวัดสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในซองแต่ละซองที่อยู่ในบ่อผลิตได้โดยทำการตรวจวัดความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในซองน้ำแข็งจริงแล้วนำไปเปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำแข็งต่อมวลน้ำภายในซองจริงจะสามารถนำไปหามวลของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจริงและนำไปคำนวณหาสถานะเริ่มต้นได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง มวล ความหนาเสมือนของน้ำแข็ง พลังงานภายในจำเพาะ พลังงานภายในของน้ำภายในซองในขณะที่กำลังเปลี่ยนสถานะ ที่กล่าวไว้ในภาคผนวก ข.1



รูปที่ ข.2.3 การจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง



รูปที่ ข.2.4 การตรวจวัดความหนาของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นและการดวงปริมาณน้ำที่เหลือจากของน้ำแข็งทดลอง

โดยสามารถคำนวณหาสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องที่อยู่ภายในบ่อผลิตที่ใช้เป็นข้อมูลในแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของได้ ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในเทอมของพลังงานภายในของน้ำภายในช่องแต่ละชุดจำหน่ายที่อยู่ในบ่อผลิตโดยรูปที่ ข.2.5 แสดง สถานะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องผลิตแต่ละชุดจำหน่ายที่อยู่ในบ่อผลิตจัดให้อยู่ในเทอมของพลังงานภายในของน้ำภายในช่องผลิต ภายใต้กรณีศึกษา

ตารางที่ ข.2.1 ตารางเปรียบเทียบความหนาของน้ำแข็งระหว่างช่องน้ำแข็งทดลองและช่องน้ำแข็งจริง

ตารางเปรียบเทียบค่าความหนาของน้ำแข็ง							
%ice	ช่องน้ำแข็งทดลอง			ช่องน้ำแข็งจริง			%ice
	ความหนา (mm)		ความสูง h (mm)	ความหนา (cm)		ความสูง h (cm)	
	a	b		a	b		
0	0	0	235	0	0	137	0
5	-	-	235	-	-	137	5
10	2	2	235	1.2	1.2	137	10
15	6	6	232	3.6	3.6	135	15
20	7	7	228	4.2	4.2	133	20
25	8	8	228	4.8	4.8	133	25
30	9	9	228	5.4	5.4	133	30
35	10	10	228	6.0	6.0	133	35
40	11	11	228	6.6	6.6	133	40
45	12	12	223	7.2	7.2	130	45
50	15	15	223	9.0	9.0	130	50
55	17	17	222	10.2	10.2	129	55
60	19	19	221	11.4	11.4	129	60
65	20	21	218	12.0	12.6	127	65
70	22	25	213	13.2	15.0	124	70
75	29	32	201	17.4	19.2	117	75
80	35	35	182	21.0	21.0	106	80
85	38	44	145	22.8	26.4	85	85
90	-	-		-	-	-	90
95	-	-		-	-	-	95
100	-	-		-	-	-	100

	1	2	3	4	5	6	
1	-66310	-66310	-66310	-66310	-66310	-66310	1
2	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	2
3	-66310	-66310	-66310	-66310	-66310	-62410	3
4	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	4
5	-62410	-62410	-62410	-62410	-62410	-62410	5
6	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	6
7	-58509	-58509	-58509	-58509	-58509	-58509	7
8	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	8
9	-58509	-58509	-58509	-58509	-58509	-58509	9
10	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	10
11	-58509	-58509	-58509	-58509	-58509	-58509	11
12	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	12
13	-58509	-58509	-58509	-58509	-58509	-58509	13
14	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	14
15	-54608	-54608	-54608	-22233	-22233	-22233	15
16	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	16
17	-22233	-22233	-22233	-22233	-22233	-22233	17
18	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	18
19	-22233	-22233	0	0	-22233	-22233	19
20	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	20
21	-22233	-22233	-22233	-22233	-22233	-22233	21
22	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	22
23	-14822	-14822	-14822	-14822	-78012	-78012	23
24	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	-74111	24
25	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	25
26	-70211	-70211	-70211	-70211	-70211	-70211	26
27	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	27
28	-70211	-70211	-70211	-70211	-70211	-70211	28
29	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	29
30	-70211	-70211	-70211	-70211	-70211	-70211	30
31	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	31
32	-70211	-70211	-70211	-70211	-70211	-70211	32
33	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	33
34	-70211	-70211	-70211	-70211	-70211	-66310	34
35	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	35
36	-66310	-66310	-66310	-66310	-66310	-66310	36
37	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	-78012	37
	1	2	3	4	5	6	

*แถวที่ 19 หลัก 3,4 เป็นตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องเวียนน้ำเกลือจึงไม่มีชุดจำหน่ายน้ำแข็ง

รูปที่ ข.2.5 สภาวะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องผลิตแต่ละชุดจำหน่ายที่อยู่ในบ่อผลิตจัดให้อยู่ในเทอมของพลังงานภายในของน้ำภายในช่องผลิต ภายใต้กรณีศึกษา

ข.3 การคำนวณหาพลังงานความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อในส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ ส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ และส่วนฝาปิดของน้ำแข็ง

อัตราความร้อนที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิน้ำเกลือและน้ำภายในของน้ำแข็ง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการหาอัตราความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อผลิตและฝาปิด โดยอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ของนายเอนก หีบสัมฤทธิ์ (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2536) โดยมีอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์คือ ศ.ดร. จุลละพงษ์ จุลละโพธิ หัวหน้าวิทยานิพนธ์ “การวิเคราะห์พลังงานในโรงงานทำน้ำแข็งของ” วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์อัตราความร้อนเป็นแบบการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) และการพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection) โดยวิเคราะห์จากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในแต่ละด้านของบ่อผลิตและฝาปิดเพื่อนำมาคำนวณหาอัตราการไหลของความร้อนเฉลี่ยผ่านผนังบ่อผลิตและฝาปิดต่อหน่วยพื้นที่ (Heat Flux) โดยแบ่งเป็นสามส่วนได้แก่ 1. อัตราความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อผลิตส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือต่อหน่วยพื้นที่เฉลี่ย 2. อัตราความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อผลิตส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือต่อหน่วยพื้นที่เฉลี่ย 3. อัตราความร้อนที่รั่วไหลผ่านฝาปิดของน้ำแข็งต่อหน่วยพื้นที่เฉลี่ย

จากข้อมูลงานวิจัยของ เอนก หีบสัมฤทธิ์ ได้ทำการหาอัตราความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อในส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ ส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ และส่วนฝาปิดของน้ำแข็ง โดยได้ทำการตรวจวัดอุณหภูมิของอากาศภายนอกบ่อผลิตและน้ำเกลือ อีกทั้งยังตรวจวัดค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราความร้อนที่รั่วไหลได้ดังนี้

อัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อในส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ

อัตราความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อในส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือประกอบไปด้วยผนังอยู่ 3 ด้านของบ่อผลิต ดังแสดงในตารางที่ ข.3.1 ข.3.2 และ ข.3.3

อัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อในส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ

อัตราความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อในส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือประกอบไปด้วยผนังอยู่ 3 ด้านของบ่อผลิต ดังแสดงในตารางที่ ข.3.4 ข.3.5 และ ข.3.6

อัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่รั่วไหลผ่านฝาปิดของน้ำแข็ง

อัตราความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อในส่วนฝาปิดของน้ำแข็ง ดังแสดงในตารางที่ ข.3.7

ตารางที่ ข.3.1 แสดงการหาอัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือของผนังบ่อผลิตค้ำน้ำที่ 1

Time	T_o	$T_{w,o}$	h_o	T_i	$T_{w,i}$	h_i	R_{th}	U	q
								(W/m^2k)	(W/m^2)
01.00	28.3	25.8	4.78	-9.2	-9.2	469.51	7.146	0.136	5.10
02.00	27.8	25.9	4.78	-9.6	-9.6	466.13	7.146	0.136	5.09
03.00	26.1	25.7	4.80	-10.3	-10.3	459.52	7.146	0.136	4.95
04.00	25.8	25.5	4.80	-10.0	-10.0	461.93	7.146	0.136	4.87
05.00	24.9	25.2	4.81	-10.3	-10.3	459.23	7.146	0.136	4.79
06.00	25.1	25.1	4.81	-10.5	-10.5	457.10	7.146	0.136	4.84
07.00	24.5	24.9	4.81	-10.5	-10.5	456.82	7.146	0.136	4.76
08.00	25.9	25.0	4.80	-10.0	-10.0	461.99	7.146	0.136	4.88
09.00	26.5	25.1	4.80	-9.2	-9.2	469.27	7.146	0.136	4.86
10.00	28.8	26.3	4.78	-7.6	-7.6	487.76	7.146	0.136	4.95
11.00	30.3	27.8	4.77	-6.9	-6.9	494.81	7.146	0.136	5.06
12.00	31.5	28.9	4.76	-7.2	-7.2	491.83	7.146	0.136	5.26
13.00	32.0	29.4	4.75	-7.4	-7.4	489.80	7.146	0.136	5.36
14.00	32.3	29.7	4.75	-7.3	-7.3	490.78	7.146	0.136	5.39
15.00	32.2	29.9	4.75	-7.8	-7.8	486.08	7.146	0.136	5.44
16.00	31.9	30.0	4.75	-7.5	-7.5	488.39	7.146	0.136	5.36
17.00	30.4	29.8	4.76	-6.2	-6.2	501.00	7.146	0.136	4.98
18.00	30.0	29.6	4.76	-4.8	-4.8	516.69	7.146	0.136	4.73
19.00	29.2	29.4	4.76	-5.2	-5.2	512.81	7.146	0.136	4.68
20.00	29.5	29.2	4.76	-6.1	-6.1	502.66	7.146	0.136	4.84
21.00	28.4	28.8	4.77	-6.8	-6.8	495.58	7.146	0.136	4.79
22.00	28.5	28.6	4.77	-7.6	-7.6	488.03	7.146	0.136	4.91
23.00	28.2	28.4	4.77	-7.9	-7.9	485.15	7.146	0.136	4.91
24.00	28.0	28.2	4.77	-8.7	-8.7	475.33	7.146	0.136	4.99
เฉลี่ย									4.99

ตารางที่ ข.3.2 แสดงการหาอัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือของผนังบ่อผลิตค้ำน้ำที่ 2

Time	T_o	$T_{w,o}$	h_o	T_i	$T_{w,i}$	h_i	R_{hb}	U	q
								(W/m^2k)	(W/m^2)
01.00	29.7	24.7	1.92	-9.2	-9.2	512.57	7.146	0.130	5.06
02.00	29.4	24.8	1.91	-9.6	-9.6	508.53	7.146	0.130	5.07
03.00	27.7	24.8	1.74	-10.3	-10.3	501.32	7.146	0.130	4.94
04.00	27.4	24.7	1.70	-10.0	-10.0	503.94	7.146	0.130	4.86
05.00	26.5	24.6	1.54	-10.3	-10.3	501.23	7.146	0.130	4.78
06.00	26.7	24.6	1.59	-10.5	-10.5	498.68	7.146	0.130	4.84
07.00	26.1	24.6	1.47	-10.5	-10.5	498.37	7.146	0.130	4.76
08.00	27.5	24.6	1.73	-10.0	-10.0	504.05	7.146	0.130	4.88
09.00	28.1	24.7	1.81	-9.2	-9.2	511.95	7.146	0.130	4.85
10.00	30.4	25.1	2.02	-7.6	-7.6	531.83	7.146	0.130	4.94
11.00	31.9	26.2	2.05	-6.9	-6.9	539.82	7.146	0.130	5.04
12.00	33.1	27.3	2.06	-7.2	-7.2	536.57	7.146	0.130	5.24
13.00	33.6	27.8	2.06	-7.4	-7.4	534.35	7.146	0.130	5.33
14.00	33.9	28.1	2.06	-7.3	-7.3	535.41	7.146	0.130	5.36
15.00	33.9	28.3	2.04	-7.8	-7.8	530.29	7.146	0.130	5.42
16.00	33.5	28.4	1.99	-7.5	-7.5	532.81	7.146	0.130	5.33
17.00	32.8	28.5	1.91	-6.2	-6.2	546.57	7.146	0.130	5.07
18.00	31.8	28.5	1.76	-4.8	-4.8	563.68	7.146	0.130	4.76
19.00	30.8	28.4	1.64	-5.2	-5.2	559.45	7.146	0.130	4.68
20.00	31.1	28.4	1.69	-6.1	-6.1	548.38	7.146	0.130	4.84
21.00	30.0	28.3	1.50	-6.8	-6.8	541.29	7.146	0.130	4.78
22.00	30.0	28.2	1.52	-7.6	-7.6	532.42	7.146	0.130	4.89
23.00	29.8	28.1	1.49	-7.9	-7.9	529.27	7.146	0.130	4.90
24.00	29.4	28.0	1.43	-8.7	-8.7	518.56	7.146	0.130	4.95
เฉลี่ย									4.98

ตารางที่ ข.3.3 แสดงการหาอัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือของผนังบ่อผลิตค้ำน้ำที่ 3

Time	T_o	$T_{w,o}$	h_o	T_1	$T_{w,1}$	h_1	R_{th}	U	q
								(W/m^2k)	(W/m^2)
01.00	32.0	26.8	3.71	-9.2	-9.2	512.60	7.146	0.135	5.56
02.00	32.0	26.9	3.71	-9.6	-9.6	508.53	7.146	0.135	5.62
03.00	32.0	27.0	3.71	-10.3	-10.3	510.32	7.146	0.135	5.71
04.00	32.0	27.1	3.71	-10.0	-10.0	503.95	7.146	0.135	5.67
05.00	32.0	27.1	3.73	-10.0	-10.0	501.23	7.146	0.135	5.67
06.00	32.0	27.2	3.73	-10.5	-10.5	498.68	7.146	0.135	5.74
07.00	32.0	27.2	3.73	-10.5	-10.5	498.68	7.146	0.135	5.74
08.00	32.0	27.3	3.73	-10.3	-10.3	504.02	7.146	0.135	5.71
09.00	32.0	27.4	3.73	-9.2	-9.2	511.96	7.146	0.135	5.56
10.00	32.0	27.4	3.73	-7.6	-7.6	531.83	7.146	0.135	5.35
11.00	32.0	27.5	3.73	-6.9	-6.9	539.36	7.146	0.135	5.25
12.00	32.0	27.6	3.73	-7.2	-7.2	537.00	7.146	0.135	5.29
13.00	32.0	27.6	3.73	-7.4	-7.4	534.62	7.146	0.135	5.32
14.00	32.0	27.6	3.73	-7.3	-7.3	534.90	7.146	0.135	5.31
15.00	32.0	27.7	3.73	-7.8	-7.8	530.29	7.146	0.135	5.37
16.00	32.0	27.7	3.73	-7.5	-7.5	532.81	7.146	0.135	5.33
17.00	32.0	27.8	3.73	-6.2	-6.2	546.57	7.146	0.135	5.16
18.00	32.0	27.9	3.73	-4.8	-4.8	563.68	7.146	0.135	4.97
19.00	32.0	27.9	3.73	-5.2	-5.2	359.45	7.146	0.135	5.02
20.00	32.0	28.0	3.73	-6.1	-6.1	548.38	7.146	0.135	5.14
21.00	32.0	28.0	3.73	-6.8	-6.8	541.29	7.146	0.135	5.24
22.00	32.0	28.1	3.73	-7.6	-7.6	532.42	7.146	0.135	5.35
23.00	32.0	28.1	3.73	-7.9	-7.9	529.27	7.146	0.135	5.39
24.00	32.0	28.1	3.73	-8.7	-8.7	318.56	7.146	0.135	5.49
เฉลี่ย									5.41

ตารางที่ ข.3.4 แสดงการหาอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือของ
ผนังบ่อผลิตค้ำวันที่ 1

Time	T_o	$T_{w,o}$	h_o	T_i	$T_{w,i}$	h_i	R_{th}	U	q
								(W/m^2k)	(W/m^2)
01.00	28.3	25.8	4.78	-2.1	10.5	3.71	2.578	0.327	9.94
02.00	27.8	25.9	4.79	-2.1	10.4	3.69	2.578	0.327	9.78
03.00	26.1	25.7	4.80	-1.9	10.1	3.64	2.578	0.327	9.16
04.00	25.8	25.5	4.80	-1.9	9.8	3.64	2.578	0.327	9.06
05.00	24.9	25.2	4.81	-2.1	9.4	3.62	2.578	0.327	8.83
06.00	25.1	25.1	4.81	-2.1	9.4	3.62	2.578	0.327	8.89
07.00	24.5	24.9	4.80	-2.1	9.3	3.61	2.578	0.327	8.70
08.00	25.9	25.0	4.80	-2.3	17.0	2.79	2.578	0.327	9.22
09.00	26.5	25.1	4.78	-0.2	10.4	3.57	2.578	0.327	8.73
10.00	28.4	26.3	4.77	0.2	10.7	3.52	2.578	0.327	9.22
11.00	30.3	27.8	4.76	1.0	11.3	3.49	2.578	0.327	9.58
12.00	31.5	28.9	4.75	1.7	12.1	3.47	2.578	0.327	9.75
13.00	32.0	29.4	4.75	1.0	11.2	3.59	2.578	0.327	10.14
14.00	32.3	29.7	4.75	-2.1	10.7	3.68	2.578	0.327	11.25
15.00	32.2	29.9	4.75	-2.5	9.8	3.71	2.578	0.327	11.35
16.00	31.9	30.0	4.76	-2.7	9.8	3.68	2.578	0.327	11.31
17.00	30.4	29.8	4.76	-2.1	10.2	3.65	2.578	0.327	10.63
18.00	30.0	29.6	4.76	-1.4	10.5	3.63	2.578	0.327	10.27
19.00	29.2	29.4	4.76	-0.4	11.4	3.56	2.578	0.327	9.68
20.00	29.5	29.2	4.76	-0.2	11.2	3.6	2.578	0.327	9.71
21.00	28.4	28.8	4.77	-0.3	11.0	3.61	2.578	0.327	9.38
22.00	28.5	28.6	4.77	-0.8	10.7	3.63	2.578	0.327	9.58
23.00	28.2	28.4	4.77	-1.1	10.5	3.64	2.578	0.327	9.58
24.00	28.0	28.2	4.78	-1.6	10.1	3.66	2.578	0.327	9.68
เฉลี่ย									9.73

ตารางที่ ข.3.5 แสดงการหาอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือของผนังบ่อผลิตค้ำน้ำที่ 2

Time	T_o	$T_{w,o}$	h_o	T_1	$T_{w,1}$	h_1	R_{th}	U	q
								(W/m^2k)	(W/m^2)
01.00	29.7	24.7	1.92	-2.1	10.1	3.67	2.578	0.297	9.44
02.00	29.4	24.6	1.91	-2.1	10.0	3.97	2.578	0.297	9.36
03.00	27.7	24.6	1.74	-1.9	9.8	3.62	2.578	0.297	8.79
04.00	27.4	24.7	1.70	-1.9	9.0	3.62	2.578	0.297	8.70
05.00	26.5	24.6	1.54	-2.1	9.0	3.60	2.578	0.297	8.49
06.00	26.7	24.6	1.59	-2.1	9.0	3.60	2.578	0.297	8.55
07.00	26.1	24.6	1.47	-2.1	9.0	3.59	2.578	0.297	8.38
08.00	27.5	24.6	1.73	-2.3	16.5	2.74	2.578	0.297	8.85
09.00	28.1	24.7	1.81	-0.2	10.1	3.54	2.578	0.297	8.41
10.00	30.4	25.1	2.02	0.2	10.4	3.49	2.578	0.297	8.97
11.00	31.9	26.2	2.05	1.0	11.0	3.46	2.578	0.297	9.18
12.00	33.1	27.3	2.06	1.9	11.7	3.65	2.578	0.297	9.27
13.00	33.6	27.8	2.06	1.0	10.8	3.68	2.578	0.297	9.68
14.00	33.9	28.1	2.06	-2.1	9.7	3.65	2.578	0.297	10.69
15.00	33.9	28.3	2.04	-2.5	9.4	3.62	2.578	0.297	10.81
16.00	33.5	28.4	1.99	-2.7	9.5	3.60	2.578	0.297	10.75
17.00	32.8	28.5	1.91	-2.1	9.8	3.52	2.578	0.297	10.37
18.00	31.6	28.5	1.76	-1.4	10.1	3.52	2.578	0.297	9.80
19.00	30.8	28.4	1.64	-0.4	11.0	3.52	2.578	0.297	9.27
20.00	31.1	28.4	1.69	-0.2	10.8	3.57	2.578	0.297	9.30
21.00	30.0	28.3	1.50	-0.3	10.6	3.58	2.578	0.297	9.00
22.00	30.0	28.2	1.52	-0.8	10.3	3.60	2.578	0.297	9.15
23.00	29.8	28.1	1.49	-1.1	10.1	3.61	2.578	0.297	9.18
24.00	29.4	28.0	1.43	-1.6	9.7	3.62	2.578	0.297	9.21
เฉลี่ย									9.32

ตารางที่ ข.3.6 แสดงการหาอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนผนังที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือของ
ผนังบ่อผลิตค้ำน้ำที่ 3

Time	T_o	$T_{w,o}$	h_o	T_i	$T_{w,i}$	h_i	R_{th}	U	q
								(W/m^2k)	(W/m^2)
01.00	28.3	26.8	3.71	-2.1	9.7	3.64	2.578	0.320	9.73
02.00	27.8	26.9	3.71	-2.1	9.5	3.63	2.578	0.320	9.57
03.00	26.1	27.0	3.71	-1.9	9.3	3.58	2.578	0.320	8.96
04.00	29.8	27.1	3.71	-1.9	9.0	3.58	2.578	0.320	10.14
05.00	24.9	27.1	3.73	-2.1	8.6	3.56	2.578	0.320	8.65
06.00	25.1	27.2	3.73	-2.1	8.6	3.56	2.578	0.320	8.70
07.00	24.5	27.2	3.73	-2.1	8.5	3.55	2.578	0.320	8.51
08.00	25.9	27.3	3.73	-2.3	16.0	2.63	2.578	0.320	9.02
09.00	26.5	27.4	3.73	-0.2	9.6	3.50	2.578	0.320	8.54
10.00	28.8	27.5	3.73	0.2	9.9	3.44	2.578	0.320	9.15
11.00	30.3	27.6	3.73	1.0	10.5	3.41	2.578	0.320	9.38
12.00	31.5	27.6	3.73	1.9	11.2	3.38	2.578	0.320	9.47
13.00	32.0	27.6	3.73	0.1	10.2	3.52	2.578	0.320	10.21
14.00	32.3	27.7	3.73	-2.1	9.2	3.61	2.578	0.320	11.01
15.00	32.2	27.7	3.73	-2.5	8.9	3.64	2.578	0.320	11.10
16.00	31.9	27.8	3.73	-2.7	8.9	3.61	2.578	0.320	11.07
17.00	30.4	27.8	3.73	-2.1	9.3	3.58	2.578	0.320	10.40
18.00	30.0	27.9	3.73	-1.4	9.6	3.55	2.578	0.320	10.05
19.00	29.2	27.8	3.73	-0.4	10.5	3.48	2.578	0.320	9.47
20.00	29.5	28.0	3.73	-0.2	10.3	3.53	2.578	0.320	9.50
21.00	28.4	28.0	3.73	-0.3	10.1	3.54	2.578	0.320	9.18
22.00	28.5	28.1	3.73	-0.8	9.7	3.56	2.578	0.320	9.38
23.00	28.2	28.1	3.73	-1.1	9.6	3.57	2.578	0.320	9.38
24.00	28.0	28.1	3.73	-1.6	9.2	3.59	2.578	0.320	9.47
เฉลี่ย									9.59

ตารางที่ ข.3.7 แสดงการหาอัตราการความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในส่วนฝาปิดของน้ำแข็ง

Time	T_o	$T_{w,o}$	h_o	T_i	$T_{w,i}$	h_i	R_{ih}	U	q
								(W/m^2k)	(W/m^2)
01.00	28.3	20.9	3.28	-2.1	10.2	0.28	0.447	0.232	7.05
02.00	27.8	20.6	3.25	-2.1	10.0	0.28	0.447	0.232	6.94
03.00	26.1	19.5	3.18	-1.9	9.7	0.28	0.447	0.232	6.50
04.00	25.8	19.2	3.18	-1.9	9.4	0.28	0.447	0.232	6.43
05.00	24.9	18.5	3.15	-2.1	9.0	0.27	0.447	0.232	6.26
06.00	25.1	18.4	3.18	-2.1	9.0	0.27	0.447	0.232	6.31
07.00	24.5	18.2	3.15	-2.1	8.9	0.27	0.447	0.232	6.17
08.00	25.9	18.4	3.31	-2.3	11.9	0.27	0.447	0.232	6.54
09.00	26.5	18.5	3.38	-0.2	9.9	0.27	0.447	0.232	6.19
10.00	28.8	18.9	3.53	0.2	10.2	0.27	0.447	0.232	6.64
11.00	30.3	20.2	3.57	1.0	11.4	0.27	0.447	0.232	6.80
12.00	31.5	21.3	3.57	-1.9	12.5	0.27	0.447	0.232	7.75
13.00	32.0	21.6	3.60	0.1	11.5	0.28	0.447	0.232	7.40
14.00	32.3	21.7	3.60	-2.1	10.5	0.28	0.447	0.232	7.98
15.00	32.3	21.8	3.57	-2.5	10.2	0.29	0.447	0.232	8.07
16.00	31.9	21.8	3.53	-2.7	10.3	0.28	0.447	0.232	8.03
17.00	30.4	21.7	3.41	-2.1	10.6	0.28	0.447	0.232	7.54
18.00	30.0	21.6	3.38	-1.4	10.9	0.28	0.447	0.232	7.28
19.00	29.2	21.4	3.31	-0.4	11.7	0.27	0.447	0.232	6.87
20.00	29.5	21.4	3.38	-0.2	11.4	0.28	0.447	0.232	6.89
21.00	28.4	21.2	3.25	-0.3	11.2	0.28	0.447	0.232	6.66
22.00	28.5	21.0	3.28	-0.8	10.8	0.28	0.447	0.232	6.80
23.00	28.2	20.9	3.28	-1.1	10.6	0.28	0.447	0.232	6.80
24.00	28.0	20.7	3.28	-1.6	10.2	0.28	0.447	0.232	6.87
เฉลี่ย									6.95

จากการหาอัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตทั้งสามส่วนในแต่ละด้านของบ่อผลิตแล้วสามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ดังแสดงในตารางที่ ข.3.8 และจากการตรวจวัดพิถีพิถันขนาดของบ่อผลิตและฝาปิดของน้ำแข็งของ โรงน้ำแข็งที่ทำการศึกษสามารถหาพื้นที่ผนังของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่มีอัตราความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังทั้ง 3 ส่วน ดังแสดงในตารางที่ ข.3.9

ตารางที่ ข.3.8 แสดงค่าเฉลี่ยของอัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิตผ่านผนังแต่ละด้าน

	อัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิต $q \left(\frac{W}{m^2} \right)$			
	ผนังบ่อผลิต ด้านที่ 1	ผนังบ่อผลิต ด้านที่ 2	ผนังบ่อผลิต ด้านที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ	4.99	4.98	5.41	5.13
ส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ	9.73	9.32	9.59	9.54
ส่วนฝาปิดของน้ำแข็ง	6.95			6.95

ตารางที่ ข.3.9 พื้นที่ผนังของโรงงานผลิตน้ำแข็งที่มีอัตราความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังทั้ง 3 ส่วน

พื้นที่ผนัง (m^2)		
ส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ	ส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ	ส่วนฝาปิดของน้ำแข็ง
98.82	21.4	288.92

จึงสามารถคำนวณหาอัตราความร้อนสุทธิที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อผลิตในส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ ส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ และส่วนของฝาปิดของน้ำแข็ง ได้ดังแสดงในตารางที่ ข.3.10

ตารางที่ ข.3.10 แสดงอัตราความร้อนสุทธิที่รั่วไหลผ่านผนังบ่อผลิตในส่วนต่างๆ

อัตราความร้อนสุทธิที่รั่วไหลผ่านผนัง $\dot{Q}_{leak, total}$ (kW)		
ส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำเกลือ	ส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเกลือ	ส่วนฝาปิดของน้ำแข็ง
0.51	0.20	2.01
อัตราความร้อนสุทธิที่รั่วไหลเข้าสู่บ่อผลิต		2.72

ข.4 การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective heat transfer coefficient) ของน้ำภายในช่องผลิตและน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยการวัดความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลกับผิวของแข็ง ในส่วนของน้ำภายในช่องนั้นมีการเป่าลมอัดเข้ามาจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำภายในช่อง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตนั้นจะเกิดเฉพาะขณะที่น้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของเหลวเท่านั้นเนื่องจากมีความแตกต่างกันของอุณหภูมิระหว่างน้ำภายในช่องผลิตกับผิวของน้ำแข็ง ถ้าหากน้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของผสมของเหลวและของแข็งอิมัลชันแล้วคือน้ำภายในช่องเริ่มเกิดน้ำแข็งจะทำให้ไม่สามารถหาความแตกต่างของอุณหภูมิได้เพราะว่าน้ำภายในช่องจะมีอุณหภูมิกงที่ คือ 0°C ที่ความดันบรรยากาศ และที่ผิวของน้ำแข็งที่สัมผัสกับน้ำก็จะมีอุณหภูมิกงที่ เท่ากับ 0°C เช่นกันจึงไม่เกิดการพาความร้อนขึ้น ซึ่งสามารถทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตได้เมื่อทราบอัตราการความร้อนสัมผัสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำภายในช่อง ดังแสดงในสมการที่ ข.4.1 ดังนี้

$$\dot{Q}_{ice} = \left(\frac{m_{block-ice} C_w (T_{w,t+\Delta t} - T_{w,t})}{\Delta t} \right) \times 1000 \quad ; \text{W} \quad (\text{ข.4.1})$$

ซึ่งเมื่อเราทราบอัตราการความร้อนสัมผัสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำภายในช่องแล้วนั้นจะสามารถทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตได้จากสมการนี้

$$\dot{Q}_{ice} = h_w A \Delta T \quad (\text{ข.4.2})$$

เนื่องจากการพาความร้อนจะเกิดจากความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลกับผิวของแข็ง จึงต้องพิจารณาเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่องน้ำแข็งและอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ตำแหน่งผิวของน้ำแข็งจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตได้ ดังสมการนี้

$$h_w = \frac{\dot{Q}_{ice}}{A (T_{w,avg} - T_{sw,avg})} \quad ; \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (\text{ข.4.3})$$

ซึ่งจากสมการที่กล่าวมานั้นนำไปสู่การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตโดยทำการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่อง และ อุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งผิวของน้ำแข็งและทำการบันทึกอุณหภูมิน้ำทั้ง 2 ตำแหน่ง ในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางบันทึกผลการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ ข.4.1

จากตารางแสดงผลการทดลองสามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่เวลาเริ่มต้น 0 วินาที สามารถวัดอุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่องได้เท่ากับ 13.8°C และ อุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งผิวของน้ำแข็งได้เท่ากับ 13.7°C และเมื่อเวลาผ่านไป 60 วินาที อุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่องมีค่าเท่ากับ 13.2°C และอุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งผิวของน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ 13.1°C จึงสามารถนำไปคำนวณหาอัตราความร้อนสัมผัสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำได้ดังนี้ เมื่อกำหนดให้ ค่าความจุความร้อนของน้ำมีค่าเท่ากับ $4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (อ้างอิงจากตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์)

$$\dot{Q}_{ice} = \left(\frac{m_{block-ice} C_w (T_{w,t+\Delta t} - T_{w,t})}{\Delta t} \right) \times 1000 \text{ ;W}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\dot{Q}_{ice} = \left(\frac{233.9 \times 4.18 \times (13.2 - 13.8)}{60} \right) \times 1000$$

จะได้

$$\dot{Q}_{ice} = -9,739.40 \text{ W} \quad \text{โดยที่ เครื่องหมาย (-) หมายถึงน้ำมีการสูญเสียพลังงานภายในหรือคายความร้อน}$$

ตารางที่ ข.4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิต

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ของน้ำแข็ง T_w ($^{\circ}C$)	อุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งผิวของ น้ำแข็ง T_{sw} ($^{\circ}C$)
0	13.8	13.7
60	13.2	13.1
120	12.6	12.5
180	12.1	12
240	11.5	11.3
300	11	10.8
360	10.3	10.1
420	9.8	9.6
480	9.4	9.2
540	8.9	8.7
600	8.4	8.2
660	8	7.8
720	7.6	7.5
780	7.3	7.1
840	6.9	6.8
900	6.6	6.5

หลังจากที่หาอัตราความร้อนสัมผัสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำได้แล้วจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตได้ดังนี้

$$h_w = \frac{\dot{Q}_{ice}}{A_{block-ice} (T_{w,avg} - T_{sw,avg})}$$

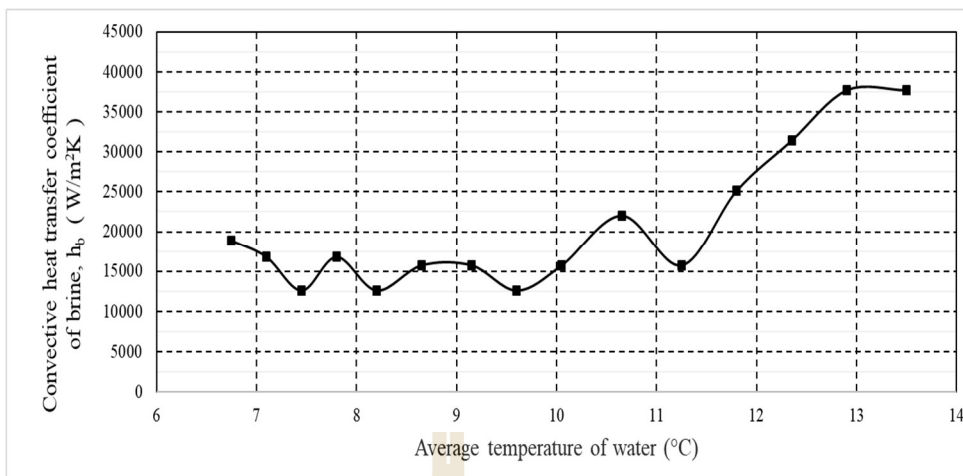
แทนค่าลงในสมการ

$$h_w = \frac{9739.4}{2.582 \times \left(\frac{13.8 + 13.2}{2} - \frac{13.7 + 13.1}{2} \right)}$$

จะได้

$$h_w = 37,720.3718 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

ซึ่งจากการทดลองสามารถหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำภายในช่องที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่อง โดยรูปที่ ข.4.1 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่อง เมื่อสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตได้แล้วนั้นสามารถนำไปสู่การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตได้จากกลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในช่องกับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตดังสมการนี้



รูปที่ ข.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่อง

$$\dot{Q}_{ice} = \frac{A_{block-ice} (T_w - T_b)}{\left(\frac{1}{h_w} + \frac{L_{ice}}{k_{ice}} + \frac{L_{mold}}{k_{mold}} + \frac{1}{h_b} \right)} ; W \quad (3.15)$$

เนื่องจากการพาความร้อนจะเกิดจากความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลกับผิวของแข็ง จึงต้องพิจารณาเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตและอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเกลือที่ตำแหน่งผิวของน้ำแข็งจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตได้ ดังสมการนี้

$$h_b = \frac{1}{\left[\left(\frac{A_{block-ice} (T_{w,avg} - T_{b,avg})}{\dot{Q}_{ice}} \right) - \left(\frac{L_{mold}}{k_{mold}} + \frac{L_{ice}}{k_{ice}} + \frac{1}{h_w} \right) \right]} \quad (ข.4.4)$$

จากการพิจารณาการพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตจะเกิดเฉพาะช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำภายในช่องซึ่งหมายความว่า จะไม่มีเทอมของการพาความร้อนในช่วงเวลาที่น้ำภายในช่องเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง

แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำภายในช่องแทน ทำให้ไม่เกิดอัตราความร้อนสัมผัสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำภายในช่องผลิตแต่จะเกิดอัตราความร้อนแฝงที่ทำให้น้ำภายในช่องเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง จึงสามารถจัดรูปสมการที่ ข.4.1 และสมการที่ ข.4.4 ใหม่จะได้

$$\dot{Q}_{ice} = \left(\frac{u_{i@T_w=0^\circ C} (m_{ice,t+\Delta t} - m_{ice,t})}{\Delta t} \right) \times 1000 \quad ; W \quad (ข.4.5)$$

และจะได้

$$h_b = \frac{1}{\left[\left(\frac{A_{block-ice} (T_{w,avg} - T_{b,avg})}{\dot{Q}_{ice}} \right) - \left(\frac{L_{mold}}{k_{mold}} + \frac{L_{ice,avg}}{k_{ice}} \right) \right]} \quad (ข.4.6)$$

ในทางกลับกันเมื่อน้ำภายในช่องผลิตมีสถานะเป็นของเหลว และเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำภายในช่อง จึงไม่เกิดการนำความร้อนของผนังน้ำแข็งซึ่งหมายความว่าไม่มีเทอมของความหนาเสมือนของผนังน้ำแข็ง แต่จะเกิดการพาความร้อนระหว่างน้ำภายในช่องที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่องกับผิวของช่องน้ำแข็งแทน จึงสามารถจัดรูปสมการที่ ข.4.4 ใหม่จะได้

$$h_b = \frac{1}{\left[\left(\frac{A_{block-ice} (T_{w,avg} - T_{b,avg})}{\dot{Q}_{ice}} \right) - \left(\frac{L_{mold}}{k_{mold}} + \frac{1}{h_w} \right) \right]} \quad (ข.4.7)$$

เนื่องจากอุณหภูมิน้ำเกลือในบ่อผลิตแต่ละตำแหน่งมีความแตกต่างจึงไม่สามารถที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือได้จึงต้องทำการตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำภายในช่องที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่อง อุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวของน้ำแข็ง และอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตในแต่ละตำแหน่งของบ่อผลิตและทำการบันทึกอุณหภูมิทั้ง 3 ตำแหน่ง ในระยะเวลาที่กำหนด แล้วนำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือในแต่ละตำแหน่ง

แล้วนำมาหาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต โดยทำการทดลองทั้ง 2 กรณี คือกรณีที่น้ำภายในช่องยังไม่เกิดน้ำแข็ง และกรณีที่น้ำภายในช่องเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังแสดงในตารางบันทึกผลการทดลอง ตารางที่ ข.4.2

จากตารางที่ ข.4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต สามารถนำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตทั้ง 2 กรณี ดังตัวอย่างการคำนวณ

กรณีน้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของเหลว ณ ตำแหน่งที่ 1

ที่เวลาเริ่มต้น 0 วินาที สามารถวัดอุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่องได้เท่ากับ 13.8°C อุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งผิวของน้ำแข็งได้เท่ากับ 13.7°C และอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตได้เท่ากับ -3.5°C และเมื่อเวลาผ่านไป 60 วินาที อุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่องมีค่าเท่ากับ 13.2°C อุณหภูมิน้ำที่ตำแหน่งผิวของน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ 13.1°C และอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตมีค่าเท่ากับ -3.5°C จึงสามารถนำไปคำนวณหาอัตราความร้อนสัมผัสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำได้ดังนี้ เมื่อกำหนดให้ ค่าความจุความร้อนของน้ำมีค่าเท่ากับ $4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (อ้างอิงจากตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์)

$$\dot{Q}_{ice} = \left(\frac{m_{block-ice} C_w (T_{w,t+\Delta t} - T_{w,t})}{\Delta t} \right) \times 1000 \text{ ;W}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\dot{Q}_{ice} = \left(\frac{233.9 \times 4.18 \times (13.2 - 13.8)}{60} \right) \times 1000$$

จะได้

$$\dot{Q}_{ice} = -9,739.40 \text{ W} \quad \text{โดยที่ เครื่องหมาย (-) หมายถึงน้ำมีการสูญเสียพลังงานภายในหรือคายความร้อน}$$

ตารางที่ ข.4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือ
ภายในบ่อผลิต

ตำแหน่งที่ 1				ตำแหน่งที่ 2			
น้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของเหลว				น้ำภายในช่องเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง			
เวลา (วินาที)	0	60	เฉลี่ย	เวลา (วินาที)	0	16,740	เฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่ง กึ่งกลางของ น้ำแข็ง T_w ($^{\circ}C$)	13.8	13.2	13.5	อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่งกึ่งกลาง ของน้ำแข็ง T_w ($^{\circ}C$)	0	0	0
อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่งผิวของ น้ำแข็ง T_{sw} ($^{\circ}C$)	13.7	13.1	13.4	อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่งผิวของ น้ำแข็ง T_{sw} ($^{\circ}C$)	0	0	0
อุณหภูมิ น้ำเกลือภายใน บ่อผลิต T_b ($^{\circ}C$)	-3.5	-3.5	-3.5	อุณหภูมิน้ำเกลือ ภายในบ่อผลิต T_b ($^{\circ}C$)	-3	-2.1	-2.55
				ความหนาของ ผนังน้ำแข็งด้าน a (cm)	1	4.5	-
				ความหนาของ ผนังน้ำแข็งด้าน b (cm)	1.5	2	-

ตารางที่ ข.4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือ
ภายในบ่อผลิต (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 3				ตำแหน่งที่ 4			
น้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของเหลว				น้ำภายในช่องเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง			
เวลา (วินาที)	0	60	เฉลี่ย	เวลา (วินาที)	0	8,640	เฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่ง กึ่งกลางของ น้ำแข็ง T_w ($^{\circ}C$)	13.2	12.6	12.9	อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่งกึ่งกลาง ของน้ำแข็ง T_w ($^{\circ}C$)	0	0	0
อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่งผิวของ น้ำแข็ง T_{sw} ($^{\circ}C$)	13.1	12.5	12.8	อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่งผิวของ น้ำแข็ง T_{sw} ($^{\circ}C$)	0	0	0
อุณหภูมิ น้ำเกลือภายใน บ่อผลิต T_b ($^{\circ}C$)	-3.5	-3.3	-3.4	อุณหภูมิน้ำเกลือ ภายในบ่อผลิต T_b ($^{\circ}C$)	-4	-4	-4
				ความหนาของ ผนังน้ำแข็งด้าน a (cm)	13.5	16	-
				ความหนาของ ผนังน้ำแข็งด้าน b (cm)	3	3	-

ตารางที่ ข.4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือ
ภายในบ่อผลิต (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 5				ตำแหน่งที่ 6			
น้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของเหลว				น้ำภายในช่องเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง			
เวลา (วินาที)	0	180	เฉลี่ย	เวลา (วินาที)	0	11,400	เฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่ง กึ่งกลางของ น้ำแข็ง T_w ($^{\circ}C$)	10.3	8.9	9.6	อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่งกึ่งกลาง ของน้ำแข็ง T_w ($^{\circ}C$)	0	0	0
อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่งผิวของ น้ำแข็ง T_{sw} ($^{\circ}C$)	10.1	8.7	9.4	อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่งผิวของ น้ำแข็ง T_{sw} ($^{\circ}C$)	0	0	0
อุณหภูมิ น้ำเกลือภายใน บ่อผลิต T_b ($^{\circ}C$)	-3.3	-3.3	-3.3	อุณหภูมิน้ำเกลือ ภายในบ่อผลิต T_b ($^{\circ}C$)	-4	-4	-4
				ความหนาของ ผนังน้ำแข็งด้าน a (cm)	13.5	16	-
				ความหนาของ ผนังน้ำแข็งด้าน b (cm)	5	5	-

ตารางที่ ข.4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือ
ภายในบ่อผลิต (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 7				ตำแหน่งที่ 8			
น้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของเหลว				น้ำภายในช่องเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง			
เวลา (วินาที)	0	120	เฉลี่ย	เวลา (วินาที)	0	7,800	เฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่ง กึ่งกลางของ น้ำแข็ง T_w ($^{\circ}C$)	7.3	6.6	6.95	อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่ง กึ่งกลางของ น้ำแข็ง T_w ($^{\circ}C$)	0	0	0
อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่งผิวของ น้ำแข็ง T_{sw} ($^{\circ}C$)	7.1	6.5	6.8	อุณหภูมิน้ำที่ ตำแหน่งผิว ของน้ำแข็ง T_{sw} ($^{\circ}C$)	0	0	0
อุณหภูมิน้ำเกลือ ภายในบ่อผลิต T_b ($^{\circ}C$)	-3.5	-3.5	-3.5	อุณหภูมิ น้ำเกลือภายใน บ่อผลิต T_b ($^{\circ}C$)	-3.4	-3.4	-3.4
				ความหนาของ ผนังน้ำแข็ง ด้าน a (cm)	5.5	6	-
				ความหนาของ ผนังน้ำแข็ง ด้าน (cm)	3	4	-

หลังจากที่หาอัตราความร้อนสัมผัสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำได้แล้วจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตได้ดังนี้

$$h_w = \frac{\dot{Q}_{ice}}{A_{block-ice} (T_{w,avg} - T_{sw,avg})}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$h_w = \frac{9739.4}{2.582 \times \left(\frac{13.8 + 13.2}{2} - \frac{13.7 + 13.1}{2} \right)}$$

จะได้

$$h_w = 37,720.37 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

หลังจากที่คำนวณอัตราความร้อนสัมผัสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำภายในช่องผลิตและหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในช่องผลิตได้แล้วนั้นจะสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตกรณีที่น้ำภายในช่องมีสถานะเป็นของเหลวได้จากสมการนี้

$$h_b = \frac{1}{\left[\left(\frac{A_{block-ice} (T_{w,avg} - T_{b,avg})}{\dot{Q}_{ice}} \right) - \left(\frac{L_{mold}}{k_{mold}} + \frac{1}{h_w} \right) \right]} \quad (ข.4.7)$$

แทนค่าลงในสมการ

$$h_b = \frac{1}{\left[\left(\frac{2.582 \times (13.5 - (-3.5))}{9,739.4} \right) - \left(\frac{0.005}{51.9} + \frac{1}{37720.37} \right) \right]}$$

จะได้

$$h_b = 228.10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

กรณีน้ำภายในช่องผลิตเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง ณ ตำแหน่งที่ 2

ในกรณีนี้อุณหภูมิของน้ำภายในช่องผลิตที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่องและที่ตำแหน่งผิวของน้ำแข็งจะมีค่าคงที่ เท่ากับ 0°C ฉะนั้นจะไม่สามารถหาอัตราการความร้อนสัมผัสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำได้ แต่จะเกิดอัตราการความร้อนแฝงที่ทำให้น้ำภายในช่องผลิตเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งแทน โดยจะทำการตรวจวัดความหนาของผนังน้ำแข็งที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ภายใต้อัตราเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นนำความหนาของผนังที่เกิดขึ้นในเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดไปคำนวณหาอัตราส่วนของน้ำแข็งต่อมวลน้ำภายในช่องผลิตจะได้มวลของน้ำแข็งที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาความหนาเสมือนของน้ำแข็งที่เกิดขึ้น โดยที่ระยะเวลาเริ่มต้น 0 วินาทีทำการวัดความหนาด้าน a ได้เท่ากับ 1 cm และความหนาของผนังน้ำแข็งด้าน b ได้เท่ากับ 1.5 cm นำไปคำนวณหาอัตราส่วนของน้ำแข็งต่อมวลน้ำภายในช่องผลิตได้เท่ากับ 8.9 % คิดเป็นมวลน้ำแข็งได้เท่ากับ 20.73 kg ซึ่งนำไปคำนวณหาความหนาเสมือนของผนังน้ำแข็งจะมีค่าเท่ากับ 0.00876 m และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 16,740 วินาที ทำการวัดความหนาด้าน a ได้เท่ากับ 4.5 cm และความหนาของผนังน้ำแข็งด้าน b ได้เท่ากับ 2 cm นำไปคำนวณหาอัตราส่วนของน้ำแข็งต่อมวลน้ำภายในช่องผลิตได้เท่ากับ 23.92 % คิดเป็นมวลน้ำแข็งได้เท่ากับ 55.75 kg ซึ่งนำไปคำนวณหาความหนาเสมือนของผนังน้ำแข็งจะมีค่าเท่ากับ 0.0235 m หลังจากนั้นจะนำไปคำนวณหาอัตราการความร้อนแฝงที่ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งได้จากสมการนี้

$$\dot{Q}_{ice} = \left(\frac{u_{i@T_w=0^{\circ}c} (m_{ice,t+\Delta t} - m_{ice,t})}{\Delta t} \right) \times 1000 \quad ; W \quad (ข.4.5)$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$\dot{Q}_{ice} = \left(\frac{-333.43 \times (55.74 - 20.73)}{16740} \right) \times 1000 \quad ; W$$

จะได้

$$\dot{Q}_{ice} = -697.30 \text{ W} \quad \text{โดยที่ เครื่องหมาย } (-) \text{ หมายถึง น้ำมีการสูญเสียพลังงานภายใน หรือคายความร้อน}$$

หลังจากที่คำนวณหาอัตราการความร้อนแฝงที่ทำให้น้ำภายในช่องผลิตเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นน้ำแข็งได้แล้ว จะสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตกรณีที่น้ำภายในช่องผลิตเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งได้จากสมการนี้

$$h_b = \frac{1}{\left[\left(\frac{A_{block-ice} (T_{w,avg} - T_{b,avg})}{\dot{Q}_{ice}} \right) - \left(\frac{L_{mold}}{k_{mold}} + \frac{L_{ice,avg}}{k_{ice}} \right) \right]} \quad (ข.4.6)$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$h_b = \frac{1}{\left[\left(\frac{2.582 \times (0 - (-2.55))}{697.30} \right) - \left(\frac{0.005}{51.9} + \frac{0.0162}{2.215} \right) \right]}$$

จะได้

$$h_b = 486.81 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

หลังจากทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตในแต่ละตำแหน่งของบ่อผลิตสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของน้ำเกลือภายในบ่อผลิตได้ดังตารางที่ ข.4.3

ตารางที่ ข.4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

ตำแหน่งที่	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือ ภายในบ่อผลิต h_b $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$
1	228.10
2	486.81
3	238.18
4	362.79
5	236.26
6	72.24
7	218.12
8	249.97
เฉลี่ย	262

ข.5 การวิเคราะห์หาอัตราการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

โดยสามารถหาอัตราการทำความเย็น (\dot{Q}_{ref}) ได้โดยทำการทดลองการหาภาระการทำความเย็นสุทธิที่น้ำภายในช่องผลิตถ่ายเทให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตโดยทำการตรวจวัดสถานะของน้ำภายในช่องผลิตแต่ละชุดจำหน่ายจำแนกเป็นกลุ่มโดยแบ่งกลุ่มตามคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำภายในช่องผลิตและทำการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเกลือที่เวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุด จากนั้นจะนำไปคำนวณหาอัตราการทำความเย็นด้วยวิธีการสมดุลพลังงานและมวลโดยให้น้ำเกลือภายในบ่อผลิตเป็นปริมาตรควบคุม โดยผลการตรวจวัดในชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2 สามารถแสดงในตารางที่ ข.5.1 และ ตารางที่ ข.5.2 ตามลำดับดังนี้

หลังจากที่ทำการตรวจวัดสถานะของน้ำภายในช่องผลิตโดยจำแนกกลุ่มตามคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำและตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเกลือที่เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดแล้วเสร็จจะสามารถคำนวณหาภาระการทำความเย็นสุทธิที่น้ำภายในช่องถ่ายเทให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตได้จากสมการกลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในช่องผลิตกับน้ำเกลือดังสมการนี้

$$\dot{Q}_{ice} = \frac{A_{block-ice} (T_w - T_b)}{\left(\frac{1}{h_w} + \frac{L_{ice}}{k_{ice}} + \frac{L_{mold}}{k_{mold}} + \frac{1}{h_b} \right)} \quad (3.15)$$

จากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดสามารถวิเคราะห์หาตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาภาระการทำความเย็นสุทธิในชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2 ได้ดังตารางที่ ข.5.3 และ ข.5.4 ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ ข.5.1 ผลการตรวจวัดสถานะของน้ำภายในช่องผลิตและอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต
ชุดการทดลองที่ 1

กลุ่ม	อุณหภูมิน้ำ ภายในช่อง T_w ($^{\circ}C$)	อุณหภูมิ น้ำเกลือ ภายในบ่อ ผลิตที่เวลา เริ่มต้น $T_{b,t}$ ($^{\circ}C$)	อุณหภูมิ น้ำเกลือภายใน บ่อผลิตที่เวลา สิ้นสุด $T_{b,t+\Delta t}$ ($^{\circ}C$)	ความ หนาของ ผนังแข็ง ด้าน (cm)		อัตราส่วน ของ น้ำแข็งต่อ มวลน้ำ ภายใน ช่อง %ice (%)	จำนวน น้ำแข็ง ของ (ช่อง)
				a	b		
1	0	-4.8	-3.4	-	-	100	120
2	0	-4.8	-3.4	-	-	100	24
3	0	-4.8	-3.4	-	-	100	234
4	0	-4.8	-3.4	-	-	100	90
5	0	-4.8	-3.4	-	-	100	24
6	0	-4.8	-3.4	-	-	100	162
7	0	-4.8	-3.4	-	-	100	24
8	0	-4.8	-3.4	-	-	100	108
9	0	-4.8	-3.4	-	-	100	24
10	0	-4.8	-3.4	-	-	100	162
11	0	-4.8	-3.4	20	21	80	18
12	0	-4.8	-3.4	11	12	63	114
13	0	-4.8	-3.4	6	7	40	24
14	0	-4.8	-3.4	5.5	6.5	35	162
15	0	-4.8	-3.4	4	4	21	30
Δt (sec)	3,600						

ตารางที่ ข.5.2 ผลการตรวจวัดสถานะของน้ำภายในช่องผลิตและอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต
ชุดการทดลองที่ 2

กลุ่ม	อุณหภูมิน้ำ ภายในช่อง T_w ($^{\circ}C$)	อุณหภูมิ น้ำเกลือ ภายในบ่อ ผลิตที่เวลา เริ่มต้น $T_{b,t}$ ($^{\circ}C$)	อุณหภูมิ น้ำเกลือ ภายในบ่อ ผลิตที่เวลา สิ้นสุด $T_{b,t+\Delta t}$ ($^{\circ}C$)	ความ หนาของ ผนังแข็ง ด้าน (cm)		อัตราส่วน ของน้ำแข็ง ต่อมวลน้ำ ภายในช่อง %ice (%)	จำนวน น้ำแข็ง ของ (ช่อง)
				a	b		
1	0	-8	-8.3	-	-	100	108
2	0	-8	-8.3	-	-	100	24
3	0	-8	-8.3	-	-	100	234
4	0	-8	-8.3	-	-	80	162
5	0	-8	-8.3	6	7	36	114
6	0	-8	-8.3	-	-	100	90
7	0	-8	-8.3	-	-	100	48
8	0	-8	-8.3	-	-	100	162
9	0	-8	-8.3	-	-	100	120
10	0	-8	-8.3	-	-	100	24
11	0	-8	-8.3	-	-	100	24
12	0	-8	-8.3	-	-	100	120
13	0	-8	-8.3	-	-	100	24
14	0	-8	-8.3	17	18	77	18
15	0	-8	-8.3	19	21	80	24
Δt (sec)	1,860						

ตารางที่ ข.5.3 แสดงค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาภาระการทำความเย็นสุทธิของชุดการทดลองที่ 1

กลุ่ม	$T_{b,avg}$ ($^{\circ}C$)	$T_{w,avg}$ ($^{\circ}C$)	$A_{block-ice}$ (m^2)	L_{mold} (m)	k_{mold} $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$	L_{ice} (m)	k_{ice} $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$	h_b $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$	\dot{Q}_{ice} (kW)
1	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	26.28
2	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	5.26
3	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	51.24
4	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	19.71
5	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	5.26
6	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	35.48
7	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	5.26
8	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	23.65
9	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	5.26
10	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	35.48
11	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0787	2.215	262	4.83
12	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0626	2.215	262	37.47
13	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0388	2.215	262	11.84
14	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0347	2.215	262	87.59
15	-4.1	0	2.582	0.005	51.9	0.0212	2.215	262	23.48
ภาระการทำความเย็นสุทธิ $\sum_{i=1}^{15} \dot{Q}_{ice}^i$ (kW)					378.06				

ตารางที่ ข.5.4 แสดงค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาภาระการทำความเย็นสุทธิของชุดการทดลองที่ 2

กลุ่ม	$T_{b,avg}$ ($^{\circ}C$)	$T_{w,avg}$ ($^{\circ}C$)	$A_{block-ice}$ (m^2)	L_{mold} (m)	k_{mold} ($\frac{W}{m \cdot K}$)	L_{ice} (m)	k_{ice} ($\frac{W}{m \cdot K}$)	h_b ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)	\dot{Q}_{ice} (kW)
1	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	47.01
2	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	10.45
3	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	101.86
4	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0787	2.215	262	86.40
5	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0357	2.215	262	119.80
6	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	39.18
7	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	20.89
8	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	70.52
9	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	52.24
10	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	10.45
11	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	10.45
12	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	52.24
13	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0984	2.215	262	10.45
14	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0762	2.215	262	9.89
15	-8.15	0	2.582	0.005	51.9	0.0787	2.215	262	12.80
ภาระการทำความเย็นสุทธิ $\sum_{i=1}^{15} \dot{Q}_{ice}^i$ (kW)									654.62

หลังจากที่คำนวณหาภาระการทำความเย็นสุทธิที่น้ำภายในของผลิตถ่ายเทให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตเสร็จแล้ว สามารถคำนวณหาอัตราการทำความเย็นได้จากวิธีการสมดุลพลังงานและมวล โดยให้น้ำเกลือภายในบ่อผลิตเป็นปริมาตรควบคุมดังสมการที่

$$\left[\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{ice}^n + \dot{Q}_{leak, total} - \dot{Q}_{ref} \right] = \frac{1}{\Delta t} \left[\left(m_b c_b (T_{b,t+\Delta t} - T_{b,t}) \right) \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \quad (3.28)$$

สามารถจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\dot{Q}_{ref} = -1 \times \left\{ \left[\frac{1}{\Delta t} \left[\left(m_b c_b (T_{b,t+\Delta t} - T_{b,t}) \right) \right]_{t \rightarrow t+\Delta t} \right] - \dot{Q}_{leak, total} - \sum_{i=1}^{15} \dot{Q}_{ice}^i \right\} \quad (ข.5.1)$$

นำภาระการทำความเย็นสุทธิในแต่ละชุดการทดลองมาแทนค่าลงในสมการ ข.5.1 เพื่อทำการหาอัตราการทำความเย็นในชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ ข.5.5 และ ข.5.6 ตามลำดับดังนี้

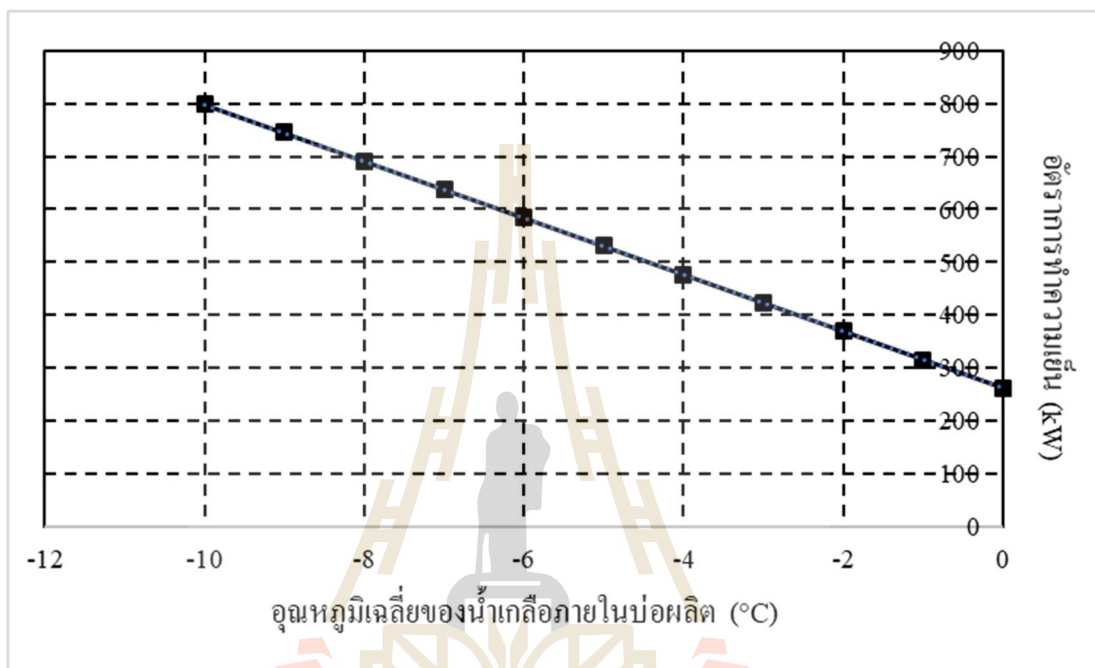
ตารางที่ ข.5.5 แสดงการหาอัตราการทำความเย็นของชุดการทดลองที่ 1

Δt (sec)	m_b (kg)	c_b $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$	$T_{b,t}$ ($^{\circ}C$)	$T_{b,t+\Delta t}$ ($^{\circ}C$)	$T_{b,avg}$ ($^{\circ}C$)	$\sum_{i=1}^{15} \dot{Q}_{ice}^i$ (kW)	$\dot{Q}_{leak, total}$ (kW)	\dot{Q}_{ref} (kW)
3,600	78,367	3.33	-4.8	-3.4	-4.1	378.06	2.72	482.27

ตารางที่ ข.5.6 แสดงการหาอัตราการทำความเย็นของชุดการทดลองที่ 2

Δt (sec)	m_b (kg)	c_b $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$	$T_{b,t}$ ($^{\circ}C$)	$T_{b,t+\Delta t}$ ($^{\circ}C$)	$T_{b,avg}$ ($^{\circ}C$)	$\sum_{i=1}^{15} \dot{Q}_{ice}^i$ (kW)	$\dot{Q}_{leak, total}$ (kW)	\dot{Q}_{ref} (kW)
1,860	78,367	3.33	-8	-8.3	-8.15	654.62	2.72	699.43

จากผลการทดลองการหาอัตราการทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2 สามารถหาความสัมพันธ์ของอัตราการทำความเย็นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต โดยรูปที่ ข.5.1 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการทำความเย็นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต



รูปที่ ข.5.1 ความสัมพันธ์ของอัตราการทำความเย็นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต

ข.6 การคำนวณหาอัตราการไหลและอุณหภูมิของลมอัดเป่าในช่องผลิต

ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งชองนั้นจะมีการเป่าลมเข้าสู่ในช่องเพื่อที่จะรวบรวมสิ่งสกปรกที่เหลือจากกระบวนการกรองน้ำให้มารวมกันอยู่ที่แกนกลางของชองน้ำแข็งแล้วถูกตัดออกก่อนที่จะจำหน่าย โดยลมอัดเมื่อออกจากเครื่องผลิตลมอัดจะมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากกระบวนการอัดทำให้น้ำภายในชองที่ถูกลมอัดเป่านั้นได้รับความร้อนจากลมอัดจึงทำให้น้ำภายในชองมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน จึงต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าพลังงานความร้อนที่ลมอัดถ่ายเทให้กับน้ำภายในชอง โดยทำการตรวจวัดอัตราการไหลโดยมวลของลมอัดที่เป่าในในแต่ละชอง รวมถึงอุณหภูมิของลมอัดที่เป่าในน้ำแต่ละชองด้วย ซึ่งจะทำการตรวจวัดอัตราการไหลของลมอัดด้วยเครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer) ที่ปลายท่อลมก่อนที่จะเป่าน้ำภายในชอง และทำการตรวจวัดอุณหภูมิของลมอัดที่ปลายท่อลมตลอดแนวบ่อผลิต หลังจากนั้นก็ทำการตรวจนับจำนวนชองน้ำแข็งที่ใช้ลมอัดอยู่ ณ ขณะตรวจวัด แล้วบันทึกลงในตารางบันทึกผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ ข.6.1

ตารางที่ ข.6.1 ตารางบันทึกผลการทดลองหาอัตราการไหลและอุณหภูมิของลมอัดเป่าในช่องผลิต

ความเร็วของลมอัด $v_{ca} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$	1.198	
ขนาดหน้าตัดท่อลมอัด $D_{ca} \text{ (m)}$	0.007	
จำนวนชองที่ใช้ลมอัด (ชอง)	144	
อุณหภูมิลมอัดในแต่ละตำแหน่งของบ่อผลิต $T_{ca} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	ตำแหน่งที่ 1	37.2
	ตำแหน่งที่ 2	30.7
	ตำแหน่งที่ 3	26.7
	เฉลี่ย	31.53

หลังจากทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แล้วนั้น จะสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการไหลของลมอัดเป่าในช่องผลิตได้จากสมการนี้

$$\dot{m}_{ca} = \rho_{ca} A v_{ca} \quad ; \quad \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{(ข.6.1)}$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$\dot{m}_{ca} = 1.18 \times \left(\frac{\pi \times (0.007)^2}{4} \right) \times 1.198$$

จะได้อัตราการไหลของลมอัดมีค่าเท่ากับ

$$\dot{m}_{ca} = 0.0000544 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

และสามารถสรุปผลการหาอัตราการไหลและอุณหภูมิของลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิตได้ดังตารางที่ ข.6.2

ตารางที่ ข.6.2 สรุปผลการหาอัตราการไหลและอุณหภูมิของลมอัดเป่าน้ำภายในช่องผลิต

อัตราการไหลโดยมวลของลมอัด $\dot{m}_{ca} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$	อุณหภูมิลมอัดที่เป่าน้ำภายในช่อง $T_{ca,in} \left(^\circ\text{C} \right)$
0.0000544	31.53

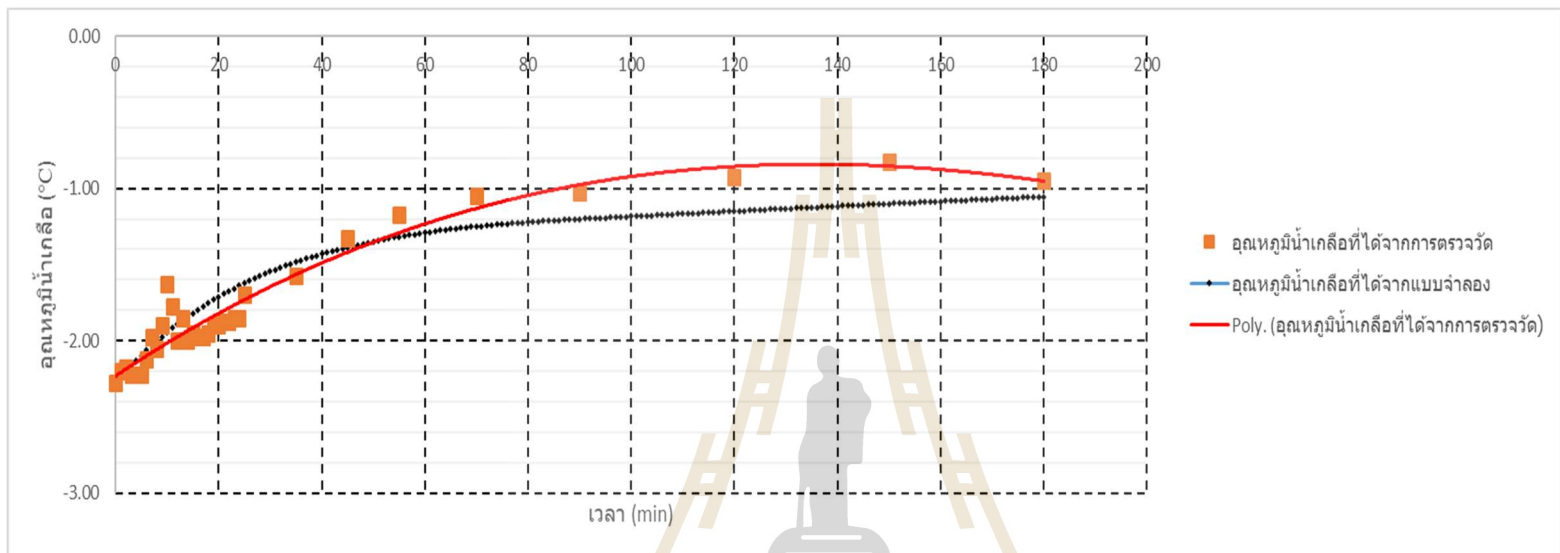
ข.7 ผลการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยบ่อผลิตจำลอง

บ่อผลิตจำลองสร้างโดยการนำกล่องโฟมที่เป็นฉนวนกันความร้อนซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ 0.032 m^3 และมีการทำความเย็นด้วยน้ำแข็งละลายกับน้ำเกลือบรรจุอยู่ในบ่อผลิตจำลองมีมวลเท่ากับ 38 kg ซึ่งมีอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับมวลน้ำเกลือภายในบ่อผลิตจริง และมีการใช้ปั๊มน้ำขนาดเล็กติดตั้งไว้ภายในบ่อผลิตจำลองเพื่อทำการเวียนน้ำเกลือและมีลมอัดเป่าน้ำภายในช่องจำลองเพื่อจำลองพฤติกรรมให้เสมือนกับกระบวนการผลิตจริงของโรงงาน โดยทำการทดลองด้วยการนำช่องทดลองที่ภายในบรรจุน้ำดิบมาแช่ลงในบ่อผลิตจำลอง แล้วทำการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเกลือในแต่ละตำแหน่งของบ่อผลิตจำลอง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตในแต่ละช่วงเวลา หลังจากนั้นก็นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการศึกษาและสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในช่องผลิตจำลองและอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตจำลองไปวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจวัดสามารถแสดงได้ในตารางที่ ข.7.1 และรูปที่ ข.7.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลการตรวจวัดจริงในบ่อผลิตจำลอง



ตารางที่ ข.7.1 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตจำลองในแต่ละช่วงเวลา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตจำลอง				
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	เฉลี่ย
0	-2.2	-2.1	-2	-2.8	-2.28
1	-2	-2.1	-2	-2.7	-2.20
2	-2	-2	-2	-2.7	-2.18
3	-2.1	-2.1	-2	-2.7	-2.23
4	-2.1	-2.1	-2	-2.7	-2.23
5	-2.1	-2.1	-2	-2.7	-2.23
6	-2.1	-1.9	-1.9	-2.6	-2.13
7	-1.9	-1.7	-1.8	-2.5	-1.98
8	-2	-1.8	-1.8	-2.6	-2.05
9	-1.9	-1.6	-1.7	-2.4	-1.90
10	-1.6	-1.3	-1.5	-2.1	-1.63
11	-1.8	-1.5	-1.6	-2.2	-1.78
12	-2	-1.7	-1.8	-2.5	-2.00
13	-2	-1.5	-1.6	-2.3	-1.85
14	-2	-1.8	-1.7	-2.5	-2.00
15	-2	-1.8	-1.6	-2.4	-1.95
16	-2	-1.8	-1.7	-2.4	-1.98
17	-2	-1.8	-1.7	-2.4	-1.98
18	-1.9	-1.8	-1.7	-2.4	-1.95
19	-1.9	-1.7	-1.7	-2.3	-1.90
20	-1.9	-1.7	-1.7	-2.3	-1.90
21	-1.9	-1.7	-1.7	-2.2	-1.88
22	-2	-1.7	-1.6	-2.2	-1.88
23	-1.9	-1.7	-1.6	-2.2	-1.85
24	-1.9	-1.7	-1.7	-2.1	-1.85
25	-1.8	-1.6	-1.6	-1.8	-1.70
35	-1.8	-1.5	-1.5	-1.5	-1.58
55	-1	-1.1	-1.2	-1.4	-1.18
90	-0.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.03
120	0.1	-1.2	-1.3	-1.3	-0.93
150	0.3	-1.1	-1.1	-1.4	-0.83
180	0.2	-1.2	-1.2	-1.6	-0.95



รูปที่ ข.7.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลการตรวจวัดจริงในบ่อผลิตจำลอง



ภาคผนวก ค

ผลที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิต

น้ำแข็งซอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค.1 ผลที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

ในการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของนั้นใช้โปรแกรม MATLAB เป็นตัวช่วยในการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษา ซึ่งสามารถแสดงผลที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ โดยตารางที่ ค.1.1 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป และตารางที่ ค.1.2 แสดงค่าพลังงานภายในของน้ำภายในช่องภายใต้ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป



ตารางที่ ค.1.1 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป

time (s)	T _{bl} (°C)	time (s)	T _{bl} (°C)	time (s)	T _{bl} (°C)	time (s)	T _{bl} (°C)	time (s)	T _{bl} (°C)	time (s)	T _{bl} (°C)
60	-5.40	2,460	-2.39	4,860	-1.14	7,260	-0.59	9,660	-0.34	12,060	-0.22
120	-5.30	2,520	-2.34	4,920	-1.12	7,320	-0.58	9,720	-0.34	12,120	-0.22
180	-5.19	2,580	-2.30	4,980	-1.10	7,380	-0.57	9,780	-0.33	12,180	-0.21
240	-5.08	2,640	-2.25	5,040	-1.08	7,440	-0.57	9,840	-0.33	12,240	-0.21
300	-4.97	2,700	-2.21	5,100	-1.06	7,500	-0.56	9,900	-0.33	12,300	-0.21
360	-4.87	2,760	-2.17	5,160	-1.04	7,560	-0.55	9,960	-0.32	12,360	-0.21
420	-4.77	2,820	-2.13	5,220	-1.02	7,620	-0.54	10,020	-0.32	12,420	-0.20
480	-4.67	2,880	-2.09	5,280	-1.01	7,680	-0.53	10,080	-0.31	12,480	-0.20
540	-4.57	2,940	-2.05	5,340	-0.99	7,740	-0.53	10,140	-0.31	12,540	-0.20
600	-4.48	3,000	-2.01	5,400	-0.97	7,800	-0.52	10,200	-0.31	12,600	-0.20
660	-4.38	3,060	-1.97	5,460	-0.96	7,860	-0.51	10,260	-0.30	12,660	-0.20
720	-4.29	3,120	-1.93	5,520	-0.94	7,920	-0.50	10,320	-0.30	12,720	-0.19
780	-4.21	3,180	-1.90	5,580	-0.92	7,980	-0.50	10,380	-0.30	12,780	-0.19
840	-4.12	3,240	-1.86	5,640	-0.91	8,040	-0.49	10,440	-0.29	12,840	-0.19
900	-4.04	3,300	-1.83	5,700	-0.89	8,100	-0.48	10,500	-0.29	12,900	-0.19
960	-3.95	3,360	-1.79	5,760	-0.88	8,160	-0.48	10,560	-0.29	12,960	-0.19
1,020	-3.87	3,420	-1.76	5,820	-0.87	8,220	-0.47	10,620	-0.28	13,020	-0.19
1,080	-3.79	3,480	-1.73	5,880	-0.85	8,280	-0.46	10,680	-0.28	13,080	-0.18
1,140	-3.72	3,540	-1.69	5,940	-0.84	8,340	-0.46	10,740	-0.28	13,140	-0.18
1,200	-3.64	3,600	-1.66	6,000	-0.82	8,400	-0.45	10,800	-0.27	13,200	-0.18
1,260	-3.57	3,660	-1.63	6,060	-0.81	8,460	-0.44	10,860	-0.27	13,260	-0.18
1,320	-3.50	3,720	-1.60	6,120	-0.80	8,520	-0.44	10,920	-0.27	13,320	-0.18
1,380	-3.42	3,780	-1.57	6,180	-0.78	8,580	-0.43	10,980	-0.26	13,380	-0.18
1,440	-3.36	3,840	-1.54	6,240	-0.77	8,640	-0.43	11,040	-0.26	13,440	-0.17
1,500	-3.29	3,900	-1.51	6,300	-0.76	8,700	-0.42	11,100	-0.26	13,500	-0.17
1,560	-3.22	3,960	-1.49	6,360	-0.75	8,760	-0.42	11,160	-0.26	13,560	-0.17
1,620	-3.16	4,020	-1.46	6,420	-0.74	8,820	-0.41	11,220	-0.25	13,620	-0.17
1,680	-3.09	4,080	-1.43	6,480	-0.72	8,880	-0.40	11,280	-0.25	13,680	-0.17
1,740	-3.03	4,140	-1.41	6,540	-0.71	8,940	-0.40	11,340	-0.25	13,740	-0.17
1,800	-2.97	4,200	-1.38	6,600	-0.70	9,000	-0.39	11,400	-0.24	13,800	-0.16
1,860	-2.91	4,260	-1.36	6,660	-0.69	9,060	-0.39	11,460	-0.24	13,860	-0.16
1,920	-2.86	4,320	-1.33	6,720	-0.68	9,120	-0.38	11,520	-0.24	13,920	-0.16
1,980	-2.80	4,380	-1.31	6,780	-0.67	9,180	-0.38	11,580	-0.24	13,980	-0.16
2,040	-2.74	4,440	-1.29	6,840	-0.66	9,240	-0.37	11,640	-0.23	14,040	-0.16
2,100	-2.69	4,500	-1.26	6,900	-0.65	9,300	-0.37	11,700	-0.23	14,100	-0.16
2,160	-2.64	4,560	-1.24	6,960	-0.64	9,360	-0.36	11,760	-0.23	14,160	-0.16
2,220	-2.59	4,620	-1.22	7,020	-0.63	9,420	-0.36	11,820	-0.23	14,220	-0.15
2,280	-2.54	4,680	-1.20	7,080	-0.62	9,480	-0.36	11,880	-0.22	14,280	-0.15
2,340	-2.49	4,740	-1.18	7,140	-0.61	9,540	-0.35	11,940	-0.22	14,340	-0.15
2,400	-2.44	4,800	-1.16	7,200	-0.60	9,600	-0.35	12,000	-0.22	14,400	-0.15

ตารางที่ ค.1.1 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป (ต่อ)

time (s)	T_{bi} (°C)	time (s)	T_{bi} (°C)	time (s)	T_{bi} (°C)	time (s)	T_{bi} (°C)	time (s)	T_{bi} (°C)	time (s)	T_{bi} (°C)
14,460	-0.15	16,860	-0.10	19,260	-1.21	21,660	-3.01	24,060	-4.43	26,460	-5.63
14,520	-0.15	16,920	-0.10	19,320	-1.26	21,720	-3.05	24,120	-4.46	26,520	-5.66
14,580	-0.15	16,980	-0.10	19,380	-1.31	21,780	-3.09	24,180	-4.49	26,580	-5.68
14,640	-0.14	17,040	-0.10	19,440	-1.36	21,840	-3.13	24,240	-4.53	26,640	-5.71
14,700	-0.14	17,100	-0.10	19,500	-1.41	21,900	-3.17	24,300	-4.56	26,700	-5.74
14,760	-0.14	17,160	-0.10	19,560	-1.46	21,960	-3.21	24,360	-4.59	26,760	-5.77
14,820	-0.14	17,220	-0.10	19,620	-1.51	22,020	-3.24	24,420	-4.62	26,820	-5.80
14,880	-0.14	17,280	-0.10	19,680	-1.56	22,080	-3.28	24,480	-4.65	26,880	-5.82
14,940	-0.14	17,340	-0.10	19,740	-1.61	22,140	-3.32	24,540	-4.68	26,940	-5.85
15,000	-0.14	17,400	-0.10	19,800	-1.66	22,200	-3.36	24,600	-4.71	27,000	-5.88
15,060	-0.14	17,460	-0.10	19,860	-1.71	22,260	-3.39	24,660	-4.74	27,060	-5.91
15,120	-0.13	17,520	-0.09	19,920	-1.76	22,320	-3.43	24,720	-4.78	27,120	-5.93
15,180	-0.13	17,580	-0.09	19,980	-1.80	22,380	-3.47	24,780	-4.81	27,180	-5.96
15,240	-0.13	17,640	-0.09	20,040	-1.85	22,440	-3.51	24,840	-4.84	27,240	-5.99
15,300	-0.13	17,700	-0.09	20,100	-1.90	22,500	-3.54	24,900	-4.87	27,300	-6.02
15,360	-0.13	17,760	-0.09	20,160	-1.94	22,560	-3.58	24,960	-4.90	27,360	-6.04
15,420	-0.13	17,820	-0.09	20,220	-1.99	22,620	-3.61	25,020	-4.93	27,420	-6.07
15,480	-0.13	17,880	-0.09	20,280	-2.04	22,680	-3.65	25,080	-4.96	27,480	-6.10
15,540	-0.13	17,940	-0.09	20,340	-2.08	22,740	-3.69	25,140	-4.99	27,540	-6.13
15,600	-0.13	18,000	-0.09	20,400	-2.13	22,800	-3.72	25,200	-5.02	27,600	-6.15
15,660	-0.12	18,060	-0.09	20,460	-2.17	22,860	-3.76	25,260	-5.05	27,660	-6.18
15,720	-0.12	18,120	-0.15	20,520	-2.22	22,920	-3.79	25,320	-5.08	27,720	-6.21
15,780	-0.12	18,180	-0.21	20,580	-2.26	22,980	-3.83	25,380	-5.11	27,780	-6.23
15,840	-0.12	18,240	-0.27	20,640	-2.31	23,040	-3.86	25,440	-5.14	27,840	-6.26
15,900	-0.12	18,300	-0.33	20,700	-2.35	23,100	-3.90	25,500	-5.17	27,900	-6.29
15,960	-0.12	18,360	-0.39	20,760	-2.39	23,160	-3.93	25,560	-5.20	27,960	-6.31
16,020	-0.12	18,420	-0.44	20,820	-2.44	23,220	-3.97	25,620	-5.23	28,020	-6.34
16,080	-0.12	18,480	-0.50	20,880	-2.48	23,280	-4.00	25,680	-5.26	28,080	-6.37
16,140	-0.12	18,540	-0.56	20,940	-2.52	23,340	-4.03	25,740	-5.28	28,140	-6.39
16,200	-0.11	18,600	-0.61	21,000	-2.56	23,400	-4.07	25,800	-5.31	28,200	-6.42
16,260	-0.11	18,660	-0.67	21,060	-2.61	23,460	-4.10	25,860	-5.34	28,260	-6.45
16,320	-0.11	18,720	-0.73	21,120	-2.65	23,520	-4.13	25,920	-5.37	28,320	-6.47
16,380	-0.11	18,780	-0.78	21,180	-2.69	23,580	-4.17	25,980	-5.40	28,380	-6.50
16,440	-0.11	18,840	-0.84	21,240	-2.73	23,640	-4.20	26,040	-5.43	28,440	-6.53
16,500	-0.11	18,900	-0.89	21,300	-2.77	23,700	-4.23	26,100	-5.46	28,500	-6.55
16,560	-0.11	18,960	-0.95	21,360	-2.81	23,760	-4.27	26,160	-5.49	28,560	-6.58
16,620	-0.11	19,020	-1.00	21,420	-2.85	23,820	-4.30	26,220	-5.51	28,620	-6.61
16,680	-0.11	19,080	-1.05	21,480	-2.89	23,880	-4.33	26,280	-5.54	28,680	-6.63
16,740	-0.11	19,140	-1.10	21,540	-2.93	23,940	-4.36	26,340	-5.57	28,740	-6.66
16,800	-0.11	19,200	-1.16	21,600	-2.97	24,000	-4.40	26,400	-5.60	28,800	-6.69

ตารางที่ ค.1.1 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป (ต่อ)

time (s)	T _{ht} (°C)	time (s)	T _{ht} (°C)	time (s)	T _{ht} (°C)	time (s)	T _{ht} (°C)	time (s)	T _{ht} (°C)	time (s)	T _{ht} (°C)
28,860	-5.87	31,260	3.60	33,660	2.49	36,060	0.86	38,460	-0.62	40,860	-1.69
28,920	-5.12	31,320	3.60	33,720	2.45	36,120	0.82	38,520	-0.65	40,920	-1.71
28,980	-4.42	31,380	3.61	33,780	2.41	36,180	0.78	38,580	-0.69	40,980	-1.73
29,040	-3.78	31,440	3.60	33,840	2.37	36,240	0.74	38,640	-0.72	41,040	-1.75
29,100	-3.17	31,500	3.60	33,900	2.33	36,300	0.70	38,700	-0.76	41,100	-1.76
29,160	-2.61	31,560	3.59	33,960	2.29	36,360	0.66	38,760	-0.79	41,160	-1.78
29,220	-2.09	31,620	3.58	34,020	2.24	36,420	0.63	38,820	-0.83	41,220	-1.80
29,280	-1.61	31,680	3.57	34,080	2.20	36,480	0.59	38,880	-0.86	41,280	-1.82
29,340	-1.16	31,740	3.56	34,140	2.16	36,540	0.55	38,940	-0.90	41,340	-1.83
29,400	-0.74	31,800	3.54	34,200	2.12	36,600	0.51	39,000	-0.94	41,400	-1.85
29,460	-0.35	31,860	3.52	34,260	2.08	36,660	0.47	39,060	-0.97	41,460	-1.87
29,520	0.01	31,920	3.50	34,320	2.04	36,720	0.43	39,120	-1.00	41,520	-1.89
29,580	0.34	31,980	3.48	34,380	2.00	36,780	0.40	39,180	-1.03	41,580	-1.90
29,640	0.65	32,040	3.46	34,440	1.95	36,840	0.36	39,240	-1.06	41,640	-1.92
29,700	0.93	32,100	3.43	34,500	1.91	36,900	0.32	39,300	-1.09	41,700	-1.93
29,760	1.19	32,160	3.40	34,560	1.87	36,960	0.28	39,360	-1.12	41,760	-1.95
29,820	1.44	32,220	3.38	34,620	1.83	37,020	0.25	39,420	-1.15	41,820	-1.97
29,880	1.66	32,280	3.35	34,680	1.79	37,080	0.21	39,480	-1.18	41,880	-1.98
29,940	1.87	32,340	3.32	34,740	1.75	37,140	0.17	39,540	-1.20	41,940	-2.00
30,000	2.05	32,400	3.29	34,800	1.70	37,200	0.13	39,600	-1.23	42,000	-2.01
30,060	2.23	32,460	3.25	34,860	1.66	37,260	0.10	39,660	-1.26	42,060	-2.03
30,120	2.39	32,520	3.22	34,920	1.62	37,320	0.06	39,720	-1.28	42,120	-2.05
30,180	2.53	32,580	3.19	34,980	1.58	37,380	0.02	39,780	-1.31	42,180	-2.06
30,240	2.66	32,640	3.15	35,040	1.54	37,440	-0.01	39,840	-1.33	42,240	-2.08
30,300	2.79	32,700	3.12	35,100	1.50	37,500	-0.05	39,900	-1.35	42,300	-2.09
30,360	2.89	32,760	3.08	35,160	1.46	37,560	-0.09	39,960	-1.38	42,360	-2.11
30,420	2.99	32,820	3.05	35,220	1.42	37,620	-0.12	40,020	-1.40	42,420	-2.12
30,480	3.08	32,880	3.01	35,280	1.38	37,680	-0.16	40,080	-1.42	42,480	-2.14
30,540	3.16	32,940	2.97	35,340	1.34	37,740	-0.19	40,140	-1.45	42,540	-2.15
30,600	3.23	33,000	2.93	35,400	1.30	37,800	-0.23	40,200	-1.47	42,600	-2.17
30,660	3.30	33,060	2.89	35,460	1.26	37,860	-0.27	40,260	-1.49	42,660	-2.18
30,720	3.35	33,120	2.86	35,520	1.22	37,920	-0.30	40,320	-1.51	42,720	-2.20
30,780	3.40	33,180	2.82	35,580	1.18	37,980	-0.34	40,380	-1.53	42,780	-2.21
30,840	3.45	33,240	2.78	35,640	1.14	38,040	-0.37	40,440	-1.55	42,840	-2.23
30,900	3.48	33,300	2.74	35,700	1.10	38,100	-0.41	40,500	-1.57	42,900	-2.24
30,960	3.51	33,360	2.70	35,760	1.06	38,160	-0.44	40,560	-1.59	42,960	-2.25
31,020	3.54	33,420	2.66	35,820	1.02	38,220	-0.48	40,620	-1.61	43,020	-2.27
31,080	3.56	33,480	2.62	35,880	0.98	38,280	-0.51	40,680	-1.63	43,080	-2.28
31,140	3.58	33,540	2.57	35,940	0.94	38,340	-0.55	40,740	-1.65	43,140	-2.30
31,200	3.59	33,600	2.53	36,000	0.90	38,400	-0.58	40,800	-1.67	43,200	-2.31

ตารางที่ ค.1.1 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป (ต่อ)

time (s)	T _{bu} (°C)	time (s)	T _{bu} (°C)	time (s)	T _{bu} (°C)	time (s)	T _{bu} (°C)	time (s)	T _{bu} (°C)	time (s)	T _{bu} (°C)
43,260	-2.32	45,660	-2.85	48,060	-3.33	50,460	-3.80	52,860	-4.34	55,260	-3.07
43,320	-2.34	45,720	-2.86	48,120	-3.35	50,520	-3.81	52,920	-4.36	55,320	-3.01
43,380	-2.35	45,780	-2.87	48,180	-3.36	50,580	-3.83	52,980	-4.37	55,380	-2.95
43,440	-2.37	45,840	-2.89	48,240	-3.37	50,640	-3.84	53,040	-4.39	55,440	-2.89
43,500	-2.38	45,900	-2.90	48,300	-3.38	50,700	-3.85	53,100	-4.40	55,500	-2.84
43,560	-2.39	45,960	-2.91	48,360	-3.39	50,760	-3.86	53,160	-4.42	55,560	-2.78
43,620	-2.41	46,020	-2.92	48,420	-3.40	50,820	-3.88	53,220	-4.43	55,620	-2.73
43,680	-2.42	46,080	-2.94	48,480	-3.42	50,880	-3.89	53,280	-4.45	55,680	-2.68
43,740	-2.43	46,140	-2.95	48,540	-3.43	50,940	-3.90	53,340	-4.47	55,740	-2.63
43,800	-2.45	46,200	-2.96	48,600	-3.44	51,000	-3.91	53,400	-4.48	55,800	-2.58
43,860	-2.46	46,260	-2.97	48,660	-3.45	51,060	-3.93	53,460	-4.50	55,860	-2.53
43,920	-2.47	46,320	-2.98	48,720	-3.46	51,120	-3.94	53,520	-4.51	55,920	-2.49
43,980	-2.49	46,380	-3.00	48,780	-3.47	51,180	-3.95	53,580	-4.53	55,980	-2.44
44,040	-2.50	46,440	-3.01	48,840	-3.49	51,240	-3.97	53,640	-4.54	56,040	-2.40
44,100	-2.51	46,500	-3.02	48,900	-3.50	51,300	-3.98	53,700	-4.56	56,100	-2.35
44,160	-2.53	46,560	-3.03	48,960	-3.51	51,360	-3.99	53,760	-4.57	56,160	-2.31
44,220	-2.54	46,620	-3.05	49,020	-3.52	51,420	-4.01	53,820	-4.59	56,220	-2.27
44,280	-2.55	46,680	-3.06	49,080	-3.53	51,480	-4.02	53,880	-4.60	56,280	-2.23
44,340	-2.57	46,740	-3.07	49,140	-3.55	51,540	-4.03	53,940	-4.62	56,340	-2.19
44,400	-2.58	46,800	-3.08	49,200	-3.56	51,600	-4.05	54,000	-4.64	56,400	-2.15
44,460	-2.59	46,860	-3.09	49,260	-3.57	51,660	-4.06	54,060	-4.65	56,460	-2.12
44,520	-2.61	46,920	-3.11	49,320	-3.58	51,720	-4.07	54,120	-4.55	56,520	-2.08
44,580	-2.62	46,980	-3.12	49,380	-3.59	51,780	-4.09	54,180	-4.45	56,580	-2.05
44,640	-2.63	47,040	-3.13	49,440	-3.60	51,840	-4.10	54,240	-4.36	56,640	-2.01
44,700	-2.65	47,100	-3.14	49,500	-3.62	51,900	-4.11	54,300	-4.26	56,700	-1.98
44,760	-2.66	47,160	-3.15	49,560	-3.63	51,960	-4.13	54,360	-4.17	56,760	-1.94
44,820	-2.67	47,220	-3.17	49,620	-3.64	52,020	-4.14	54,420	-4.09	56,820	-1.91
44,880	-2.68	47,280	-3.18	49,680	-3.65	52,080	-4.16	54,480	-4.00	56,880	-1.88
44,940	-2.70	47,340	-3.19	49,740	-3.66	52,140	-4.17	54,540	-3.92	56,940	-1.85
45,000	-2.71	47,400	-3.20	49,800	-3.67	52,200	-4.18	54,600	-3.84	57,000	-1.82
45,060	-2.72	47,460	-3.21	49,860	-3.68	52,260	-4.20	54,660	-3.76	57,060	-1.79
45,120	-2.74	47,520	-3.23	49,920	-3.70	52,320	-4.21	54,720	-3.68	57,120	-1.76
45,180	-2.75	47,580	-3.24	49,980	-3.71	52,380	-4.23	54,780	-3.60	57,180	-1.73
45,240	-2.76	47,640	-3.25	50,040	-3.72	52,440	-4.24	54,840	-3.53	57,240	-1.71
45,300	-2.77	47,700	-3.26	50,100	-3.73	52,500	-4.26	54,900	-3.46	57,300	-1.68
45,360	-2.79	47,760	-3.27	50,160	-3.74	52,560	-4.27	54,960	-3.39	57,360	-1.65
45,420	-2.80	47,820	-3.29	50,220	-3.75	52,620	-4.29	55,020	-3.32	57,420	-1.63
45,480	-2.81	47,880	-3.30	50,280	-3.77	52,680	-4.30	55,080	-3.26	57,480	-1.60
45,540	-2.82	47,940	-3.31	50,340	-3.78	52,740	-4.32	55,140	-3.19	57,540	-1.58
45,600	-2.84	48,000	-3.32	50,400	-3.79	52,800	-4.33	55,200	-3.13	57,600	-1.56

ตารางที่ ค.1.1 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป (ต่อ)

time (s)	T _{in} (°C)	time (s)	T _{in} (°C)	time (s)	T _{in} (°C)	time (s)	T _{in} (°C)	time (s)	T _{in} (°C)	time (s)	T _{in} (°C)
57,660	-1.53	60,060	-0.92	62,460	-0.64	64,860	-0.49	67,260	-0.39	69,660	-0.32
57,720	-1.51	60,120	-0.91	62,520	-0.64	64,920	-0.49	67,320	-0.39	69,720	-0.31
57,780	-1.49	60,180	-0.90	62,580	-0.63	64,980	-0.48	67,380	-0.39	69,780	-0.31
57,840	-1.47	60,240	-0.89	62,640	-0.63	65,040	-0.48	67,440	-0.38	69,840	-0.31
57,900	-1.45	60,300	-0.89	62,700	-0.62	65,100	-0.48	67,500	-0.38	69,900	-0.31
57,960	-1.42	60,360	-0.88	62,760	-0.62	65,160	-0.48	67,560	-0.38	69,960	-0.31
58,020	-1.40	60,420	-0.87	62,820	-0.62	65,220	-0.47	67,620	-0.38	70,020	-0.31
58,080	-1.38	60,480	-0.86	62,880	-0.61	65,280	-0.47	67,680	-0.38	70,080	-0.30
58,140	-1.37	60,540	-0.85	62,940	-0.61	65,340	-0.47	67,740	-0.37	70,140	-0.30
58,200	-1.35	60,600	-0.84	63,000	-0.60	65,400	-0.47	67,800	-0.37	70,200	-0.30
58,260	-1.33	60,660	-0.83	63,060	-0.60	65,460	-0.46	67,860	-0.37	70,260	-0.30
58,320	-1.31	60,720	-0.83	63,120	-0.59	65,520	-0.46	67,920	-0.37	70,320	-0.30
58,380	-1.29	60,780	-0.82	63,180	-0.59	65,580	-0.46	67,980	-0.37	70,380	-0.30
58,440	-1.27	60,840	-0.81	63,240	-0.59	65,640	-0.45	68,040	-0.36	70,440	-0.30
58,500	-1.26	60,900	-0.80	63,300	-0.58	65,700	-0.45	68,100	-0.36	70,500	-0.29
58,560	-1.24	60,960	-0.80	63,360	-0.58	65,760	-0.45	68,160	-0.36	70,560	-0.29
58,620	-1.23	61,020	-0.79	63,420	-0.57	65,820	-0.45	68,220	-0.36	70,620	-0.29
58,680	-1.21	61,080	-0.78	63,480	-0.57	65,880	-0.44	68,280	-0.36	70,680	-0.29
58,740	-1.19	61,140	-0.77	63,540	-0.57	65,940	-0.44	68,340	-0.35	70,740	-0.29
58,800	-1.18	61,200	-0.77	63,600	-0.56	66,000	-0.44	68,400	-0.35	70,800	-0.29
58,860	-1.16	61,260	-0.76	63,660	-0.56	66,060	-0.44	68,460	-0.35	70,860	-0.28
58,920	-1.15	61,320	-0.75	63,720	-0.55	66,120	-0.43	68,520	-0.35	70,920	-0.28
58,980	-1.14	61,380	-0.75	63,780	-0.55	66,180	-0.43	68,580	-0.35	70,980	-0.28
59,040	-1.12	61,440	-0.74	63,840	-0.55	66,240	-0.43	68,640	-0.35	71,040	-0.28
59,100	-1.11	61,500	-0.73	63,900	-0.54	66,300	-0.43	68,700	-0.34	71,100	-0.28
59,160	-1.09	61,560	-0.73	63,960	-0.54	66,360	-0.42	68,760	-0.34	71,160	-0.28
59,220	-1.08	61,620	-0.72	64,020	-0.54	66,420	-0.42	68,820	-0.34	71,220	-0.28
59,280	-1.07	61,680	-0.72	64,080	-0.53	66,480	-0.42	68,880	-0.34	71,280	-0.27
59,340	-1.06	61,740	-0.71	64,140	-0.53	66,540	-0.42	68,940	-0.34	71,340	-0.27
59,400	-1.04	61,800	-0.70	64,200	-0.53	66,600	-0.41	69,000	-0.33	71,400	-0.27
59,460	-1.03	61,860	-0.70	64,260	-0.52	66,660	-0.41	69,060	-0.33	71,460	-0.27
59,520	-1.02	61,920	-0.69	64,320	-0.52	66,720	-0.41	69,120	-0.33	71,520	-0.27
59,580	-1.01	61,980	-0.69	64,380	-0.52	66,780	-0.41	69,180	-0.33	71,580	-0.27
59,640	-1.00	62,040	-0.68	64,440	-0.51	66,840	-0.41	69,240	-0.33	71,640	-0.27
59,700	-0.99	62,100	-0.68	64,500	-0.51	66,900	-0.40	69,300	-0.33	71,700	-0.26
59,760	-0.97	62,160	-0.67	64,560	-0.51	66,960	-0.40	69,360	-0.32	71,760	-0.26
59,820	-0.96	62,220	-0.66	64,620	-0.50	67,020	-0.40	69,420	-0.32	71,820	-0.26
59,880	-0.95	62,280	-0.66	64,680	-0.50	67,080	-0.40	69,480	-0.32	71,880	-0.26
59,940	-0.94	62,340	-0.65	64,740	-0.50	67,140	-0.39	69,540	-0.32	71,940	-0.26
60,000	-0.93	62,400	-0.65	64,800	-0.49	67,200	-0.39	69,600	-0.32	72,000	-0.26

ตารางที่ ค.1.1 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป (ต่อ)

time (s)	T _{bi} (°C)	time (s)	T _{bi} (°C)	time (s)	T _{bi} (°C)	time (s)	T _{bi} (°C)	time (s)	T _{bi} (°C)	time (s)	T _{bi} (°C)
72,060	-0.09	74,460	1.60	76,860	1.01	79,260	0.53	81,660	0.27	84,060	0.14
72,120	0.06	74,520	1.59	76,920	0.99	79,320	0.52	81,720	0.26	84,120	0.14
72,180	0.20	74,580	1.58	76,980	0.98	79,380	0.51	81,780	0.26	84,180	0.14
72,240	0.33	74,640	1.57	77,040	0.96	79,440	0.50	81,840	0.26	84,240	0.14
72,300	0.45	74,700	1.56	77,100	0.95	79,500	0.49	81,900	0.25	84,300	0.13
72,360	0.56	74,760	1.55	77,160	0.93	79,560	0.48	81,960	0.25	84,360	0.13
72,420	0.66	74,820	1.53	77,220	0.92	79,620	0.48	82,020	0.24	84,420	0.13
72,480	0.76	74,880	1.52	77,280	0.91	79,680	0.47	82,080	0.24	84,480	0.13
72,540	0.85	74,940	1.51	77,340	0.89	79,740	0.46	82,140	0.24	84,540	0.13
72,600	0.93	75,000	1.49	77,400	0.88	79,800	0.45	82,200	0.23	84,600	0.13
72,660	1.01	75,060	1.48	77,460	0.86	79,860	0.45	82,260	0.23	84,660	0.12
72,720	1.08	75,120	1.47	77,520	0.85	79,920	0.44	82,320	0.22	84,720	0.12
72,780	1.15	75,180	1.45	77,580	0.84	79,980	0.43	82,380	0.22	84,780	0.12
72,840	1.21	75,240	1.44	77,640	0.82	80,040	0.42	82,440	0.22	84,840	0.12
72,900	1.26	75,300	1.42	77,700	0.81	80,100	0.42	82,500	0.21	84,900	0.12
72,960	1.31	75,360	1.40	77,760	0.80	80,160	0.41	82,560	0.21	84,960	0.11
73,020	1.36	75,420	1.39	77,820	0.79	80,220	0.40	82,620	0.21	85,020	0.11
73,080	1.40	75,480	1.37	77,880	0.77	80,280	0.40	82,680	0.20	85,080	0.11
73,140	1.43	75,540	1.36	77,940	0.76	80,340	0.39	82,740	0.20	85,140	0.11
73,200	1.47	75,600	1.34	78,000	0.75	80,400	0.38	82,800	0.20	85,200	0.11
73,260	1.50	75,660	1.33	78,060	0.74	80,460	0.38	82,860	0.19	85,260	0.11
73,320	1.52	75,720	1.31	78,120	0.72	80,520	0.37	82,920	0.19	85,320	0.11
73,380	1.55	75,780	1.29	78,180	0.71	80,580	0.36	82,980	0.19	85,380	0.10
73,440	1.57	75,840	1.28	78,240	0.70	80,640	0.36	83,040	0.19	85,440	0.10
73,500	1.58	75,900	1.26	78,300	0.69	80,700	0.35	83,100	0.18	85,500	0.10
73,560	1.60	75,960	1.25	78,360	0.68	80,760	0.35	83,160	0.18	85,560	0.10
73,620	1.61	76,020	1.23	78,420	0.67	80,820	0.34	83,220	0.18	85,620	0.10
73,680	1.62	76,080	1.21	78,480	0.66	80,880	0.33	83,280	0.17	85,680	0.10
73,740	1.63	76,140	1.20	78,540	0.64	80,940	0.33	83,340	0.17	85,740	0.10
73,800	1.63	76,200	1.18	78,600	0.63	81,000	0.32	83,400	0.17	85,800	0.09
73,860	1.64	76,260	1.16	78,660	0.62	81,060	0.32	83,460	0.17	85,860	0.09
73,920	1.64	76,320	1.15	78,720	0.61	81,120	0.31	83,520	0.16	85,920	0.09
73,980	1.64	76,380	1.13	78,780	0.60	81,180	0.31	83,580	0.16	85,980	0.09
74,040	1.64	76,440	1.12	78,840	0.59	81,240	0.30	83,640	0.16	86,040	0.09
74,100	1.64	76,500	1.10	78,900	0.58	81,300	0.30	83,700	0.16	86,100	0.09
74,160	1.63	76,560	1.08	78,960	0.57	81,360	0.29	83,760	0.15	86,160	0.09
74,220	1.63	76,620	1.07	79,020	0.56	81,420	0.29	83,820	0.15	86,220	0.09
74,280	1.62	76,680	1.05	79,080	0.55	81,480	0.28	83,880	0.15	86,280	0.09
74,340	1.62	76,740	1.04	79,140	0.55	81,540	0.28	83,940	0.15	86,340	0.08
74,400	1.61	76,800	1.02	79,200	0.54	81,600	0.27	84,000	0.14	86,400	0.08

ตารางที่ ค.1.1 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตภายใต้ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป (ต่อ)

time (s)	T _{bi} (°C)	time (s)	T _{bi} (°C)	time (s)	T _{bi} (°C)	time (s)	T _{bi} (°C)	time (s)	T _{bi} (°C)	time (s)	T _{bi} (°C)
86,460	0.08	88,860	0.05	91,260	0.04	93,660	0.03	96,060	0.03	98,460	0.03
86,520	0.08	88,920	0.05	91,320	0.04	93,720	0.03	96,120	0.03	98,520	0.03
86,580	0.08	88,980	0.05	91,380	0.04	93,780	0.03	96,180	0.03	98,580	0.03
86,640	0.08	89,040	0.05	91,440	0.04	93,840	0.03	96,240	0.03	98,640	0.03
86,700	0.08	89,100	0.05	91,500	0.04	93,900	0.03	96,300	0.03	98,700	0.03
86,760	0.08	89,160	0.05	91,560	0.04	93,960	0.03	96,360	0.03	98,760	0.03
86,820	0.08	89,220	0.05	91,620	0.04	94,020	0.03	96,420	0.03	98,820	0.03
86,880	0.08	89,280	0.05	91,680	0.04	94,080	0.03	96,480	0.03	98,880	0.03
86,940	0.07	89,340	0.05	91,740	0.04	94,140	0.03	96,540	0.03	98,940	0.03
87,000	0.07	89,400	0.05	91,800	0.04	94,200	0.03	96,600	0.03	99,000	0.03
87,060	0.07	89,460	0.05	91,860	0.04	94,260	0.03	96,660	0.03	99,060	0.03
87,120	0.07	89,520	0.05	91,920	0.04	94,320	0.03	96,720	0.03	99,120	0.03
87,180	0.07	89,580	0.05	91,980	0.04	94,380	0.03	96,780	0.03	99,180	0.03
87,240	0.07	89,640	0.05	92,040	0.04	94,440	0.03	96,840	0.03	99,240	0.03
87,300	0.07	89,700	0.05	92,100	0.04	94,500	0.03	96,900	0.03	99,300	0.03
87,360	0.07	89,760	0.05	92,160	0.04	94,560	0.03	96,960	0.03	99,360	0.03
87,420	0.07	89,820	0.05	92,220	0.04	94,620	0.03	97,020	0.03	99,420	0.03
87,480	0.07	89,880	0.05	92,280	0.04	94,680	0.03	97,080	0.03	99,480	0.03
87,540	0.07	89,940	0.05	92,340	0.04	94,740	0.03	97,140	0.03	99,540	0.03
87,600	0.07	90,000	0.05	92,400	0.04	94,800	0.03	97,200	0.03	99,600	0.03
87,660	0.07	90,060	0.05	92,460	0.04	94,860	0.03	97,260	0.03	99,660	0.03
87,720	0.06	90,120	0.05	92,520	0.04	94,920	0.03	97,320	0.03	99,720	0.03
87,780	0.06	90,180	0.04	92,580	0.04	94,980	0.03	97,380	0.03	99,780	0.03
87,840	0.06	90,240	0.04	92,640	0.04	95,040	0.03	97,440	0.03	99,840	0.03
87,900	0.06	90,300	0.04	92,700	0.04	95,100	0.03	97,500	0.03	99,900	0.03
87,960	0.06	90,360	0.04	92,760	0.04	95,160	0.03	97,560	0.03	99,960	0.03
88,020	0.06	90,420	0.04	92,820	0.04	95,220	0.03	97,620	0.03	100,020	0.03
88,080	0.06	90,480	0.04	92,880	0.03	95,280	0.03	97,680	0.03	100,080	0.03
88,140	0.06	90,540	0.04	92,940	0.03	95,340	0.03	97,740	0.03	100,140	0.03
88,200	0.06	90,600	0.04	93,000	0.03	95,400	0.03	97,800	0.03	100,200	0.03
88,260	0.06	90,660	0.04	93,060	0.03	95,460	0.03	97,860	0.03	100,260	0.03
88,320	0.06	90,720	0.04	93,120	0.03	95,520	0.03	97,920	0.03	100,320	0.03
88,380	0.06	90,780	0.04	93,180	0.03	95,580	0.03	97,980	0.03	100,380	0.03
88,440	0.06	90,840	0.04	93,240	0.03	95,640	0.03	98,040	0.03	100,440	0.03
88,500	0.06	90,900	0.04	93,300	0.03	95,700	0.03	98,100	0.03	100,500	0.03
88,560	0.06	90,960	0.04	93,360	0.03	95,760	0.03	98,160	0.03	100,560	0.03
88,620	0.06	91,020	0.04	93,420	0.03	95,820	0.03	98,220	0.03	100,620	0.03
88,680	0.05	91,080	0.04	93,480	0.03	95,880	0.03	98,280	0.03	100,680	0.03
88,740	0.05	91,140	0.04	93,540	0.03	95,940	0.03	98,340	0.03	100,740	0.03
88,800	0.05	91,200	0.04	93,600	0.03	96,000	0.03	98,400	0.03	100,800	0.03



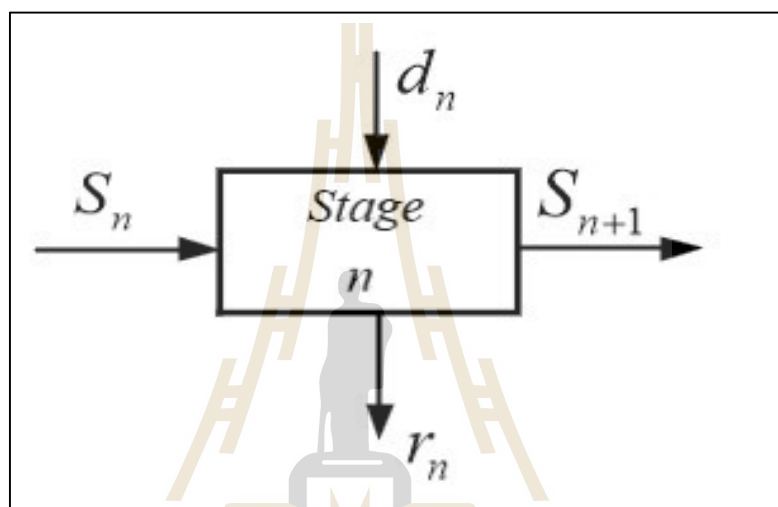
ภาคผนวก ง

ผลการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ด้วยวิธีกำหนดการพลวัต
(Dynamics Programming)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ง.1 วิธีการกำหนดการพลวัต (Dynamics Programming)

วิธีการกำหนดการพลวัตเป็นวิธีการที่พยายามจัดการปัญหาการตัดสินใจหลายขั้นตอน (Multistage decision problem) ให้อยู่ในลักษณะที่เรียงต่อเนื่องกันของปัญหาการตัดสินใจขั้นตอนเดียว (Sequence of single stage decision problem) โดยหลักการของวิธีการนี้คือ ปัญหาที่ต้องการแก้ต้องเป็นระบบที่สามารถแยกออกมาเป็นวิเคราะห์แต่ละขั้นตอนได้ และพิจารณาขั้นตอนของระบบได้ ดังรูปที่ ง.1.1 แสดง หลักการวิเคราะห์ปัญหาที่ละขั้นตอนของระบบ



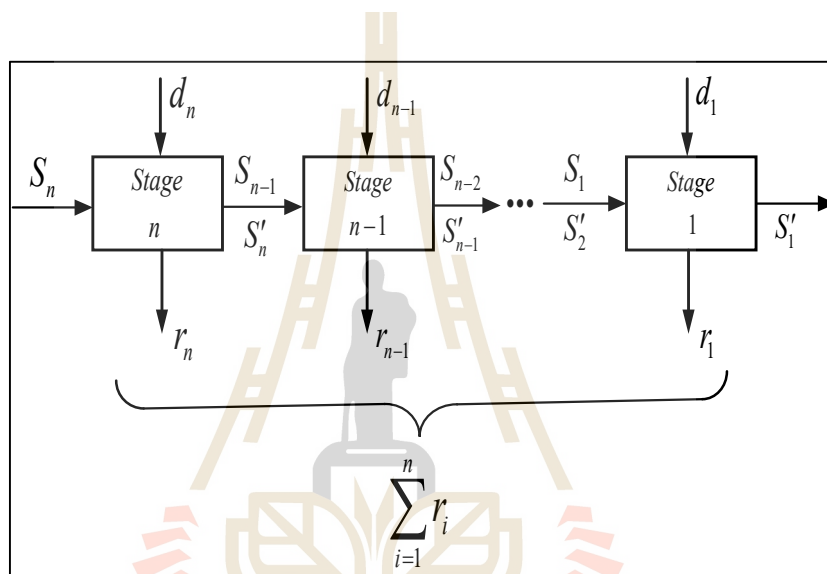
รูปที่ ง.1.1 หลักการวิเคราะห์ปัญหาที่ละขั้นตอนของระบบ

โดยที่

S_n	แทน	ชุดตัวแปรวัตถุประสงค์ที่เข้ามาแก้ปัญหาในแต่ละขั้นตอนของระบบ
S_{n+1}	แทน	ชุดตัวแปรวัตถุประสงค์ที่ถูกแก้ปัญหาแล้วเสร็จในแต่ละขั้นตอนของระบบ
d_n	แทน	ชุดตัวแปรที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการแก้ปัญหาแต่ละขั้นตอนของระบบ
r_n	แทน	ชุดตัวแปรที่มีค่าเหมาะสมที่สุดในแต่ละขั้นตอนของระบบ

โดยเป้าหมายของการหาตัวแปรที่มีค่าที่ดีที่สุดในแต่ละขั้นตอนของระบบคือการเลือกตัวแปรเงื่อนไขในการแก้ปัญหาแต่ละขั้นตอนให้เหมาะสมเนื่องจากตัวแปรเงื่อนไขเป็นตัวที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของชุดตัวแปรวัตถุประสงค์ในแต่ละขั้นตอนของระบบ เพื่อนำไปสู่การหาตัวแปรที่มีค่าที่ดีที่สุดในแต่ละขั้นตอนของระบบ หลังจากนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ครบทุกขั้นตอนในระบบแล้วจะทำการรวมค่าของตัวแปรที่มีค่าเหมาะสมในแต่ละขั้นตอนจึงจะได้ค่าที่ดีที่สุดของระบบ

$\left(\sum_{i=1}^n r_i \right)$ ที่ทำการศึกษา โดยรูปที่ ง.1.2 แสดง ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยวิธีกำหนดการพลวัต



รูปที่ ง.1.2 ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยวิธีกำหนดการพลวัต

ง.2 การใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

ในโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศจะมีการคิดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงงานตามโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าโดยแบ่งเป็นหลายประเภทในส่วนของโรงงานที่ทำการศึกษานั้นอยู่ในประเภทกิจการขนาดใหญ่ซึ่งแบ่งการคิดค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าเป็น 2 อัตราด้วยกันคือ 1. อัตราตามช่วงเวลาของวัน (Time Of Day Rate : TOD) และ 2. อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time Of Use Rate : TOU) โดยมีการคิดค่าพลังงานไฟฟ้าในแต่ละส่วน แสดงดังตารางที่ ง.2.1

ตารางที่ ง.2.1 แสดงโครงสร้างอัตราค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าในแต่ละรูปแบบ

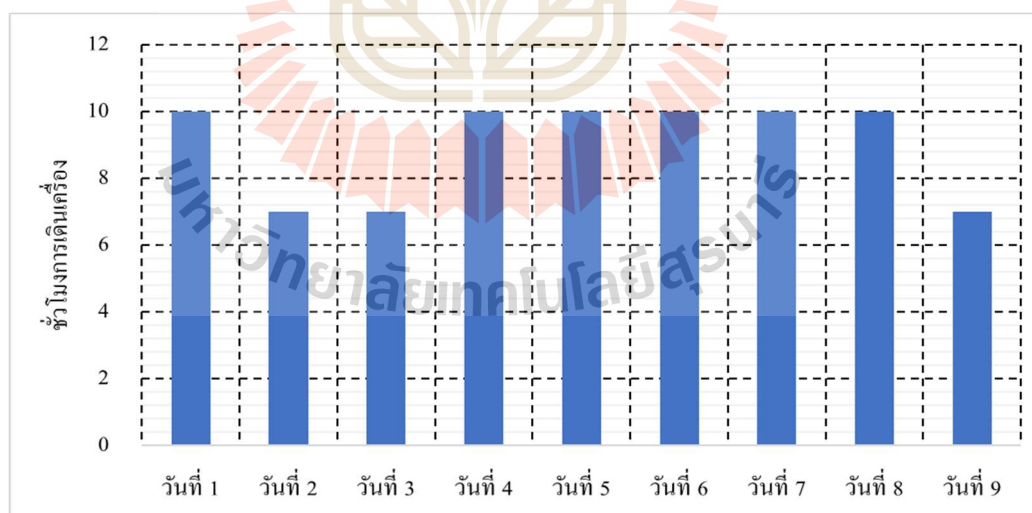
		อัตราตามช่วงเวลาของวัน (Time Of Day Rate : TOD)				
		ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า		ค่าพลังงานไฟฟ้า	ค่าบริการ	
		(บาท/กิโลวัตต์)		(บาท/หน่วย)	(บาท/เดือน)	
		Peak	Partial			Off Peak
แรงดันตั้งแต่ 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป		224.30	29.91	0	3.1355	312.24
แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์		285.05	58.88	0	3.1729	312.24
แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์		332.71	68.22	0	3.2009	312.24
	Peak	เวลา 18.30 - 21.30 น. ของทุกวัน				
	Partial	เวลา 08.00 - 18.30 น. ของทุกวัน (ค่าความต้องการพลังไฟฟ้าคิดเฉพาะส่วนที่เกิน Peak)				
	Off Peak	เวลา 21.30 - 08.00 น. ของทุกวัน				
		อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time Of Use Rate : TOU)				
		ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า		ค่าพลังงานไฟฟ้า		ค่าบริการ
		(บาท/กิโลวัตต์)		(บาท/หน่วย)		
		Peak	Peak	Off Peak	(บาท/เดือน)	
แรงดันตั้งแต่ 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป		74.14	4.1283	2.6107	312.24	
แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์		132.93	4.2097	2.6295	312.24	
แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์		210.00	4.3555	2.6627	312.24	
	Peak	เวลา 09.00 - 22.00 น. ของวันจันทร์-ศุกร์ และวันพืชมงคล				
	Off Peak	เวลา 22.00 - 09.00 น. ของวันจันทร์-ศุกร์ และวันพืชมงคล เวลา 00.00 - 24.00 น. ของวันเสาร์-อาทิตย์, วันแรงงานแห่งชาติ, วันพืชมงคลที่ตรงกับวันเสาร์-อาทิตย์ และ วันหยุดราชการตามปกติ (ไม่รวมวันหยุดชดเชย)				

*อัตราค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้านี้ เริ่มใช้ตั้งแต่ เดือนพฤศจิกายน 2558 เป็นต้นไป

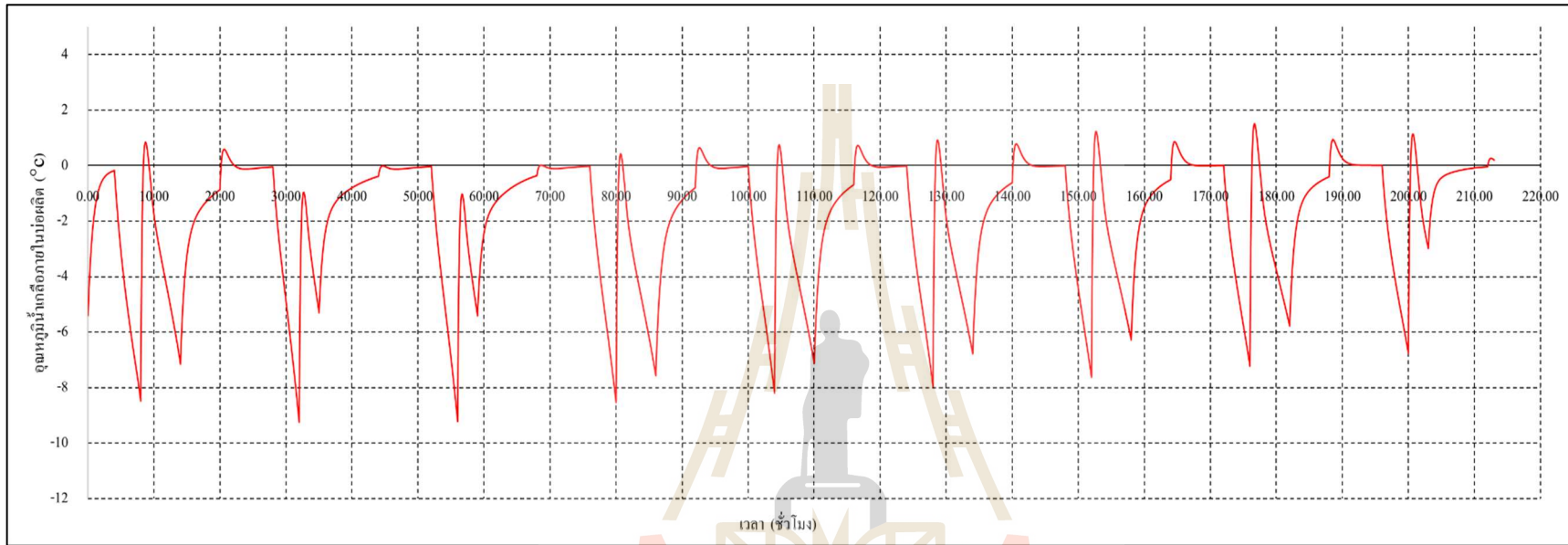
ง.3 ผลการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีกำหนดการพลวัต (Dynamics Programming)

ตารางที่ ง.3.1 แสดงชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นที่ได้จากวิธีกำหนดการพลวัตของกรณีศึกษาที่ทำการศึกษา

วันที่	ช่วงเวลาการเดินเครื่อง	จำนวนชั่วโมง (ชั่วโมง)
1	22.00 น. – 08.00 น.	10
2	22.00 น. – 05.00 น.	7
3	22.00 น. – 05.00 น.	7
4	22.00 น. – 08.00 น.	10
5	22.00 น. – 08.00 น.	10
6	22.00 น. – 08.00 น.	10
7	22.00 น. – 08.00 น.	10
8	22.00 น. – 08.00 น.	10
9	22.00 น. – 05.00 น.	7
รวม		81



รูปที่ ง.3.1 แสดงชั่วโมงการเดินเครื่องในแต่ละวันที่ทำการผลิตน้ำแข็งของ



รูปที่ ง.3.2 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตได้จากวิธีกำหนดการพลวัตของกรณีศึกษาที่ทำการศึกษา

ภาคผนวก จ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์



จ.1 การสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ ด้วยโปรแกรม MATLAB

ในการใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของด้วยวิธีการแทนค่าแบบต่อเนื่อง (Successive Substitution) นั้นจะทำการนำเข้าข้อมูลค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการแก้ระบบสมการ นั่นคือ ค่าสถานะเริ่มต้นของน้ำภายในของผลิตที่อยู่ภายในบ่อผลิต และ อุณหภูมิน้ำเกลือที่เวลาเริ่มต้น ของแบบจำลอง จากการนำเข้าข้อมูลจากภายนอก หลังจากที้นำเข้าข้อมูลค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการแก้ระบบสมการแล้ว จะต้องทำการตรวจสอบสถานะของตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษาในแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อป้องกันถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการแก้ปัญหาระบบสมการด้วยวิธีการแทนค่าแบบต่อเนื่อง ได้ดังนี้

```
function [hw] = Checkhw(Lice, Twavg)
if Lice>=0 && Twavg<=0
    hw=0.000;
elseif Lice>=0 && Twavg>0
    hw=1/((-0.0313*(Twavg)^6)+(2.932*(Twavg)^5)-(104.06*(Twavg)^4)+(1731.3*(Twavg)^3)
    -(13295*(Twavg)^2)+(39236*(Twavg)^1));
end
end
function [Lice] = CheckLice(Uwavg)
if Uwavg>0
    Lice=0;
elseif Uwavg<=0 && Uwavg>=-78012
    Lice=Uwavg/(-333.43*917*2.582);
elseif Uwavg<-78012
    Lice=0.0988;
end
end
function [Twavg] = CheckTwavg(Uwavg)
if Uwavg>0
    Twavg=(0.00102072*Uwavg)-0.0133704;
elseif Uwavg<=0 && Uwavg>=-78012
    Twavg=0;
elseif Uwavg<-78012
    Twavg=(0.0020659178*Uwavg)+161.1915941597;
end
end
function [Twtddt] = CheckTwtddt(Uwtddt)
if Uwtddt>0
    Twtddt=(0.00102072*Uwtddt)-0.01337040;
elseif Uwtddt<=0 && Uwtddt>=-78012
    Twtddt=0;
elseif Uwtddt<-78012
    Twtddt=(0.00206585*Uwtddt)+161.18646793;
end
end
```

เมื่อทำการตรวจสอบสถานะของตัวแปรอิสระเสร็จแล้วนั้น จะเข้าสู่ตัวโปรแกรมหลักที่ใช้ในการแก้ปัญหาระบบสมการด้วยวิธีการแทนค่าแบบต่อเนื่อง โดยในโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองจะต้องกำหนดรูปแบบการจำหน่ายน้ำแข็งและรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็น


```

for i=1:1:(2340)
%% ข้อมูลการจำหน่ายน้ำแข็งในแต่ละช่วงเวลา %%
if i==480%%SellAB
Uwt137(1)=29404;   Uwt138(1)=29404;   Uwt145(1)=29404;   Uwt146(1)=29404.
Uwt147(1)=29404;   Uwt148(1)=29404;   Uwt149(1)=29404;   Uwt150(1)=29404.
Uwt157(1)=29404;   Uwt158(1)=29404;   Uwt159(1)=29404;   Uwt160(1)=29404.
Uwt161(1)=29404;   Uwt162(1)=29404;   Uwt169(1)=29404;   Uwt170(1)=29404.
Uwt171(1)=29404;   Uwt172(1)=29404;   Uwt173(1)=29404;   Uwt174(1)=29404.
Uwt181(1)=29404;   Uwt182(1)=29404;   Uwt183(1)=29404;   Uwt184(1)=29404.
Uwt185(1)=29404;   Uwt186(1)=29404;
end
if i==1200%%SellBC
Uwt193(1)=29404;   Uwt194(1)=29404;   Uwt195(1)=29404;
Uwt196(1)=29404;   Uwt197(1)=29404;   Uwt198(1)=29404;
end
if i==1920%%SellCD
Uwt205(1)=29404;   Uwt206(1)=29404;   Uwt207(1)=29404;
Uwt208(1)=29404;   Uwt209(1)=29404;   Uwt210(1)=29404;
Uwt217(1)=29404;   Uwt218(1)=29404;   Uwt219(1)=29404;
Uwt220(1)=29404;   Uwt221(1)=29404;   Uwt222(1)=29404;
Uwt7(1)=29404;     Uwt8(1)=29404;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for j=1:1:1000
    Tbvavg=(delTbSucc/2)+Tbt(1);
    %% ข้อมูลการเดินทางเครื่องทำความเย็นในแต่ละช่วงเวลา %%
    if i==1 && i<=60%%18.00-19.00%%   THU 18/07/62
        Qre(1)=0;
    end
    if i>60 && i<=120%%19.00-20.00%%   THU 18/07/62
        Qre(1)=0;
    end
    if i>120 && i<=180%%20.00-21.00%%   THU 18/07/62
        Qre(1)=0;
    end
    if i>180 && i<=240%%21.00-22.00%%   THU 18/07/62
        Qre(1)=0;
    end
    if i>240 && i<=300%%22.00-23.00%%   THU 18/07/62
        Qre(1)=0;
    end
    if i>300 && i<=360%%23.00-00.00%%   THU 18/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbvavg)+262.429012;
    end
    if i>360 && i<=420%%00.00-01.00%%   FRI 19/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbvavg)+262.429012;
    end
    if i>420 && i<=480%%01.00-02.00%%   FRI 19/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbvavg)+262.429012;
    end
    if i>480 && i<=540%%02.00-03.00%%   FRI 19/07/62

```

```

    Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
end
if i>540 && i<=600%%03.00-04.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
end
if i>600 && i<=660%%04.00-05.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
end
if i>660 && i<=720%%05.00-06.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
end
if i>720 && i<=780%%06.00-07.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
end
if i>780 && i<=840%%07.00-08.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
end
if i>840 && i<=900%%08.00-09.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
end
if i>900 && i<=960%%09.00-10.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=0;
end
if i>960 && i<=1020%%10.00-11.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=0;
end
if i>1020 && i<=1080%%11.00-12.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=0;
end
if i>1080 && i<=1140%%12.00-13.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=0;
end
if i>1140 && i<=1200%%13.00-14.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=0;
end
if i>1200 && i<=1260%%14.00-15.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=0;
end
if i>1260 && i<=1320%%15.00-16.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=0;
end
if i>1320 && i<=1380%%16.00-17.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=0;
end
if i>1380 && i<=1440%%17.00-18.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=0;
end
if i>1440 && i<=1500%%18.00-19.00%% FRI 19/07/62
    Qre(1)=0;
end
if i>1500 && i<=1560%%19.00-20.00%% FRI 19/07/62

```

```

        Qre(1)=0;
    end
    if i>1560 && i<=1620%%20.00-21.00%%    FRI 19/07/62
        Qre(1)=0;
    end
    if i>1620 && i<=1680%%21.00-22.00%%    FRI 19/07/62
        Qre(1)=0;
    end
    if i>1680 && i<=1740%%22.00-23.00%%    FRI 19/07/62
        Qre(1)=0;
    end
    if i>1740 && i<=1800%%23.00-00.00%%    FRI 19/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
    end
    if i>1800 && i<=1860%%00.00-01.00%%    SAT 20/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
    end
    if i>1860 && i<=1920%%01.00-02.00%%    SAT 20/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
    end
    if i>1920 && i<=1980%%02.00-03.00%%    SAT 20/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
    end
    if i>1980 && i<=2040%%03.00-04.00%%    SAT 20/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
    end
    if i>2040 && i<=2100%%04.00-05.00%%    SAT 20/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
    end
    if i>2100 && i<=2160%%05.00-06.00%%    SAT 20/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
    end
    if i>2160 && i<=2220%%06.00-07.00%%    SAT 20/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
    end
    if i>2220 && i<=2280%%07.00-08.00%%    SAT 20/07/62
        Qre(1)=(-53.619753*Tbavg)+262.429012;
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %% วิเคราะห์น้ำหนักภายในของผลผลิต ตำแหน่งที่ 1 %%
    Uwavg1=((delUwSuccl)/2)+Uwt1(1);
    Licel=CheckLice(Uwavg1);
    Twavg1=CheckTwavg(Twavg1);
    hwl=Checkhw(Licel,Twavg1);
    Qicel=((Area/(1/hb)+(Lm/Km)+(Licel/Kice)+(hwl)))*((Twavg1-Tbavg)/1000)*6;
    if Licel==0.0494
        Qcal=0;
    else
        Qcal=(0.0000544*1.0055*(31.53-Twavg1));
    end
end

```



```

if Uwtddt222>0
Twtddt222=(0.00102072*Uwtddt222)-0.01337040;
elseif Uwtddt222<=0 && Uwtddt222>=-78012
Twtddt222=0;
elseif Uwtddt222<-78012
Twtddt222=(0.00206585*Uwtddt222)+161.18646793;
end
ice222=(Lice222/0.098816823)*100;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% ผลรวมของอัตราความร้อนที่นำภายในของผลิตภัณฑ์เทให้กับน้ำเกลือภายในหม้อผลิต %%
Qiceall=(Qice1+Qice2+Qice3+Qice4+Qice5+Qice6+Qice7+Qice8+Qice9
+Qice10+Qice11+Qice12+Qice13+Qice14+Qice15+Qice16+Qice17+Qice18
+Qice19+Qice20+Qice21+Qice22+Qice23+Qice24+Qice25+Qice26+Qice27
+Qice28+Qice29+Qice30+Qice31+Qice32+Qice33+Qice34+Qice35+Qice36
+Qice37+Qice38+Qice39+Qice40+Qice41+Qice42+Qice43+Qice44+Qice45
+Qice46+Qice47+Qice48+Qice49+Qice50+Qice51+Qice52+Qice53+Qice54
+Qice55+Qice56+Qice57+Qice58+Qice59+Qice60+Qice61+Qice62+Qice63
+Qice64+Qice65+Qice66+Qice67+Qice68+Qice69+Qice70+Qice71+Qice72
+Qice73+Qice74+Qice75+Qice76+Qice77+Qice78+Qice79+Qice80+Qice81
+Qice82+Qice83+Qice84+Qice85+Qice86+Qice87+Qice88+Qice89+Qice90
+Qice91+Qice92+Qice93+Qice94+Qice95+Qice96+Qice97+Qice98+Qice99
+Qice100+Qice101+Qice102+Qice103+Qice104+Qice105+Qice106+Qice107
+Qice108+Qice109+Qice110+Qice111+Qice112+Qice113+Qice114+Qice115
+Qice116+Qice117+Qice118+Qice119+Qice120+Qice121+Qice122+Qice123
+Qice124+Qice125+Qice126+Qice127+Qice128+Qice129+Qice130+Qice131
+Qice132+Qice133+Qice134+Qice135+Qice136+Qice137+Qice138+Qice139
+Qice140+Qice141+Qice142+Qice143+Qice144+Qice145+Qice146+Qice147
+Qice148+Qice149+Qice150+Qice151+Qice152+Qice153+Qice154+Qice155
+Qice156+Qice157+Qice158+Qice159+Qice160+Qice161+Qice162+Qice163
+Qice164+Qice165+Qice166+Qice167+Qice168+Qice169+Qice170+Qice171
+Qice172+Qice173+Qice174+Qice175+Qice176+Qice177+Qice178+Qice179
+Qice180+Qice181+Qice182+Qice183+Qice184+Qice185+Qice186+Qice187
+Qice188+Qice189+Qice190+Qice191+Qice192+Qice193+Qice194+Qice195
+Qice196+Qice197+Qice198+Qice199+Qice200+Qice201+Qice202+Qice203
+Qice204+Qice205+Qice206+Qice207+Qice208+Qice209+Qice210+Qice211
+Qice212+Qice213+Qice214+Qice215+Qice216+Qice217+Qice218+Qice219
+Qice220+Qice221+Qice222);
QiceAll(i)=Qiceall;
%% วิเคราะห์น้ำเกลือภายในหม้อผลิต %%
delTb=deltime*((2.72+(Qiceall)-Qre(1))/(mb*cb));
fb=delTbSucc-delTb;
Tbtdt=(delTb)+Tbt(1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%% ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากการคำนวณ %%%%%%%%%
if ( (abs(fb)<=error) && (abs(fl)<=error) && (abs(f2)<=error) && (abs(f3)<=error)
&& (abs(f4)<=error) && (abs(f5)<=error) && (abs(f6)<=error) && (abs(f7)<=error)
&& (abs(f8)<=error) && (abs(f9)<=error) && (abs(f10)<=error) && (abs(f11)<=error)
&& (abs(f12)<=error) && (abs(f13)<=error) && (abs(f14)<=error)
&& (abs(f15)<=error) && (abs(f16)<=error) && (abs(f17)<=error)

```



```

&&(abs(f173)<=error)&&(abs(f174)<=error)&&(abs(f175)<=error)
&&(abs(f176)<=error)&&(abs(f177)<=error)&&(abs(f178)<=error)
&&(abs(f179)<=error)&&(abs(f180)<=error)&&(abs(f181)<=error)
&&(abs(f182)<=error)&&(abs(f183)<=error)&&(abs(f184)<=error)
&&(abs(f185)<=error)&&(abs(f186)<=error)&&(abs(f187)<=error)
&&(abs(f188)<=error)&&(abs(f189)<=error)&&(abs(f190)<=error)
&&(abs(f191)<=error)&&(abs(f192)<=error)&&(abs(f193)<=error)
&&(abs(f194)<=error)&&(abs(f195)<=error)&&(abs(f196)<=error)
&&(abs(f197)<=error)&&(abs(f198)<=error)&&(abs(f199)<=error)
&&(abs(f200)<=error)&&(abs(f201)<=error)&&(abs(f202)<=error)
&&(abs(f203)<=error)&&(abs(f204)<=error)&&(abs(f205)<=error)
&&(abs(f206)<=error)&&(abs(f207)<=error)&&(abs(f208)<=error)
&&(abs(f209)<=error)&&(abs(f210)<=error)&&(abs(f211)<=error)
&&(abs(f212)<=error)&&(abs(f213)<=error)&&(abs(f214)<=error)
&&(abs(f215)<=error)&&(abs(f216)<=error)&&(abs(f217)<=error)
&&(abs(f218)<=error)&&(abs(f219)<=error)&&(abs(f220)<=error)
&&(abs(f221)<=error)&&(abs(f222)<=error));
    break;
end
*****
delUwSucc1=delUw1; delUwSucc2=delUw2; delUwSucc3=delUw3; delUwSucc4=delUw4;
delUwSucc5=delUw5; delUwSucc6=delUw6; delUwSucc7=delUw7; delUwSucc8=delUw8;
delUwSucc9=delUw9; delUwSucc10=delUw10; delUwSucc11=delUw11;
delUwSucc12=delUw12; delUwSucc13=delUw13; delUwSucc14=delUw14;
delUwSucc15=delUw15; delUwSucc16=delUw16; delUwSucc17=delUw17;
delUwSucc18=delUw18; delUwSucc19=delUw19; delUwSucc20=delUw20;
delUwSucc21=delUw21; delUwSucc22=delUw22; delUwSucc23=delUw23;
delUwSucc24=delUw24; delUwSucc25=delUw25; delUwSucc26=delUw26;
delUwSucc27=delUw27; delUwSucc28=delUw28; delUwSucc29=delUw29;
delUwSucc30=delUw30; delUwSucc31=delUw31; delUwSucc32=delUw32;
delUwSucc33=delUw33; delUwSucc34=delUw34; delUwSucc35=delUw35;
delUwSucc36=delUw36; delUwSucc37=delUw37; delUwSucc38=delUw38;
delUwSucc39=delUw39; delUwSucc40=delUw40; delUwSucc41=delUw41;
delUwSucc42=delUw42; delUwSucc43=delUw43; delUwSucc44=delUw44;
delUwSucc45=delUw45; delUwSucc46=delUw46; delUwSucc47=delUw47;
delUwSucc48=delUw48; delUwSucc49=delUw49; delUwSucc50=delUw50;
delUwSucc51=delUw51; delUwSucc52=delUw52; delUwSucc53=delUw53;
delUwSucc54=delUw54; delUwSucc55=delUw55; delUwSucc56=delUw56;
delUwSucc57=delUw57; delUwSucc58=delUw58; delUwSucc59=delUw59;
delUwSucc60=delUw60; delUwSucc61=delUw61; delUwSucc62=delUw62;
delUwSucc63=delUw63; delUwSucc64=delUw64; delUwSucc65=delUw65;
delUwSucc66=delUw66; delUwSucc67=delUw67; delUwSucc68=delUw68;
delUwSucc69=delUw69; delUwSucc70=delUw70; delUwSucc71=delUw71;
delUwSucc72=delUw72; delUwSucc73=delUw73; delUwSucc74=delUw74;
delUwSucc75=delUw75; delUwSucc76=delUw76; delUwSucc77=delUw77;
delUwSucc78=delUw78; delUwSucc79=delUw79; delUwSucc80=delUw80;
delUwSucc81=delUw81; delUwSucc82=delUw82; delUwSucc83=delUw83;
delUwSucc84=delUw84; delUwSucc85=delUw85; delUwSucc86=delUw86;
delUwSucc87=delUw87; delUwSucc88=delUw88; delUwSucc89=delUw89;
delUwSucc90=delUw90; delUwSucc91=delUw91; delUwSucc92=delUw92;
delUwSucc93=delUw93; delUwSucc94=delUw94; delUwSucc95=delUw95;

```

```

delUwSucc96=delUw96;   delUwSucc97=delUw97;   delUwSucc98=delUw98;
delUwSucc99=delUw99;   delUwSucc100=delUw100; delUwSucc101=delUw101;
delUwSucc102=delUw102; delUwSucc103=delUw103; delUwSucc104=delUw104;
delUwSucc105=delUw105; delUwSucc106=delUw106; delUwSucc107=delUw107;
delUwSucc108=delUw108; delUwSucc109=delUw109; delUwSucc110=delUw110;
delUwSucc111=delUw111; delUwSucc112=delUw112; delUwSucc113=delUw113;
delUwSucc114=delUw114; delUwSucc115=delUw115; delUwSucc116=delUw116;
delUwSucc117=delUw117; delUwSucc118=delUw118; delUwSucc119=delUw119;
delUwSucc120=delUw120; delUwSucc121=delUw121; delUwSucc122=delUw122;
delUwSucc123=delUw123; delUwSucc124=delUw124; delUwSucc125=delUw125;
delUwSucc126=delUw126; delUwSucc127=delUw127; delUwSucc128=delUw128;
delUwSucc129=delUw129; delUwSucc130=delUw130; delUwSucc131=delUw131;
delUwSucc132=delUw132; delUwSucc133=delUw133; delUwSucc134=delUw134;
delUwSucc135=delUw135; delUwSucc136=delUw136; delUwSucc137=delUw137;
delUwSucc138=delUw138; delUwSucc139=delUw139; delUwSucc140=delUw140;
delUwSucc141=delUw141; delUwSucc142=delUw142; delUwSucc143=delUw143;
delUwSucc144=delUw144; delUwSucc145=delUw145; delUwSucc146=delUw146;
delUwSucc147=delUw147; delUwSucc148=delUw148; delUwSucc149=delUw149;
delUwSucc150=delUw150; delUwSucc151=delUw151; delUwSucc152=delUw152;
delUwSucc153=delUw153; delUwSucc154=delUw154; delUwSucc155=delUw155;
delUwSucc156=delUw156; delUwSucc157=delUw157; delUwSucc158=delUw158;
delUwSucc159=delUw159; delUwSucc160=delUw160; delUwSucc161=delUw161;
delUwSucc162=delUw162; delUwSucc163=delUw163; delUwSucc164=delUw164;
delUwSucc165=delUw165; delUwSucc166=delUw166; delUwSucc167=delUw167;
delUwSucc168=delUw168; delUwSucc169=delUw169; delUwSucc170=delUw170;
delUwSucc171=delUw171; delUwSucc172=delUw172; delUwSucc173=delUw173;
delUwSucc174=delUw174; delUwSucc175=delUw175; delUwSucc176=delUw176;
delUwSucc177=delUw177; delUwSucc178=delUw178; delUwSucc179=delUw179;
delUwSucc180=delUw180; delUwSucc181=delUw181; delUwSucc182=delUw182;
delUwSucc183=delUw183; delUwSucc184=delUw184; delUwSucc185=delUw185;
delUwSucc186=delUw186; delUwSucc187=delUw187; delUwSucc188=delUw188;
delUwSucc189=delUw189; delUwSucc190=delUw190; delUwSucc191=delUw191;
delUwSucc192=delUw192; delUwSucc193=delUw193; delUwSucc194=delUw194;
delUwSucc195=delUw195; delUwSucc196=delUw196; delUwSucc197=delUw197;
delUwSucc198=delUw198; delUwSucc199=delUw199; delUwSucc200=delUw200;
delUwSucc201=delUw201; delUwSucc202=delUw202; delUwSucc203=delUw203;
delUwSucc204=delUw204; delUwSucc205=delUw205; delUwSucc206=delUw206;
delUwSucc207=delUw207; delUwSucc208=delUw208; delUwSucc209=delUw209;
delUwSucc210=delUw210; delUwSucc211=delUw211; delUwSucc212=delUw212;
delUwSucc213=delUw213; delUwSucc214=delUw214; delUwSucc215=delUw215;
delUwSucc216=delUw216; delUwSucc217=delUw217; delUwSucc218=delUw218;
delUwSucc219=delUw219; delUwSucc220=delUw220; delUwSucc221=delUw221;
delUwSucc222=delUw222;
end   %% สิ้นสุด loop j   %%
%% โปรแกรมบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลา   %%
if i==1
    IC1=[Uwtdt1 Uwtdt2 Uwtdt3 Uwtdt4 Uwtdt5 Uwtdt6 Uwtdt7 Uwtdt8 Uwtdt9
        Uwtdt10 Uwtdt11 Uwtdt12 Uwtdt13 Uwtdt14 Uwtdt15 Uwtdt16 Uwtdt17
        Uwtdt18 Uwtdt19 Uwtdt20 Uwtdt21 Uwtdt22 Uwtdt23 Uwtdt24 Uwtdt25
        Uwtdt26 Uwtdt27 Uwtdt28 Uwtdt29 Uwtdt30 Uwtdt31 Uwtdt32 Uwtdt33
        Uwtdt34 Uwtdt35 Uwtdt36 Uwtdt37 Uwtdt38 Uwtdt39 Uwtdt40 Uwtdt41

```



```
Uwtdt42 Uwtdt43 Uwtdt44 Uwtdt45 Uwtdt46 Uwtdt47 Uwtdt48 Uwtdt49
Uwtdt50 Uwtdt51 Uwtdt52 Uwtdt53 Uwtdt54 Uwtdt55 Uwtdt56 Uwtdt57
Uwtdt58 Uwtdt59 Uwtdt60 Uwtdt61 Uwtdt62 Uwtdt63 Uwtdt64 Uwtdt65
Uwtdt66 Uwtdt67 Uwtdt68 Uwtdt69 Uwtdt70 Uwtdt71 Uwtdt72 Uwtdt73
Uwtdt74 Uwtdt75 Uwtdt76 Uwtdt77 Uwtdt78 Uwtdt79 Uwtdt80 Uwtdt81
Uwtdt82 Uwtdt83 Uwtdt84 Uwtdt85 Uwtdt86 Uwtdt87 Uwtdt88 Uwtdt89
Uwtdt90 Uwtdt91 Uwtdt92 Uwtdt93 Uwtdt94 Uwtdt95 Uwtdt96 Uwtdt97
Uwtdt98 Uwtdt99 Uwtdt100 Uwtdt101 Uwtdt102 Uwtdt103 Uwtdt104
Uwtdt105 Uwtdt106 Uwtdt107 Uwtdt108 Uwtdt109 Uwtdt110 Uwtdt111
Uwtdt112 Uwtdt113 Uwtdt114 Uwtdt115 Uwtdt116 Uwtdt117 Uwtdt118
Uwtdt119 Uwtdt120 Uwtdt121 Uwtdt122 Uwtdt123 Uwtdt124 Uwtdt125
Uwtdt126 Uwtdt127 Uwtdt128 Uwtdt129 Uwtdt130 Uwtdt131 Uwtdt132
Uwtdt133 Uwtdt134 Uwtdt135 Uwtdt136 Uwtdt137 Uwtdt138 Uwtdt139
Uwtdt140 Uwtdt141 Uwtdt142 Uwtdt143 Uwtdt144 Uwtdt145 Uwtdt146
Uwtdt147 Uwtdt148 Uwtdt149 Uwtdt150 Uwtdt151 Uwtdt152 Uwtdt153
Uwtdt154 Uwtdt155 Uwtdt156 Uwtdt157 Uwtdt158 Uwtdt159 Uwtdt160
Uwtdt161 Uwtdt162 Uwtdt163 Uwtdt164 Uwtdt165 Uwtdt166 Uwtdt167
Uwtdt168 Uwtdt169 Uwtdt170 Uwtdt171 Uwtdt172 Uwtdt173 Uwtdt174
Uwtdt175 Uwtdt176 Uwtdt177 Uwtdt178 Uwtdt179 Uwtdt180 Uwtdt181
Uwtdt182 Uwtdt183 Uwtdt184 Uwtdt185 Uwtdt186 Uwtdt187 Uwtdt188
Uwtdt189 Uwtdt190 Uwtdt191 Uwtdt192 Uwtdt193 Uwtdt194 Uwtdt195
Uwtdt196 Uwtdt197 Uwtdt198 Uwtdt199 Uwtdt200 Uwtdt201 Uwtdt202
Uwtdt203 Uwtdt204 Uwtdt205 Uwtdt206 Uwtdt207 Uwtdt208 Uwtdt209
Uwtdt210 Uwtdt211 Uwtdt212 Uwtdt213 Uwtdt214 Uwtdt215 Uwtdt216
Uwtdt217 Uwtdt218 Uwtdt219 Uwtdt220 Uwtdt221 Uwtdt222];
end
if i==480%%SellAB480%%
    SellAB480=[Uwtdt1 Uwtdt2 Uwtdt3 Uwtdt4 Uwtdt5 Uwtdt6 Uwtdt7 Uwtdt8
    Uwtdt9 Uwtdt10 Uwtdt11 Uwtdt12 Uwtdt13 Uwtdt14 Uwtdt15 Uwtdt16
    Uwtdt17 Uwtdt18 Uwtdt19 Uwtdt20 Uwtdt21 Uwtdt22 Uwtdt23 Uwtdt24
    Uwtdt25 Uwtdt26 Uwtdt27 Uwtdt28 Uwtdt29 Uwtdt30 Uwtdt31 Uwtdt32
    Uwtdt33 Uwtdt34 Uwtdt35 Uwtdt36 Uwtdt37 Uwtdt38 Uwtdt39 Uwtdt40
    Uwtdt41 Uwtdt42 Uwtdt43 Uwtdt44 Uwtdt45 Uwtdt46 Uwtdt47 Uwtdt48
    Uwtdt49 Uwtdt50 Uwtdt51 Uwtdt52 Uwtdt53 Uwtdt54 Uwtdt55 Uwtdt56
    Uwtdt57 Uwtdt58 Uwtdt59 Uwtdt60 Uwtdt61 Uwtdt62 Uwtdt63 Uwtdt64
    Uwtdt65 Uwtdt66 Uwtdt67 Uwtdt68 Uwtdt69 Uwtdt70 Uwtdt71 Uwtdt72
    Uwtdt73 Uwtdt74 Uwtdt75 Uwtdt76 Uwtdt77 Uwtdt78 Uwtdt79 Uwtdt80
    Uwtdt81 Uwtdt82 Uwtdt83 Uwtdt84 Uwtdt85 Uwtdt86 Uwtdt87 Uwtdt88
    Uwtdt89 Uwtdt90 Uwtdt91 Uwtdt92 Uwtdt93 Uwtdt94 Uwtdt95 Uwtdt96
    Uwtdt97 Uwtdt98 Uwtdt99 Uwtdt100 Uwtdt101 Uwtdt102 Uwtdt103
    Uwtdt104 Uwtdt105 Uwtdt106 Uwtdt107 Uwtdt108 Uwtdt109 Uwtdt110
    Uwtdt111 Uwtdt112 Uwtdt113 Uwtdt114 Uwtdt115 Uwtdt116 Uwtdt117
    Uwtdt118 Uwtdt119 Uwtdt120 Uwtdt121 Uwtdt122 Uwtdt123 Uwtdt124
    Uwtdt125 Uwtdt126 Uwtdt127 Uwtdt128 Uwtdt129 Uwtdt130 Uwtdt131
    Uwtdt132 Uwtdt133 Uwtdt134 Uwtdt135 Uwtdt136 Uwtdt137 Uwtdt138
    Uwtdt139 Uwtdt140 Uwtdt141 Uwtdt142 Uwtdt143 Uwtdt144 Uwtdt145
    Uwtdt146 Uwtdt147 Uwtdt148 Uwtdt149 Uwtdt150 Uwtdt151 Uwtdt152
    Uwtdt153 Uwtdt154 Uwtdt155 Uwtdt156 Uwtdt157 Uwtdt158 Uwtdt159
    Uwtdt160 Uwtdt161 Uwtdt162 Uwtdt163 Uwtdt164 Uwtdt165 Uwtdt166
    Uwtdt167 Uwtdt168 Uwtdt169 Uwtdt170 Uwtdt171 Uwtdt172 Uwtdt173
    Uwtdt174 Uwtdt175 Uwtdt176 Uwtdt177 Uwtdt178 Uwtdt179 Uwtdt180
```

```

Uwtdt181 Uwtdt182 Uwtdt183 Uwtdt184 Uwtdt185 Uwtdt186 Uwtdt187
Uwtdt188 Uwtdt189 Uwtdt190 Uwtdt191 Uwtdt192 Uwtdt193 Uwtdt194
Uwtdt195 Uwtdt196 Uwtdt197 Uwtdt198 Uwtdt199 Uwtdt200 Uwtdt201
Uwtdt202 Uwtdt203 Uwtdt204 Uwtdt205 Uwtdt206 Uwtdt207 Uwtdt208
Uwtdt209 Uwtdt210 Uwtdt211 Uwtdt212 Uwtdt213 Uwtdt214 Uwtdt215
Uwtdt216 Uwtdt217 Uwtdt218 Uwtdt219 Uwtdt220 Uwtdt221 Uwtdt222];
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% แทนค่าตัวแปรอิสระใหม่ เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นในรอบเวลาถัดไป %%
Uwt1(1)=Uwtdt1;
Twt1(1)=Twttdt1;
delUwSucc1=0.9*delUw1;

Uwt2(1)=Uwtdt2;
Twt2(1)=Twttdt2;
delUwSucc2=0.9*delUw2;

Uwt3(1)=Uwtdt3;
Twt3(1)=Twttdt3;
delUwSucc3=0.9*delUw3;

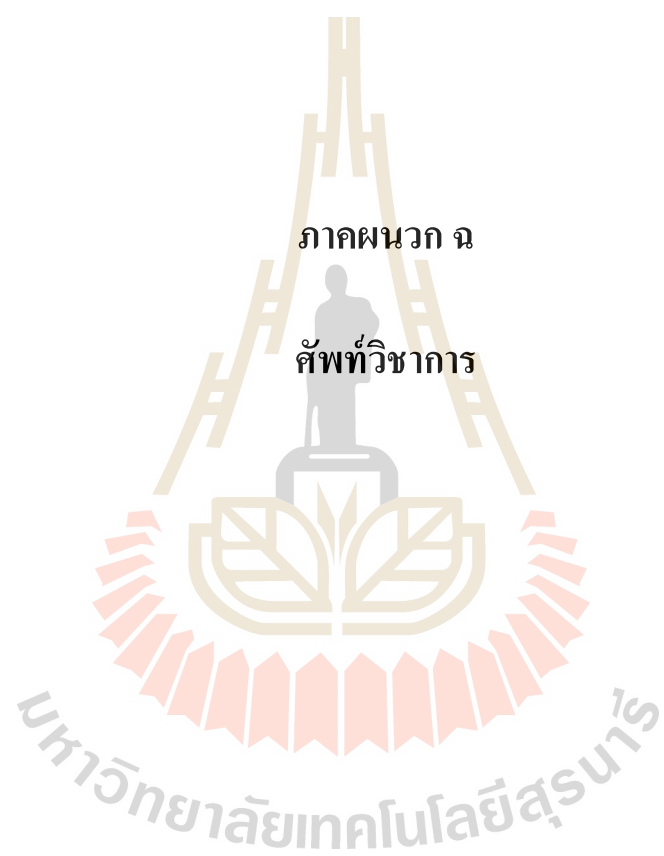
Uwt4(1) =Uwtdt4;
Twt4(1) =Twttdt4;
delUwSucc4=0.9*delUw4;
o
o
o
o
Uwt221(1)=Uwtdt221;
Twt221(1)=Twttdt221;
delUwSucc221=0.9*delUw221;

Uwt222(1)=Uwtdt222;
Twt222(1)=Twttdt222;
delUwSucc222=0.9*delUw222;

Tbt(1)=Tbttdt;
delTbSucc=0.9*delTb;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end %% สิ้นสุด loop i

```

หลังจากวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยโปรแกรม MATLAB เสร็จสิ้นแล้วจะนำผลที่ได้จากแบบจำลองจัดเก็บในรูปแบบของเอกสารภายนอกโปรแกรม MATLAB เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลอง



ภาคผนวก ฉ

ศัพท์วิชาการ

เนื่องจากการใช้ศัพท์วิชาการทางวิทยาศาสตร์ ที่เป็นภาษาไทยยังไม่เป็นมาตรฐานเดียวกันหมด ถึงแม้ว่าราชบัณฑิตยสถานจะได้บัญญัติศัพท์ขึ้นมาบ้างแล้วก็ตาม ผู้วิจัยได้ใช้ศัพท์บางคำแตกต่างออกไปบ้าง ดังนั้นผู้ที่สนใจในงานวิจัยนี้พึงตรวจสอบความหมายที่แท้จริงจากรากศัพท์ภาษาอังกฤษ ดังต่อไปนี้

Enthalpy	เอนทาลปี
Evaporator	เครื่องทำระเหย
Compressor	คอมเพรสเซอร์
Condenser	เครื่องควบแน่น
Cooling tower	หอผึ่งเย็น
Refrigerant Receiver	ถังเก็บสารทำความเย็น
Expansion valve	วาล์วลดความดัน
Accumulator	แอกคิวมูเลเตอร์
Optimization method	วิธีการหาค่าที่ดีที่สุด
Dynamics programming	วิธีกำหนดการพลวัต



ภาควิชา

เครื่องมือตรวจวัดพื้นฐาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบใช้เทอร์โมคัปเปิล (Digital Thermometer with K-type Thermocouple)



2. เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer)



ภาคผนวก ซ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รัฐกร มากหวาน, ชีระชาติ พรพิบูลย์, (2560) การวิเคราะห์หาภาระการทำความเย็นสำหรับ
กระบวนการผลิตน้ำแข็งของ การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่
13 (ENETT 13). โรงแรมดิเอ็มเพลส จังหวัดเชียงใหม่, 31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน 2560



การวิเคราะห์หาค่าภาระการทำความเย็นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ Analysis of cooling load modeling for block-ice making machine

รัฐกร มากหวาน^{1*}, ชีระชาติ พรพิบูลย์²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000
 *E-mail : m_rattakorn@hotmail.com ,เบอร์โทรศัพท์: 0-4422-4410, เบอร์โทรสาร: 0-4422-4411

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ภาระการทำความเย็นสำหรับเครื่องผลิตน้ำแข็งของในปัจจุบันยังไม่มีหลักเกณฑ์ในการออกแบบเครื่องผลิตน้ำแข็งของที่แน่นอนในทางปฏิบัติทำได้โดยการประมาณการภาระการทำความเย็นจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบส่งผลให้ได้อัตราการการทำความเย็นของเครื่องผลิตน้ำแข็งของที่ไม่เหมาะสม ยิ่งไปกว่านั้นหากทราบภาระการทำความเย็นจะนำไปประมาณการกำหนดรูปแบบการเดินเครื่องผลิตน้ำแข็งของเพื่อการประหยัดค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์หาค่าภาระการทำความเย็นโดยใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในของน้ำแข็งกับน้ำเกลือภายในบ่อผลิต การสมดุลพลังงานความร้อนของน้ำเกลือ การสมดุลพลังงานความร้อนของน้ำภายในของน้ำแข็งภายใต้เงื่อนไขการผลิตจริงของโรงงานที่ระยะเวลา 5 วันของการทำความเย็น ผลที่ได้สามารถทำนายพฤติกรรมการก่อตัวของน้ำแข็งแบ่งได้เป็น 3 ปรากฏการณ์ ปรากฏการณ์แรกคือจากสภาวะเริ่มต้นน้ำที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งโดยใช้เวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง ปรากฏการณ์ที่สองคือระยะเวลาการผลิตน้ำแข็งพร้อมจำหน่ายใช้เวลาผลิตประมาณ 5 วัน ปรากฏการณ์สุดท้ายคือเมื่อน้ำนำอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมาแช่ลงในบ่อน้ำเกลือ อุณหภูมิของน้ำเกลือจะมีความสูงขึ้นในช่วงระยะเริ่มต้นเกิดจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำภายในของกับน้ำเกลือภายในบ่อมีความแตกต่างกันมาก จนกระทั่งเวลาผ่านไปภาระการทำความเย็นสุทธิจะมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการทำความเย็นทำให้น้ำเกลือมีอุณหภูมิลดลงซึ่งทั้ง 3 ปรากฏการณ์ที่กล่าวมาสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นกับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของในโรงงานน้ำแข็งดังนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถใช้ทำนายปรากฏการณ์ต่างๆที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งของได้

คำหลัก: น้ำแข็งของ, ภาระการทำความเย็น, อัตราการทำความเย็น

Abstract

This research presents the analysis of cooling load for block-ice making machine. At present, there are not concept of design block-ice making machines. It depends on maker experiences, it results in the cooling capacity of Block-ice making machines, are not appropriate. In addition, when the cooling load is known, it will be managed to operating the block-ice making machines for energy cost saving. This research have analyzed cooling load by the principal of heat transfer between water in the mold and salt water in the pool, energy balance of salt water method, energy balance of water in the mold method. To design the cooling load model, by using the real production constrain of factory for five days of the cycle. It was found that the ice forming behavior can be divided into three phenomena. First phenomena, at the beginning the water at surrounding temperature become a solid within 3-4 hours. Second phenomena, the ice produce approximately 5 days. And last phenomena, when the water were dipped in the salt water pool, the net cooling load is increase in a short period of time resulting from the extreme temperature difference between water in the mold and salt water in the pool. As the time passes, the net cooling load keeps decreasing to reach the same level of cooling capacity, leading to a decrease of salt water temperature. As those three phenomena stated here in correspond to the ice factory actual behavior. Therefore, this model can be used to predict the phenomenon are likely to occur during the block-ice making processes.

Keywords: Block-ice, Cooling load, Cooling capacity

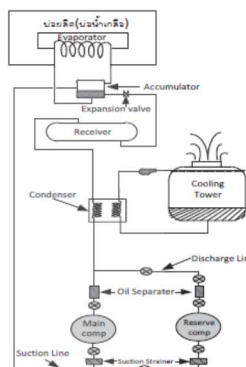
1. บทนำ

การกำหนดขนาดของเครื่องทำความเย็นของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของในปัจจุบันยังคงไม่มีหลักเกณฑ์ที่แน่นอนขึ้นกับประสบการณ์ของผู้ออกแบบและสร้างเครื่องทำความเย็นในแต่ละราย ทำให้พบว่าอัตราการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นต่อหน่วยการผลิตน้ำแข็งของของแต่ละโรงงานมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน การควบคุมการเดินเครื่องทำความเย็นจะควบคุมตามช่วงอุณหภูมิของน้ำเกลือภายในบ่อ โดยทั่วไปควบคุมไว้ระหว่าง 0 °C ถึง -10 °C โดยที่ผ่านมามีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการหาภาระการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นซึ่งใช้วิธีการหาความร้อนที่บ่อน้ำเกลือได้รับซึ่งยังไม่สามารถบ่งบอกถึงภาระการทำความเย็นที่แท้จริงของเครื่องทำความเย็นได้เนื่องจากภาระการทำความเย็นที่แท้จริงนั้นเกิดจากน้ำภายในของคายความร้อนให้แก่ น้ำเกลือภายในบ่อผลิตแล้วน้ำเกลือก็จะคายความร้อนให้แก่เครื่องทำระเหย(Evaporator)อีก ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้จึงได้ทำการหาภาระการทำความเย็นที่แท้จริงโดยการให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการหาภาระการทำความเย็นที่แท้จริงที่เครื่องทำความเย็นได้รับ เพื่อนำไปสู่การออกแบบขนาดของเครื่องทำความเย็นที่เหมาะสมและกำหนดรูปแบบการเดินเครื่องทำความเย็น

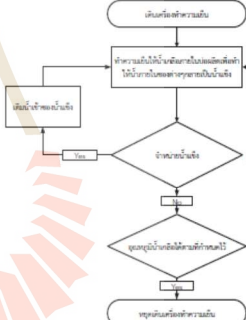
2. เครื่องผลิตน้ำแข็งของ

การผลิตน้ำแข็งของมีหลักการทำงาน โดยใช้ระบบทำความเย็นตามหลักการของวัฏจักรอัดไอ (Vapor Compression Cycle) ซึ่งใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น สารทำความเย็นความดันต่ำในสถานะของผสมของเหลวและไออิ่มตัว (Liquid Vapor mixture) ที่มีอุณหภูมิต่ำภายในเครื่องทำระเหย (Evaporator) ทำความเย็นให้กับน้ำเกลือภายในบ่อผลิตเพื่อให้ น้ำเกลือมีอุณหภูมิต่ำตามที่ต้องการเพื่อทำความเย็นให้กับน้ำบริสุทธิ์ภายในของน้ำแข็งที่แช่อยู่ในบ่อน้ำเกลือในขณะที่ทำความเย็นน้ำบริสุทธิ์จะถูกเป่าด้วยลมอัดตลอดเวลาเพื่อให้สิ่งปนเปื้อนภายในของน้ำแข็งเข้ามารวมตัวที่กึ่งกลางของซึ่งเป็น ส่วนของน้ำแข็งที่ถูกตัดทิ้งไปภายหลังจากทำการจำหน่าย จนกระทั่งเกิดน้ำแข็งบริสุทธิ์ประมาณ 25-50% ของปริมาตรของน้ำแข็งจึงหยุดการจ่ายลมอัด สารทำความเย็นภายหลังจากที่รับความร้อนจากน้ำเกลือแล้วจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไออิ่มตัวเข้าสู่แอกคิวมูเลเตอร์ (Accumulator) และคอมเพรสเซอร์ จะดูดสารทำความเย็นเหล่านี้เข้าสู่กระบวนการอัดกลายเป็น สารทำความเย็นความดันสูงสถานะไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapor) จากนั้นสารทำความเย็นเหล่านี้จะคายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมโดยอาศัยน้ำระบายความร้อนจากหอผึ่งเย็น (Cooling Tower) ที่เครื่องควบแน่น (Condenser) สารทำความเย็นความดันสูงที่คายความร้อนแล้วจะเปลี่ยนสถานะเป็น

สารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัว (Saturated Liquid) ความดันสูง เข้าสู่ถังเก็บสารทำความเย็นเหลว (Receiver) จากนั้นสารทำความเย็นเหล่านี้จะถูกลดความดันด้วยวาล์วลดความดัน (Expansion Valve) จนมีสถานะเป็นสารทำความเย็นสถานะของผสมอิ่มตัวความดันต่ำเข้าสู่แอกคิวมูเลเตอร์ และเครื่องทำระเหย ตามลำดับ เพื่อการทำความเย็นให้แก่ น้ำเกลือภายในบ่อผลิต แสดงดังรูปที่ 1 และขั้นตอนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1. ระบบการทำความเย็นของการผลิตน้ำแข็งของ

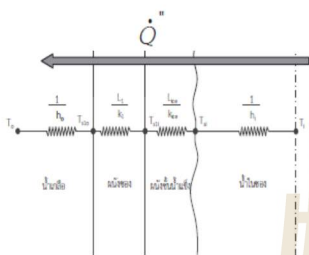


รูปที่ 2. แผนภูมิขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งของ

3. การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำเกลือและน้ำภายในของ

การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำเกลือและน้ำภายในของจะเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิ น้ำเกลือกับน้ำภายในของมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากความร้อนจะถ่ายเทจากสสารที่มีอุณหภูมิสูงไปที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ ดังนั้นความร้อนจึงถ่ายเทจากน้ำภายในของให้กับน้ำเกลือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำภายในของอุณหภูมิ T_i และน้ำเกลืออุณหภูมิ T_o จะเกิดจาก 4 กลไกการถ่ายเทความร้อน ตามลำดับดังนี้ 1. กลไกการพาความร้อนระหว่างน้ำภายในของและพื้นผิวน้ำแข็ง 2. กลไกการนำความร้อนระหว่างพื้นผิวน้ำแข็งภายในของน้ำแข็งและพื้นผิววัสดุผนังภายในของน้ำแข็ง 3. กลไกการนำความร้อนระหว่าง

พื้นผิวของผนังภายในของน้ำแข็งและพื้นผิวของผนังภายนอกของน้ำแข็ง 4. กลไกการพาความร้อนระหว่างพื้นผิวของผนังภายนอกของน้ำแข็งและน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ความร้อนจะถ่ายเทจากน้ำภายในของผ่านชั้นน้ำแข็งและความหนาของวัสดุของน้ำแข็งและให้กับน้ำเกลือในบ่อผลิต ตามลำดับ โดยอาศัยกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้ง 4 กลไก ดังกล่าว ซึ่งแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3. กลไกการถ่ายเทความร้อนของการผลิตน้ำแข็งของ

จากรูปที่ 3 ถ้าพิจารณาสมดุลพลังงานของน้ำภายในของ สมดุลพลังงานของผนังชั้นน้ำแข็ง สมดุลพลังงานของผนังวัสดุของน้ำแข็ง และ สมดุลพลังงานของน้ำเกลือ ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady State) จะพบว่าอัตราความร้อนที่วัสดุต่างๆ ดังรูปได้รับจะเท่ากับอัตราความร้อนที่วัสดุนั้นถ่ายเทให้กับวัสดุที่อยู่ถัดไป และเนื่องจากวัสดุทั้งหมดมีพื้นที่พื้นผิวเท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้อัตราความร้อนต่อพื้นที่ที่ถ่ายเทผ่านวัสดุทั้ง 4 ชนิด มีขนาดเท่ากันด้วย ดังนั้นจากรูปที่ 3 จึงแทนอัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ด้วย \dot{Q}'' (W/m^2) โดยการไหลเป็นการไหลบนแผ่นเรียบ (Flow over flat plate) โดยจำแนกรูปแบบการไหลด้วยค่าเรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ ซึ่งนำไปสู่ค่าหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat Transfer Coefficient) ได้จากสมการเอมพิริกัล (Empirical Formula) ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัมเบอร์ (Nusselt number) ค่าพรันด์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl number) และ ค่าเรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ (Reynolds number) ภายใต้อิทธิพลของรูปแบบการไหลดังนี้

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.664 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (1)$$

สำหรับ $0.6 < Pr < 10$, $Re \leq 5 \times 10^5$

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.037 Pr^{1/3} Re^{4/5} \quad (2)$$

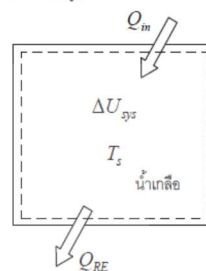
สำหรับ $0.6 < Pr < 60$, $5 \times 10^5 \leq Re \leq 10^7$

ดังนั้น

$$h = \frac{Nuk}{L} \quad (3)$$

4.การสมดุลพลังงานของบ่อน้ำเกลือ

การสมดุลพลังงานของน้ำเกลือโดยให้น้ำเกลือภายในบ่อผลิตเป็นปริมาตรควบคุม (Control volume) โดยพลังงานที่น้ำเกลือได้รับประกอบด้วย ความร้อนที่ไหลเข้าสู่บ่อผลิตจากผนังบ่อส่วนที่จมน้ำ ความร้อนที่ไหลเข้าบ่อผลิตส่วนที่ไม่จมน้ำ และความร้อนที่นำในของน้ำแข็งคายให้กับน้ำเกลือ ส่วนพลังงานที่น้ำเกลือสูญเสียคือความร้อนที่น้ำเกลือคายให้กับสารทำความเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การถ่ายเทพลังงานของน้ำเกลือในบ่อผลิต และสามารถสมดุลพลังงานได้ดังนี้

สมดุลพลังงานน้ำเกลือ :

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{sys} \quad (4)$$

$$E_{in} = Q_{in} = Q_{wall, leak} + \sum (Q_{ice}^A + \Delta Q_{ice}) \quad (5)$$

$$E_{out} = Q_{RE} \quad (6)$$

เนื่องจากน้ำเกลือมีสถานะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นพลังงานภายในของน้ำเกลือจึงขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำเกลือ ทำให้ $\Delta E_{sys} = \Delta U_s$

จัดรูปสมการจะได้ว่า

$$Q_{wall, leak} + \sum (Q_{ice}^A + \Delta Q_{ice}) - Q_{RE} = \Delta U_s \quad (7)$$

จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อนต่อหน่วยเวลา Δt

$$\dot{Q}_{wall, leak} + \sum (\dot{Q}_{ice}^A + \Delta \dot{Q}_{ice}) - \dot{Q}_{RE} = m_s \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad (8)$$

ดังนั้น

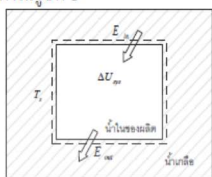
$$\Delta t = \frac{m_s C (T_{o2} - T_{o1})}{\dot{Q}_{wall, leak} + \sum (\dot{Q}_{ice}^A + \Delta \dot{Q}_{ice}) - \dot{Q}_{RE}} \quad (9)$$

ดังนั้นสามารถหาอุณหภูมิน้ำเกลือเมื่อเวลาผ่านไป Δt จะได้ว่า

$$T_{o2} = \frac{\Delta t}{m_s C} \left[\dot{Q}_{wall, leak} + \sum (\dot{Q}_{ice}^A + \Delta \dot{Q}_{ice}) - \dot{Q}_{RE} \right] + T_{o1} \quad (10)$$

5.การสมดุลพลังงานของน้ำภายในของน้ำแข็ง

การถ่ายเทพลังงานของน้ำภายในของน้ำแข็ง ซึ่งพบว่าพลังงานที่น้ำภายในของได้รับ ประกอบด้วย ความร้อนจากสิ่งแวดล้อมผ่านฝาปิด และความร้อนที่ได้รับจากลมอัด ส่วนพลังงานที่น้ำภายในของสูญเสียคือพลังงานความร้อนที่น้ำภายในของคายให้กับน้ำเกลือเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การถ่ายเทพลังงานของน้ำภายในของน้ำแข็ง และสามารถสมดุลพลังงานได้ดังนี้

สมดุลพลังงานน้ำภายในของน้ำแข็ง :

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{sys} \quad (1)$$

$$E_{in} = Q_{lid,leak} + Q_{ca} \quad (11)$$

$$E_{out} = Q_{ice} \quad (12)$$

$$\Delta E_{sys} = \Delta U_{water} \quad (13)$$

จัดรูปสมการ จะได้ว่า

$$Q_{lid,leak} + Q_{ca} - Q_{ice} = \Delta U_{sys} = \Delta U_{water} \quad (14)$$

$$Q_{lid,leak} + Q_{ca} - Q_{ice} = (m_{water,2} u_{water,2} - m_{water,1} u_{water,1}) \quad (15)$$

จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อนต่อหน่วยเวลา Δt

$$\dot{Q}_{lid,leak} + \dot{Q}_{ca} - \dot{Q}_{ice} = \frac{m_{water} (u_{water,2} - u_{water,1})}{\Delta t} \quad (16)$$

โดยที่

$$\dot{Q}_{ca} = \dot{m}_{ca} c_{p,ca} (T_{ca} - T_i) \quad (17)$$

ดังนั้นสามารถหาสถานะของน้ำภายในของน้ำแข็งเมื่อเวลาผ่านไปได้ดังนี้

$$u_{water,2} = \frac{\Delta t (\dot{Q}_{lid,leak} + \dot{Q}_{ca} - \dot{Q}_{ice})}{m_{water}} + u_{water,1} \quad (18)$$

อัตราความร้อนที่น้ำสูญเสียให้กับน้ำเกลือ เกิดจากอิทธิพลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเกลือและอุณหภูมิของน้ำในของ ดังนั้นเมื่อพิจารณาอัตราความร้อนต่อพื้นที่ที่ถ่ายเทระหว่างน้ำในของและน้ำเกลือดังแสดงในสมการที่ (19)

$$Q'' = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{h_o} + \frac{L_i}{k_i} + \frac{L_{ice}}{k_{ice}} + \frac{1}{h_i}} \quad (19)$$

แต่ในทางปฏิบัติพิจารณาอัตราความร้อนที่น้ำสูญเสียให้กับน้ำเกลือหากพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของทุกของในแต่ละยกพร้อมกันจะทำให้มีความยุ่งยากลดลงเมื่อเทียบกับการ

วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำและน้ำเกลือที่ละลายของ เพราะพื้นที่ผิวของไม่ได้สัมผัสกับน้ำเกลือทั้งหมด ดังนั้นจึงพิจารณาอัตราความร้อนที่น้ำสูญเสียให้กับน้ำเกลือของน้ำทุกของที่ยกพร้อมๆ กัน ดังสมการที่ (20)

$$\dot{Q}_{ice} = A \left[\frac{T_{i1} - T_{o1}}{\frac{1}{h_o} + \frac{L_i}{k_i} + \frac{L_{ice}}{k_{ice}} + \frac{1}{h_i}} \right] \quad (20)$$

จากการสมดุลพลังงานของบ่อน้ำเกลือและสมดุลพลังงานน้ำภายในของน้ำแข็งนำไปสู่การทำแบบจำลองกลไกการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของได้ดังหัวข้อที่ 7

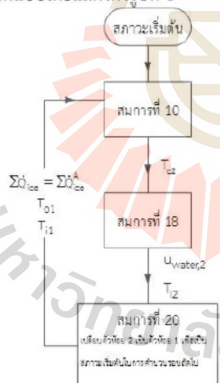
6.การวิเคราะห์ภาวะการทำความเย็น

ในแบบจำลองการหาภาวะการทำความเย็นนี้สามารถแบ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังแสดงในการสมดุลพลังงานข้างต้นประกอบไปด้วย **ตัวแปรควบคุม** หมายถึงกลุ่มตัวแปรตามเงื่อนไขการผลิตซึ่งเป็นค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการผลิตซึ่งประกอบไปด้วย อัตราความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ไหลเข้าสู่บ่อผลิตส่วนที่จมน้ำและส่วนที่ไม่จมน้ำรวมถึงฝาปิดของน้ำแข็ง (W/m^2), มวลของน้ำภายในของน้ำแข็ง(kg), มวลของน้ำเกลือภายในบ่อผลิต(kg), อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็น(kW), จำนวนของน้ำแข็งทั้งหมดภายในบ่อผลิต(ช่อง) ปริมาตรของของน้ำแข็ง(m^3), ความเร็วน้ำเกลือภายในบ่อผลิต (m/s) **ตัวแปรอิสระ** หมายถึงกลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทำความเย็นโดยตรงซึ่งผันแปรกับระยะเวลาการทำความเย็นซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต($^{\circ}C$), อุณหภูมิน้ำภายในของน้ำแข็ง($^{\circ}C$), จำนวนของน้ำแข็งที่ถูกยกจำหน่าย(ช่อง), ช่วงอุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตที่ใช้ในการควบคุมการเดินเครื่อง($^{\circ}C$) **ตัวแปรตาม** หมายถึงกลุ่มตัวแปรที่ผันแปรตามตัวแปรอิสระ ประกอบไปด้วย ภาวะการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็น(kW), อุณหภูมิน้ำภายในของที่เปลี่ยนเมื่อเวลาผ่านไป($^{\circ}C$), อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิตที่เปลี่ยนเมื่อเวลาผ่านไป($^{\circ}C$), การจำลองกลไกถ่ายเทความร้อนของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของต้องมีการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นโดยใช้เงื่อนไขเดียวกันกับสภาพจริงของโรงงานโดยมีเงื่อนไขประกอบไปด้วย, อุณหภูมิน้ำเกลือที่เวลาเริ่มต้น (T_{o1}) . อุณหภูมิน้ำภายในของน้ำแข็งในแต่ละช่องในบ่อผลิต (T_{i1}) ที่สภาวะเริ่มต้น, อัตราส่วนการเป็นน้ำแข็งหรือเปอร์เซ็นต์น้ำแข็ง (x) ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความหนาของชั้นน้ำแข็งภายในของผลิต (L_{ice}) จากอุณหภูมิน้ำเกลือและอุณหภูมิภายในของน้ำแข็ง จากสมการที่ 20 จะได้อัตราความร้อนของน้ำภายในของ

น้ำแข็งในแต่ละช่อง ($\dot{Q}_{ice,1}$) ที่สภาวะเริ่มต้น และเมื่อพิจารณาผลรวมของอัตราความร้อนของน้ำภายในช่องน้ำแข็งทั้งหมดของบ่อผลิตจะได้ $\sum \dot{Q}_{ice,1}$, จำนวนน้ำแข็งที่ถูกยกออกไปจำหน่ายและเติมน้ำบริสุทธิ์เข้ามาทำความเย็นแทนที่ ในเวลาที่มีน้ำเต็มใหม่ลงไปแช่ในบ่อผลิตภายหลังจากที่มีการยกน้ำแข็ง อัตราความร้อนของน้ำภายในช่องน้ำแข็งที่เติมน้ำเข้ามาทำความเย็นทั้งหมด ($\sum \Delta \dot{Q}_{ice}$) พิจารณาได้จากอุณหภูมิ น้ำเกลือ (T_{o1}) และอุณหภูมิ น้ำภายในช่องน้ำแข็ง (T_{i1}) จากสมการที่ 16 และจะมีค่าเป็นศูนย์ในเวลาที่ไม่มีการเติมน้ำใหม่ลงแช่ในบ่อผลิต ($\sum \Delta \dot{Q}_{ice} = 0$)

7.แบบจำลองกลไกการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

จากการพิจารณาสมดุลพลังงานของบ่อน้ำเกลือและสมดุลพลังงานของน้ำภายในช่องน้ำแข็งภายใต้สภาวะไม่คงตัว (Unsteady State) จะทำให้ได้สมการที่ 10 และสมการที่ 18 ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำเกลือ (T_o) และสภาวะของน้ำภายในช่องน้ำแข็งจะผันแปรไปตามเวลาของการทำความเย็น จะทำให้อัตราความร้อนของน้ำภายในช่องน้ำแข็งผันแปรไปตามเวลาด้วย (\dot{Q}_{ice}) ดังแสดงในสมการที่ 20 ดังนั้นการจำลองกลไกการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของจึงถูกออกแบบโดยแสดงดังรูปที่ 6

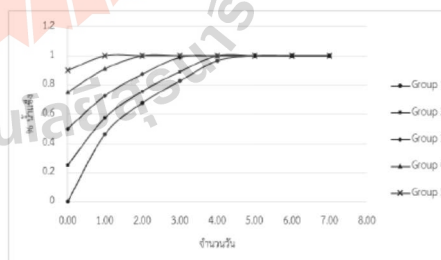


รูปที่ 6 แผนภูมิการจำลองกลไกการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ สัญลักษณ์ตัวท้อย 1 แทน สภาวะเริ่มต้นที่เวลา $t = 0$ และ 2 แทน สภาวะที่เวลา $t + \Delta t$

8.ผลที่ได้จากแบบจำลอง

จากแบบจำลองกลไกการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของจะทราบถึงอุณหภูมิของน้ำภายในช่องต่างๆซึ่งสามารถบอกถึงสภาวะของน้ำภายในช่องแต่ละช่องได้แต่จากการวิเคราะห์การก่อตัวของน้ำแข็งภายในช่องน้ำแข็งโดยใช้สมมติฐานว่าน้ำแข็งจะเริ่มก่อตัวหนาขึ้นจากผิวของช่องน้ำแข็งและค่อยๆหนาขึ้นแบบคงที่ตลอดความลึกของช่องจนหนาเต็มของน้ำแข็ง เมื่อภายในช่องมีน้ำแข็งที่ก่อตัวหนาขึ้นจะพบว่าความหนาของน้ำแข็งจะแปรผันกับระยะความลึกของช่อง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงทำให้เมื่อน้ำแข็งก่อตัวเกือบเต็มช่องจะมีส่วนน้ำที่ยังไม่แข็งตัวค้างอยู่ในรูปทรงพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมหัวกลับ ซึ่งในทางปฏิบัตินี้ไม่สามารถที่จะทำการตรวจวัดสภาพของน้ำแข็งได้เพราะน้ำแข็งมีการเปลี่ยนแปลงสภาพตลอดเวลาทำให้ไม่สามารถทำการตรวจวัดความหนาของน้ำแข็งที่ก่อตัวขึ้นจริงได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองได้โดยตรงจึงได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยการสังเกตพฤติกรรมการก่อตัวของน้ำแข็งภายในช่องต่างๆเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองโดยอ้างอิงเงื่อนไขการผลิตจากสภาวะจริงจากโรงงานที่ได้ทำการศึกษาวิจัย ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตน้ำแข็งจริง สามารถสรุปได้ดังนี้

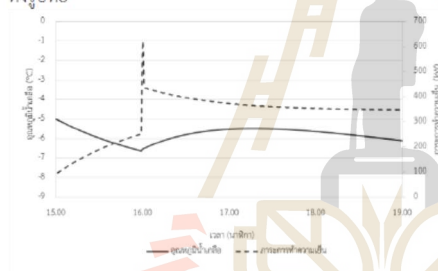
- 8.1. การเปลี่ยนสถานะของน้ำจากแบบจำลอง พบว่าน้ำที่เติมเข้าไปใหม่จะเริ่มกลายเป็นน้ำแข็งใช้เวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง ภายใต้งานเงื่อนไขการผลิตที่กำหนด จากการสังเกตการณ์พบว่าน้ำที่เติมเข้าไปใหม่จะเริ่มกลายเป็นน้ำแข็งใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบจำลอง
- 8.2. อัตราการก่อตัวของน้ำแข็ง ช่วงเริ่มต้นจะก่อตัวขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มก่อตัวช้าลงเมื่อมีปริมาณน้ำแข็งในช่องมีสัดส่วนที่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 7 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการสังเกตการณ์ที่โรงงาน พบว่าตรงกัน น้ำจะกลายเป็นน้ำแข็งทั้งหมดใช้เวลาประมาณ 5 วัน ภายใต้งานเงื่อนไขการผลิตที่กำหนด



รูปที่ 7 การก่อตัวของน้ำแข็งเทียบกับเวลาการผลิต ภายใต้งานเงื่อนไขที่กำหนด

โดยที่ Group 1 คือ ภายในชองน้ำแข็งมีน้ำแข็งอยู่ 0 - 25% ของ ปริมาตรของ Group 2 คือ ภายในชองน้ำแข็งมีน้ำแข็งอยู่ 26 - 50% ของปริมาตรของ Group 3 คือ ภายในชองน้ำแข็งมีน้ำแข็ง อยู่ 51 - 75% ของปริมาตรของ Group 4 คือ ภายในชองน้ำแข็ง มีน้ำแข็งอยู่ 76 - 90% ของปริมาตรของ Group 5 คือ ภายใน ชองน้ำแข็งมีน้ำแข็งอยู่มากกว่า 91% ของปริมาตรของ

8.3 เมื่อมีการยกน้ำแข็งออกไปแล้วเติมน้ำเข้ามาใหม่ จะทำให้ภาระการทำความเย็นสุทธิมีค่าสูงมากในช่วงแรก ซึ่งเป็นระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ ของน้ำบริสุทธิ์ที่เติมเข้ามาใหม่กับอุณหภูมิน้ำเกลือมีความ แตกต่างกันมาก ส่งผลให้อุณหภูมิน้ำเกลือในบ่อมีแนวโน้ม สูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากมีภาระการทำความเย็นสุทธิสูงกว่า อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นในขณะนั้น เมื่อ ผ่านไประยะหนึ่งภาระการทำความเย็นสุทธิลดลงอย่างรวดเร็ว ตามอุณหภูมิของน้ำบริสุทธิ์ที่เติมเข้าไปใหม่จนกระทั่งใกล้เคียง กับอัตราการทำความเย็นของเครื่อง ส่งผลให้อุณหภูมิน้ำเกลือ ค่อยๆ ลดลง โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเกลือภาระ การทำความเย็นสุทธิ และเวลาที่ทำการยกน้ำแข็งออกไปแสดง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเกลือ ภาระการทำความเย็นของน้ำบริสุทธิ์ เมื่อยกน้ำแข็งออกไป

9. บทสรุป

ภาระการทำความเย็นของการผลิตน้ำแข็งของที่ วิเคราะห์ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ จะทำให้ทราบถึงกลไกการ ถ่ายเทความร้อนระหว่าง อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำ ความเย็น สภาวะน้ำเกลือภายในบ่อผลิตและ สภาวะน้ำในชอง น้ำแข็งต่างๆ ที่ทำความเย็นร่วมกัน จะนำไปสู่การทำนาย สภาวะการเกิดน้ำแข็งภายในชองน้ำแข็งแต่ละชองและทราบถึง ปริมาณของน้ำแข็งที่พร้อมจำหน่ายและคงเหลือเพื่อรักษา ความเย็นของน้ำเกลือ โดยผลที่ได้จากแบบจำลองสามารถสรุป ได้เป็น 3 ข้อสรุปดังนี้ 1) จากสภาวะเริ่มต้นน้ำที่อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อมจะเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งโดยใช้เวลา ประมาณ 3-4 ชั่วโมง 2) ระยะเวลาการผลิตน้ำแข็งพร้อม จำหน่ายใช้เวลาผลิตประมาณ 5 วัน 3) เมื่อน้ำน้ำอุณหภูมิ

สิ่งแวดล้อมมาแชลงในบ่อน้ำเกลือ อุณหภูมิน้ำเกลือจะมีค่า สูงขึ้นในช่วงระยะเริ่มต้นเกิดจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำ ภายในชองกับน้ำเกลือภายในบ่อมีความแตกต่างกันมาก จนกระทั่งเวลาผ่านไปภาระการทำความเย็นสุทธิจะมีค่า ใกล้เคียงกับอัตราการทำความเย็นทำให้น้ำเกลือมีอุณหภูมิ ลดลง

โดยผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้สอดคล้องกับ พฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นกับกระบวนการผลิตน้ำแข็งของใน โรงงานน้ำแข็งตั้งนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถใช้งานาย ปรากฏการณ์ต่างๆที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งจะ เริ่มเป็นน้ำแข็ง

10. คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- h_i สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในชอง , ($W/m^2 K$)
- T_i อุณหภูมิของน้ำภายในชอง ($^{\circ}C$)
- T_{si} อุณหภูมิพื้นผิวน้ำแข็ง ($^{\circ}C$)
- L_{ice} ความหนาของผนังชั้นน้ำแข็ง (m)
- K_{ice} สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำแข็ง (W/mK)
- T_{sti} อุณหภูมิพื้นผิวภายในวัสดุผนังของ ($^{\circ}C$)
- L_1 ความหนาของวัสดุของน้ำแข็ง (m)
- K_1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผนังของน้ำแข็ง ($W/m K$)
- T_{s1o} อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกวัสดุผนังของ ($^{\circ}C$)
- h_o ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำเกลือ ($W/m^2 K$)
- T_o อุณหภูมิน้ำเกลือภายในบ่อผลิต ($^{\circ}C$)
- \dot{Q}'' อัตราความร้อนสุทธิต่อหน่วยพื้นที่ (W/m^2)
- Nu ค่าตัวเลขนัมเบอร์
- Pr ค่าพรีนดท์นัมเบอร์
- Re ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
- $Q_{vol,lock}$ ความร้อนที่ไหลเข้าผ่านผนังบ่อผลิตส่วน ในส่วนที่จมน้ำและไม่จมน้ำ (kJ)
- Q_{ice}^A ความร้อนของน้ำภายในชองน้ำแข็งแต่ละชอง ที่ไม่ได้ถูกยกออกไปจำหน่าย (kJ)
- ΔQ_{ice} ความร้อนของน้ำภายในชองน้ำแข็งแต่ละชอง ที่ถูกเติมน้ำเข้ามาใหม่ (kJ)
- Q_{ref} อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำน้ำแข็งของ (kJ)
- Δt การเปลี่ยนแปลงเวลา
- m_s มวลน้ำเกลือภายในบ่อผลิต (kg)
- C ความจุความร้อนจำเพาะ ($kJ / Kg^{\circ}C$)
- T_{o1} อุณหภูมิน้ำเกลือสภาวะเริ่มต้น ($^{\circ}C$)

T_{o2}	อุณหภูมิน้ำเกลือเมื่อเวลาผ่านไป Δt ($^{\circ}\text{C}$)
m_{water}	มวลน้ำเกลือภายในบ่อผลิต (kg)
$U_{water,1}$	พลังงานภายในของน้ำภายในของเมื่อเวลาเริ่มต้น (kJ/kg)
$U_{water,2}$	พลังงานภายในของน้ำภายในของเมื่อเวลาผ่านไป Δt (kJ/kg)
$\dot{Q}_{ht,leak}$	อัตราการความร้อนจากสิ่งแวดล้อมไหลผ่านฝาปิด (kW)
\dot{Q}_{ice}	อัตราการร้อนที่น้ำสูญเสียให้กับน้ำเกลือ (kW)
\dot{Q}_{ca}	อัตราการร้อนที่น้ำภายในของได้รับจากลมอัด (kW)
\dot{m}_{ca}	อัตราการไหลของลมอัด(kg/s)
$c_{p,ca}$	ความร้อนจำเพาะของลมอัด(kJ/kg K)
T_{ca}	อุณหภูมิของลมอัด($^{\circ}\text{C}$)

11. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายขจรศักดิ์ สีเมธ ที่ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำ อีกทั้งต้องขอขอบคุณสำนักงานเลขานุการส่งเสริมกิจการอุทยานวิทยาศาสตร์ (สอว.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภายใต้โครงการพัฒนาขีดความสามารถทางเทคโนโลยีและวิจัยของภาคเอกชนในพื้นที่ (IRTC) ที่ทำการสนับสนุนการวิจัยนี้

12.เอกสารอ้างอิง

- [1] อนก ทิพย์สุทธิ, จุลละพงษ์ จุลละโพธิ (2536).วิทยานิพนธ์เรื่องการวิเคราะห์พลังงานในโรงงานทำน้ำแข็งของ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [2] ASHRAE Handbook: Refrigeration (2006). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.,Atlanta, USA, pp. 34.1-34.7.
- [3] Richard C.Jordan, Gayle B. Pricster (1967). *Refrigeration and Air conditioning*. 2nd edition, Charles E. Tuttle company, Tokyo
- [4] M.Necati Ozisik (1985). *Heat transfer a basic approach*, international edition, ISBN: 0-07-Y664060-9, Mcgraw-hill book company, Singapore.
- [5] จิตดิน เตงเที่ยง (2548).การทำนายเชิงตัวเลขของอัตราการผลิตและการะความเย็นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประวัติผู้เขียน

นายรัฐกร มากหวาน เกิดเมื่อวันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดจันทบุรี สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา ในปีการศึกษา 2554 และศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ในปีการศึกษา 2558 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท ในหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2559 และในระหว่างศึกษาต่อได้เป็นผู้ช่วยวิจัยในโครงการการศึกษาวิจัย การระการทำความเข้าใจในการผลิตน้ำแข็งซองและการปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำแข็ง เพื่อการประหยัดพลังงานภายใต้การกำกับดูแลของโครงการพัฒนาขีดความสามารถทางเทคโนโลยี และวิจัยของภาคเอกชนในพื้นที่ (IRTC)

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำงานวิจัยร่วมกับคณาจารย์จนได้ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่อง ได้แก่ ผลงานทางวิชาการเรื่อง“การวิเคราะห์หาภาระการทำความเข้าใจสำหรับกระบวนการผลิต น้ำแข็งซอง” ในงานประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 (ENETT 13) ณ โรงแรมดิเอ็มเพลส จังหวัดเชียงใหม่ ในวันที่ 31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน 2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี