การลดพลังงานสำหรับระบบการผลิตน้ำแข็งหลอด

นางสาวปุณยาพร เผ่าพหล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

ENERGY REDUCTION FOR TUBE ICE PRODUCTION SYSTEM

Miss Punyaporn Paopahon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดพลังงานสำหรับระบบการผลิตน้ำแข็งหลอด
โดย	นางสาวปุณยาพร เผ่าพหล
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อิศราวิทย์ เชาว์พานิช)

ปุณยาพร เผ่าพหล : การลดพลังงานสำหรับระบบการผลิตน้ำแข็งหลอด. (ENERGY REDUCTION FOR TUBE ICE PRODUCTION SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร, 105 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราผลผลิตด้านพลังงาน และด้านเวลาการผลิต สำหรับระบบการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยการศึกษาสมดุลวัสดุของน้ำเข้าและน้ำออก วัดการใช้พลังงานไฟฟ้า ศึกษาปัจจัยควบคุมการผลิตได้แก่ เวลาทำน้ำแข็ง 33.50, 34.50, 34.75, 35.00 และ 35.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็ง 4.50, 5.00 และ 5.50 นาที สุ่มวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและนอกของน้ำแข็งหลอด

ผลการศึกษาพบว่า (1) มีน้ำเย็นทิ้งออกจากระบบจำนวน 401 ลิตร/รอบการผลิต จากการปรับระดับลูกลอยมีน้ำเย็นทิ้งลดลงเหลือ 96 ลิตร/รอบการผลิต ทำให้ประหยัดพลังงาน 2.87 kwh/รอบการผลิต คิดเป็นค่าใช้จ่าย 8.16 บาท/รอบการผลิต (2) เวลาทำน้ำแข็ง 34.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที มีผลให้น้ำแข็งหลอดมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเฉลี่ย 9.63 ± 0.14 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่โรงงานกำหนด 9.5 ± 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งพลังงานไฟฟ้าลดลงจากเดิม 100.25 เป็น 97.6 kwh/รอบการผลิต หรือประหยัดพลังงานได้ 2.65 kwh/รอบการผลิต (คิดเป็น 7.53 บาท/รอบการผลิต) อัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตเพิ่มขึ้นจาก 14.86 กิโลกรัม/kwh และ 37.84 กิโลกรัม/นาที เป็น 15.58 กิโลกรัม/kwh และ 38.99 กิโลกรัม/นาที ตามลำดับ ประหยัดค่าใช้จ่ายรวม 46.4 บาท/รอบการผลิต คิดเป็น 150,000 บาท/ปี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2555

5370288621 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : ENERGY PRODUCTIVITY / PROCESS TIME PRODUCTIVITY / ENERGY REDUCTION / TUBE ICE

PUNYAPORN PAOPAHON : ENERGY REDUCTION FOR TUBE ICE PRODUCTION SYSTEM. ADVISOR : ASST. PROF. SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D., 105 pp.

The purpose of this research was to improve on energy and process time productivity of tube ice production. Material balance of water in and out and electric power consumption in production process were measured. Ice making process control factors which were ice making time of 33.50, 34.50, 34.75, 35.00 and 35.50 minute and defrost time of 4.50, 5.00 and 5.50 minute were varied for affecting the size of tube ice product. The inside and outside diameters of tube ice were randomly measured.

The study found that (1) the material balance demonstrated that chilled water of 401 lilt/production cycle from production process was drained. Then the adjusting level of float ball within the equipment could reduce chilled water drain from 401 lilt/cycle to 96 lilt/cycle, and also give the energy decreased by 2.87 kwh/cycle, or saving of 8.16 bath/cycle, (2) Ice making time of 34.50 minute and defrost time of 4.50 minute could produce the tube ice inside diameter average of 9.63 ± 0.14 millimeter being in control with the specification of 9.5 ± 0.5 millimeter; the electric energy consumption was reduced from 100.25 to 97.6 kwh/cycle or saving of 2.65 kwh/cycle (7.53 bath/cycle); energy productivity and process time productivity were increased from 14.86 kg/kwh and 37.84 kg/minute to 15.58 kg/kwh and 38.99 kg/minute, respectively. The overall money-saving was 46.4 bath/cycle or 150,000 bath/year.

Department : Industrial Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Industrial Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012 .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผศ.ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ในการชี้แนะแง่มุมต่างๆ ทั้งให้ความช่วยเหลือ แนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น และช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ตลอดจนคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ กรรมการ ที่ได้ร่วมให้คำปรึกษา และแนวคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ โรงงานตัวอย่างที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนช่างผู้ชำนาญการทุกท่านที่ได้มอบความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ให้แก่ผู้วิจัยในระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน และรุ่นพี่ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ให้คำปรึกษา และแนวความคิดที่เอื้อต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ และคอยให้กำลังใจ ตลอดระยะเวลาการศึกษา

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้อง อันเป็นที่รักยิ่งของผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการดำเนินการวิจัยของผู้วิจัย ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขออุทิศแด่ท่านผู้ให้กำเนิด ครูอาจารย์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฏ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 5
1.4 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย 5
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน 6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8
2.1 เทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) 8
2.1.1 ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics System) 8
2.1.2 สมบัติของระบบ 10
2.1.3 สภาวะและสภาวะสมดุล 10
2.1.4 กระบวนการและวัฏจักร 11
2.1.5 ความดัน และอุณหภูมิ 13
2.2 กฎทางเทอร์โมไดนามิกส์ 13
2.2.1 กฎข้อที่ศูนย์ของเทอร์โมไดนามิกส์ 13
2.2.2 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ 14
2.2.3 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ 14
2.3 การถ่ายเทความร้อน 14
2.3.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) 15
2.3.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer) 15
2.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer) 16

2.4 แนวคิดด้านอัตราผลผลิต (Productivity) 17
2.5 กระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด 18
2.5.1 ระบบการทำความเย็น (Refrigeration system) 18
2.5.2 คอมเพรสเซอร์ (Compressor) 19
2.5.3 คอนเดนเซอร์ (Condenser) 19
2.5.4 หอทำความเย็น (Cooling tower) 20
2.5.5 ถังเก็บแอมโมเนีย (Receiver) 20
2.5.6 ชุดทำน้ำแข็งหลอด 20
2.5.7 ถังเก็บไอสะสม (Accumulator) 20
2.5.8 ชุดควบคุมเวลาในการทำงาน 21
2.6 ขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งหลอด 22
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 23
บทที่ 3 การสำรวจสภาพปัญหาปัจจุบันของโรงงานตัวอย่าง 26
3.1 การสำรวจด้านการสูญเสีย 27
3.2 การสำรวจด้านการผลิต 27
3.3 การสำรวจค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้อง 28
3.3.1 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 28
3.3.2 ค่าใช้จ่ายของน้ำ 28
3.4 สรุปข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง 30
บทที่ 4 วิธีการดำเนินงานวิจัย 32
4.1 มาตรการที่ 1 : การค้นหาแนวทางในการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ 32
4.1.1 การวิเคราะห์หาสาเหตุของการสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง 32
4.1.2 การหาแนวทางนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ 32
4.1.3 การปรับปรุงความสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง 32
4.1.4 คำนวณค่าใช้จ่าย 33
4.2 มาตรการที่ 2 : การศึกษาปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น 33
4.2.1 การกำหนดขนาดน้ำแข็งหลอดที่ต้องการ 33
4.2.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลต่อขนาดน้ำแข็งหลอด 33
4.2.3 การกำหนดระดับของปัจจัย 34
4.2.4 การออกแบบการทดลอง 34

4.2.5 การทดลอง 34
4.2.6 การเปรียบเทียบภายหลังการศึกษา 35
4.2.7 คำนวณค่าใช้จ่าย 36
4.3 การประเมินผลประหยัด 36
บทที่ 5 ผลการดำเนินงานวิจัย 37
5.1 มาตรการที่ 1 : ผลการค้นหาแนวทางในการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ 37
5.1.1 ผลวิเคราะห์หาสาเหตุของการสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง 37
5.1.2 ผลการหาแนวทางนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ 38
5.1.3 ผลการปรับปรุงความสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง 42
5.1.4 คำนวณค่าใช้จ่าย 47
5.2 มาตรการที่ 2 : ผลการศึกษาปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น 49
5.2.1 ผลการกำหนดขนาดน้ำแข็งหลอดที่ต้องการ 49
5.2.2 ผลการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อขนาดน้ำแข็งหลอด 51
5.2.3 ผลการกำหนดระดับของปัจจัย 53
5.2.4 ผลการออกแบบการทดลอง 54
5.2.5 ผลการทดลอง 57
5.2.6 ผลการเปรียบเทียบภายหลังการศึกษา 65
5.2.7 คำนวณค่าใช้จ่าย 68
5.3 การประเมินผลประหยัด 68
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 70
6.1 สรุปผลการวิจัย 70
6.2 ข้อเสนอแนะ 71
รายการอ้างอิง 73
ภาคผนวก 74
ภาคผนวก ก. 75
ภาคผนวก ข. 77
ภาคผนวก ค. 80
ภาคผนวก ง. 83
ภาคผนวก จ. 92
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 105

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 สถิติจำนวนโรงงานน้ำแข็งที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ 1
ตารางที่ 3.1 การปรับตั้งเวลาการผลิตในปัจจุบัน 27
ตารางที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแนวทางต่างๆ 44
ตารางที่ 5.2 ผลการประเมินค่าใช้จ่ายในการลงทุนของแนวทางต่างๆ 45
ตารางที่ 5.3 ผลการเลือกแนวทางในการปรับปรุงลดความสูญเสียของน้ำเย็นทิ้ง 47
ตารางที่ 5.4 ผลภายหลังการปรับปรุงในมาตรการที่ 1 49
ตารางที่ 5.5 เส้นผ่าศูนย์กลางภายในและนอกที่กำหนดโดยลูกค้า และโรงงาน 50
ตารางที่ 5.6 ผลการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อขนาดน้ำแข็งหลอด 52
ตารางที่ 5.7 ผลการกำหนดระดับของปัจจัย 54
ตารางที่ 5.8 ตารางการออกแบบการทดลอง 55
ตารางที่ 5.9 ผล One-way ANOVA ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายในกับเวลาละลายน้ำแข็ง 59
ตารางที่ 5.10 ผล One-way ANOVA ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกกับเวลาทำน้ำแข็ง 60
ตารางที่ 5.11 ผลวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง 61
ตารางที่ 5.12 ผลของเวลาการผลิตน้ำแข็งหลอดที่เหมาะสม 64
ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบผลของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในหลังการศึกษา 64
ตารางที่ 5.14 ผลการเพิ่มขึ้นของอัตราผลผลิตด้านพลังงาน และเวลาภายหลังการศึกษา 67
ตารางที่ 5.15 ผลประหยัดรวมภายหลังการศึกษา 69
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการผลิตในปัจจุบัน 76
ตารางที่ ข.1 การหาจำนวนการทดลองซ้ำที่เหมาะสมของการทดลอง 78
ตารางที่ ข.2 ผลการหาจำนวนการทดลองซ้ำที่เหมาะสมของการทดลอง 79
ตารางที่ ง.1 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่ 84
ตารางที่ ง.2 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่ 85
ตารางที่ ง.3 ข้อมูลพลังงาน ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่ 86
ตารางที่ ง.4 ข้อมูลปริมาณน้ำแข็ง ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่ 87
ตารางที่ ง.5 ข้อมูลปริมาณน้ำเข้า ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่ 88
ตารางที่ ง.6 ข้อมูลน้ำเย็นทิ้ง ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่ 89
ตารางที่ ง.7 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านพลังงาน ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่ 90

หน้า

ตารางที่ ง.8 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านเวลา ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่.....91
ตารางที่ จ.1 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ 93
ตารางที่ จ.2 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ ..93
ตารางที่ จ.3 ข้อมูลพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ.....94
ตารางที่ จ.4 ข้อมูลปริมาณน้ำแข็งที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ.....94
ตารางที่ จ.5 ข้อมูลปริมาณน้ำเข้าที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ 95
ตารางที่ จ.6 ข้อมูลน้ำเย็นทิ้งที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ 95
ตารางที่ จ.7 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ .96
ตารางที่ จ.8 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านเวลาที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ.....96
ตารางที่ จ.9 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ 97
ตารางที่ จ.10 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ ...97
ตารางที่ จ.11 ข้อมูลพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ.....98
ตารางที่ จ.12 ข้อมูลปริมาณน้ำแข็งที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ 98
ตารางที่ จ.13 ข้อมูลปริมาณน้ำเข้าที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ.....99
ตารางที่ จ.14 ข้อมูลน้ำเย็นทิ้งที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ 99
ตารางที่ จ.15 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ 100
ตารางที่ จ.16 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านเวลาที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ.....100
ตารางที่ จ.17 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ .101
ตารางที่ จ.18 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ 101
ตารางที่ จ.19 ข้อมูลพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ.....102
ตารางที่ จ.20 ข้อมูลปริมาณน้ำแข็งที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ 102
ตารางที่ จ.21 ข้อมูลปริมาณน้ำเข้าที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ.....103
ตารางที่ จ.22 ข้อมูลน้ำเย็นทิ้งที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ 103
ตารางที่ จ.23 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ 104
ตารางที่ จ.24 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านเวลาที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ....104

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 สถิติจำนวนโรงงานน้ำแข็งที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ ปีพ.ศ. 2554-2556.....3
รูปที่ 1.2 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย.....6
รูปที่ 2.1 ขอบเขตของระบบ.....9
รูปที่ 2.2 รูปแบบของระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์.....9
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงลักษณะของกระบวนการ.....11
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงลักษณะของวัฏจักร.....12
รูปที่ 2.5 การแผ่รังสีความร้อนระหว่างวัสดุกับผื้นผิวขนาดใหญ่ที่ครอบคลุมวัตถุ.....17
รูปที่ 2.6 วัฏจักรการทำความเย็น.....19
รูปที่ 3.1 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอด.....26
รูปที่ 3.2 ระบบการกรองน้ำอาร์โอ.....29
รูปที่ 5.1 การผลิตในปัจจุบัน.....38
รูปที่ 5.2 แนวทางที่ 1 : การนำน้ำเย็นทิ้งผสมกับน้ำแทงค์.....39
รูปที่ 5.3 แนวทางที่ 2 : การใช้น้ำเย็นทิ้งเป็นน้ำหล่อเย็น.....40
รูปที่ 5.4 แนวทางที่ 3 : การปรับระดับลูกลอย.....41
รูปที่ 5.5 แนวทางที่ 4 : การเพิ่มตะแกรงกรอง.....42
รูปที่ 5.6 เวลาในการผลิตน้ำแข็งทั้งหมดกับเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน.....53
รูปที่ 5.7 เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน.....57
รูปที่ 5.8 เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก.....58
รูปที่ 5.9 เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำแข็ง.....58
รูปที่ 5.10 เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อพลังงาน.....59
รูปที่ 5.11 อันตรกิริยาระหว่างเวลาทำน้ำแข็งกับเวลาละลายน้ำแข็งต่อตัวแปรตอบสนองต่างๆ.....62
รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบผลเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งก่อนการศึกษา และหลังการศึกษา.....65
รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบผลเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกน้ำแข็งก่อนการศึกษา และหลังการศึกษา.....65
รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบผลอัตราผลผลิตด้านพลังงานก่อนการศึกษา - หลังการศึกษา.....66
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบผลอัตราผลผลิตด้านเวลาก่อนการศึกษา - หลังการศึกษา.....66
รูปที่ ข.1 OC Curve เมื่อ $V_1 = 5$.....79
รูปที่ ค.1 การทดสอบ Normality test ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน.....81

หน้า

รูปที่ ค.2 การทดสอบ Normality test ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก.....82

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันจำนวนโรงงานน้ำแข็งในประเทศไทยมีทั้งหมด 529 โรง (ณ เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556) และมีจำนวนเพิ่มขึ้นทุกเดือน เฉลี่ยเดือนละ 5 โรง โดยพิจารณาได้จากข้อมูลสถิติจำนวนโรงงานน้ำแข็งที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ ตั้งแต่มกราคม พ.ศ. 2554 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556 (ข้อมูลจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ณ วันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2556 เวปไซต์ : http://www.diw.go.th/hawk/content.php?mode=data1search) แสดงดังตารางที่ 1.1

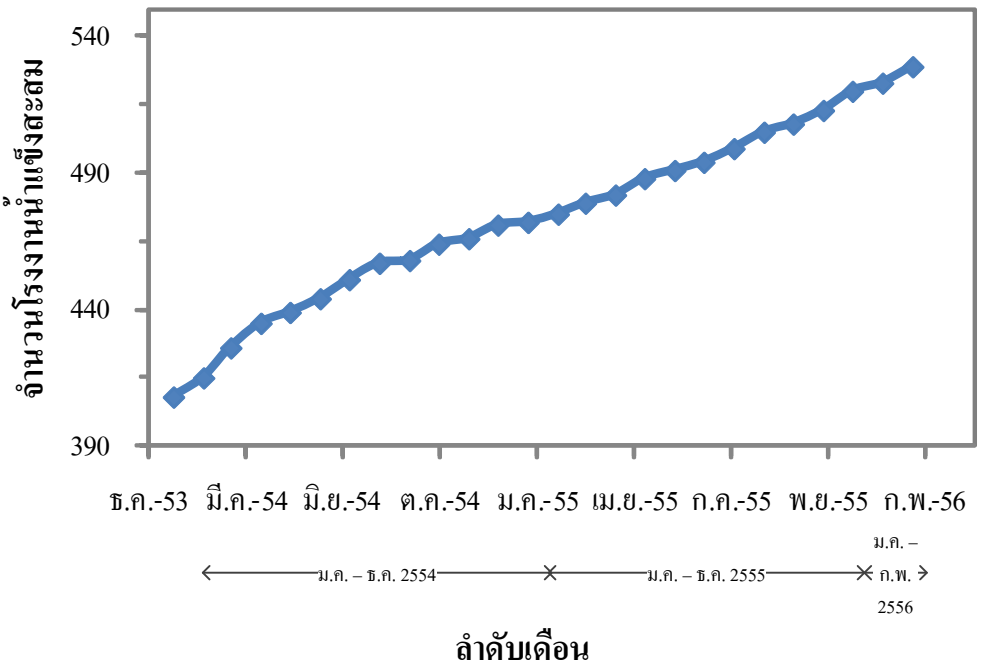
ตารางที่ 1.1 สถิติจำนวนโรงงานน้ำแข็งที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ

ปี	เดือน	จำนวนโรงงานน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นแต่ละเดือน	จำนวนโรงงานน้ำแข็งสะสม
2553	ก่อน	398	398
2554	มกราคม	10	408
	กุมภาพันธ์	7	415
	มีนาคม	11	426
	เมษายน	9	435
	พฤษภาคม	4	439
	มิถุนายน	5	444
	กรกฎาคม	7	451
	สิงหาคม	6	457
	กันยายน	1	458
	ตุลาคม	6	464
	พฤศจิกายน	2	466
	ธันวาคม	5	471

ตารางที่ 1.1 สถิติจำนวนโรงงานน้ำแข็งที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ (ต่อ)

ปี	เดือน	จำนวนโรงงานน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นแต่ละเดือน	จำนวนโรงงานน้ำแข็งสะสม
2555	มกราคม	1	472
	กุมภาพันธ์	3	475
	มีนาคม	4	479
	เมษายน	3	482
	พฤษภาคม	6	488
	มิถุนายน	3	491
	กรกฎาคม	3	494
	สิงหาคม	5	499
	กันยายน	6	505
	ตุลาคม	3	508
	พฤศจิกายน	5	513
	ธันวาคม	7	520
2556	มกราคม	3	523
	กุมภาพันธ์	6	529
ค่าเฉลี่ยจำนวนโรงงานที่เพิ่มขึ้น		5.0	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		2.54	

จากข้อมูลในตารางที่ 1.1 สามารถนำมาสร้างกราฟ เพื่อแสดงให้เห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่มกราคม พ.ศ. 2554 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556 ของจำนวนโรงงานน้ำแข็งภายในประเทศไทยที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 สถิติจำนวนโรงงานน้ำแข็งที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ ปีพ.ศ. 2554-2556

จากข้อมูลสถิติจำนวนโรงงานน้ำแข็งที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการตั้งแต่มกราคม พ.ศ. 2554 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556 ข้างต้นแสดงได้ถึง การมีจำนวนผู้ลงทุนในอุตสาหกรรมน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการบริโภคน้ำแข็งภายในประเทศที่มีอัตราเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากในปัจจุบันจำนวนประชากรในประเทศมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะฉะนั้นจึงส่งผลให้อุตสาหกรรมน้ำแข็งมีการขยายตัวขึ้นเป็นอย่างมาก และมีผู้ลงทุนในอุตสาหกรรมน้ำแข็งรายใหม่อยู่เสมอ เป็นเหตุให้อุตสาหกรรมการผลิตน้ำแข็งมีภาวะการแข่งขันอย่างรุนแรง ดังนั้นการสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันจึงเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินธุรกิจ ทั้งนี้การสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันนั้น ครอบคลุมตั้งแต่การลดความสูญเสีย การลดต้นทุน ไปจนถึงการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า ซึ่งโรงงานน้ำแข็งที่เข้าทำการวิจัยนี้ มีการสูญเสียเกิดขึ้นคือ มีน้ำเย็นทิ้งเกิดขึ้นในทุกรอบการผลิต จึงเป็นการสูญเสียปริมาณน้ำ และพลังงาน อีกทั้งในปัจจุบันโรงงานไม่มีการคำนึงถึงความเหมาะสมของขนาดน้ำแข็งหลอด จึงอาจส่งผลกระทบต่อต้นทุน ความน่าเชื่อถือ และการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้ ดังนั้นหากสามารถแก้ปัญหาข้างต้นได้จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันแก่โรงงานได้เป็นอย่างดี

โรงงานผลิตน้ำแข็งหลอดตัวอย่างสำหรับกรณีศึกษานี้เป็นโรงงานที่มีการดำเนินงาน การควบคุมกระบวนการผลิต และคุณภาพ ที่ทำตามกันมาเป็นเวลานานหลายปี จากการเข้าสำรวจโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอดตัวอย่าง พบว่า การผลิตน้ำแข็งหลอดของโรงงานตัวอย่างในปัจจุบันมี

เวลาที่ใช้ในกระบวนการทำน้ำแข็งหลอดทั้งหมด 40.50 นาที/รอบการผลิต จำแนกเป็นเวลาทำน้ำแข็ง 35.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็งให้หลุดออกจากท่อทำน้ำแข็ง 5.00 นาที จากสภาวะการผลิตในปัจจุบันส่งผลให้ได้น้ำแข็งที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 8.65 ± 0.13 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 35.57 มิลลิเมตร ซึ่งปัจจุบันทางโรงงานไม่เคยคำนึงถึงเกณฑ์หรือขนาดน้ำแข็งหลอดขั้นต่ำที่ลูกค้าต้องการ และไม่ได้ผลิตตามเกณฑ์ของโรงงานที่กำหนดขึ้น คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็ง 9.5 ± 0.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งมากกว่าเท่ากับ 35 มิลลิเมตร ทั้งนี้จากการสัมภาษณ์ลูกค้าถึงขนาดน้ำแข็งหลอดที่ยอมรับได้ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดขนาดน้ำแข็งหลอดของลูกค้า พบว่า มีความต้องการดังนี้ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็ง 9.25 - 10.25 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งมากกว่าเท่ากับ 35 มิลลิเมตร จึงจะเห็นว่าปัจจุบันโรงงานมีปัญหาทางด้านขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งที่ผลิตได้ไม่ตรงต่อความต้องการของลูกค้า และมีค่าต่ำกว่าที่โรงงานกำหนด ส่งผลให้โรงงานขาดผลกำไรบางส่วนไป อีกทั้งกระบวนการผลิตในปัจจุบันยังมีน้ำเย็นปล่อยทิ้งจำนวน 401 ลิตร/รอบการผลิต โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ย 1.76 องศาเซลเซียส จึงมีปัญหาน้ำเย็นทิ้งเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต จากปัญหาทั้งสองข้างต้นจึงถือเป็นการสูญเสียทั้งในแง่ของสินค้าไม่ได้คุณภาพ ปริมาณน้ำ และพลังงาน งานวิจัยนี้จึงลดการสูญเสียที่เกิดขึ้น จากการหาแนวทางนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ และทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่มีต่อขนาดของน้ำแข็งหลอดที่ต้องการ เพื่อปรับปรุงอัตราผลผลิตด้านพลังงานและเวลาการผลิตของการผลิตน้ำแข็งหลอด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการลดพลังงานสำหรับระบบการผลิตน้ำแข็งหลอด ซึ่งจากปัญหาที่เกิดขึ้นภายในโรงงานตัวอย่าง จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการวิจัยเป็นดังนี้

1. เพื่อลดการสูญเสียน้ำเย็นทิ้งออกจากระบบการผลิตน้ำแข็งหลอด
2. เพื่อเพิ่มอัตราผลผลิตด้านพลังงานและอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตของการผลิตน้ำแข็งหลอด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสภาพปัญหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งแก้ไขปัญหาการสูญเสียน้ำเย็นทิ้งที่เกิดขึ้น และปรับปรุงอัตราผลผลิตด้านพลังงานและอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตของการผลิตน้ำแข็งหลอด ซึ่งมีเงื่อนไขในการพิจารณาเบื้องต้นดังนี้

1. ศึกษากระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด
2. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอดที่โรงงานกำหนดคือ 9.5 ± 0.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งหลอดมากกว่าเท่ากับ 35 มิลลิเมตร
3. คุณภาพของน้ำแข็งที่โรงงานกำหนดคือ ใส และไม่ขุ่น
4. ปัจจัยควบคุมที่กำหนดให้คงที่คือ เวลาเปิดปิดพัดลมคูลลิ่งที่ 19 นาที, เวลาตัดน้ำแข็งที่ 5 นาที และเวลาจ่ายแอมโมเนียที่ 5 วินาที หยุดจ่ายแอมโมเนีย 20 วินาที (หรือจ่ายแอมโมเนียเป็นเวลา 5 วินาที ในทุก 20 วินาที จนกระทั่งครบเวลาผลิตน้ำแข็งทั้งหมด) โดยปัจจัยควบคุมที่กำหนดให้คงที่จะเป็นระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ
5. ตัวแปรตอบสนองคือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็ง, เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็ง, ปริมาณน้ำแข็ง, การใช้พลังงานในแต่ละรอบการผลิต, อัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต
6. ในการทดลองช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิต คือ ช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 12.00 น.
7. การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าจะไม่นำค่า Ft, ค่า demand และ %vat มาคำนวณ แต่จะใช้เพียงแค่ค่าไฟฟ้าฐานในการคำนวณเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยปัญหาที่เกิดขึ้นภายในโรงงานตัวอย่างครั้งนี้ ส่งผลให้ได้ประโยชน์จากการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. สามารถลดการสูญเสียน้ำเย็นทิ้งที่เกิดขึ้น
2. ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยควบคุมที่มีต่อขนาดน้ำแข็งหลอด และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับตั้งเครื่องทำน้ำแข็งหลอดได้
3. สามารถปรับปรุงอัตราผลผลิตด้านพลังงานและเวลาการผลิตของการผลิตน้ำแข็งหลอด

4. สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิต

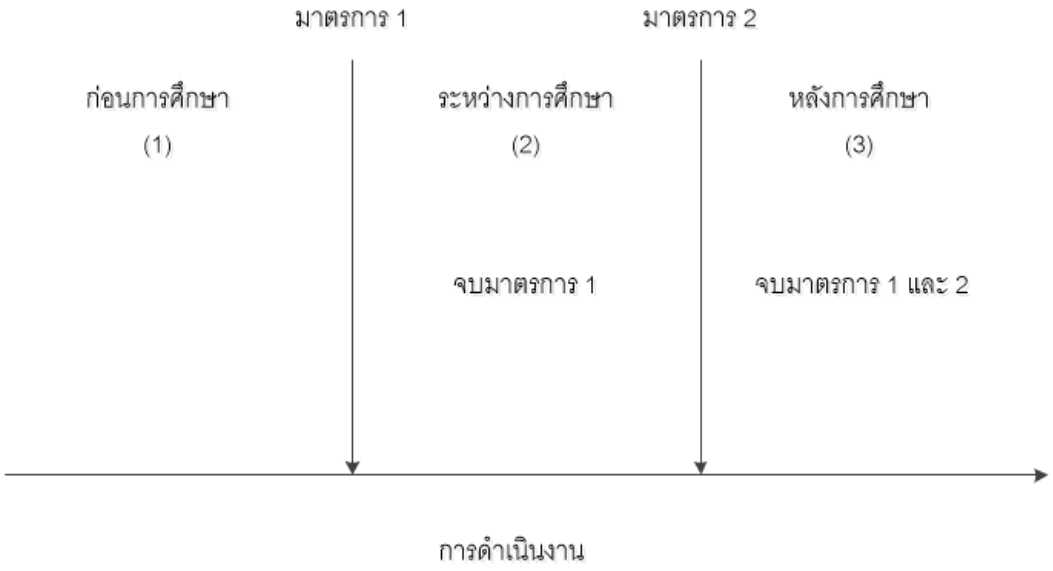
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

จากปัญหาที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ปัญหา คือปัญหาความสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง และปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น ในการดำเนินงานวิจัยนี้จึงแบ่งเป็น 2 มาตรการ โดยกำหนดให้

มาตรการ 1 คือ ปัญหาความสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง

มาตรการ 2 คือ ปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เริ่มดำเนินการวิจัยจากการลดความสูญเสียของน้ำเย็นทิ้งก่อน จากนั้นภายหลังการปรับปรุงลดความสูญเสียของน้ำเย็นทิ้ง จึงทำการแก้ปัญหาด้านขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น โดยศึกษาอิทธิพลของเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็ง เพื่อปรับปรุงอัตราผลผลิตด้านพลังงานและเวลาการผลิตของการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยแผนภาพการดำเนินงานวิจัยเป็นดังนี้



รูปที่ 1.2 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

ทั้งนี้ในการดำเนินงานวิจัยจะมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยเป็นดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษากระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดภายในโรงน้ำแข็ง และเก็บรวบรวมข้อมูล
3. วิเคราะห์หาสาเหตุของการสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง
4. ศึกษาแนวทางการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้

5. ปรับปรุงความสูญเสียของน้ำเย็นทิ้ง
6. กำหนดขนาดน้ำแข็งหลอดที่ต้องการ
7. ศึกษาปัจจัยควบคุมการผลิตน้ำแข็งหลอด
8. ทำการทดลองปัจจัยควบคุม ได้แก่ เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็ง
9. วิเคราะห์ และสรุปผล
10. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นแนวทางสำคัญทางหนึ่งที่ทำให้เราสามารถนำแนวความคิด, หลักการ และแนวทางนั้นมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการลดพลังงานสำหรับระบบการผลิตน้ำแข็งหลอด จึงมุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ การแลกเปลี่ยนความร้อน และอัตราผลผลิต เพื่อนำความรู้ที่ได้จากการศึกษามาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยต่อไป

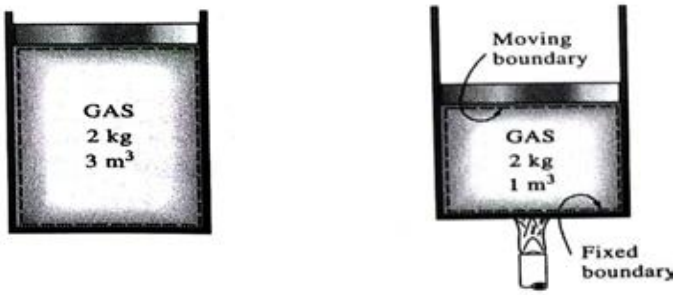
2.1 เทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics)

เทอร์โมไดนามิกส์ (เซนเกล, ยูนัส เอ., 2544) เป็นศาสตร์ที่เกี่ยวกับพลังงาน โดยครอบคลุมไปถึงพลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น การเปลี่ยนรูปของพลังงาน การถ่ายโอนพลังงาน รวมทั้งสมบัติต่างๆของสสารที่ใช้เป็นตัวกลางในการเปลี่ยนแปลงนั้นๆ ซึ่งพลังงานคือความสามารถในการทำงานได้ โดยพลังงานสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง และยังสามารถถ่ายโอนจากบริเวณหนึ่งไปสู่อีกบริเวณหนึ่งได้ ในการเปลี่ยนรูปหรือการถ่ายโอนพลังงานจะเป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงาน (Conservation energy principle) กล่าวคือพลังงานทั้งหมดจะมีค่าคงที่ เนื่องจากพลังงานไม่สามารถถูกทำลายไปหรือถูกสร้างขึ้นมาได้

ซึ่งในการประยุกต์ใช้งานของเทอร์โมไดนามิกส์นั้น สามารถใช้ทฤษฎีในการวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์ต่างๆได้หลากหลาย เช่น เครื่องทำความเย็น, ระบบรถยนต์, เครื่องบิน, ตู้เย็น และโรงไฟฟ้า เป็นต้น

2.1.1 ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics System)

ในการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์จะต้องมีการกำหนด บริเวณหรือสารปริมาณหนึ่งที่ต้องการศึกษาขึ้นมา โดยบริเวณหรือสสารดังกล่าวเรียกว่า ระบบ (System) ส่วนสิ่งที่อยู่ภายนอกระบบทั้งหมดเรียกว่า สิ่งแวดล้อม (Surrounding) โดยมีขอบเขตของระบบ (Boundary) เป็นตัวแบ่งแยกระบบออกจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งขอบเขตของระบบอาจจะมีอยู่จริงหรือเป็นเพียงแค่ขอบเขตที่สมมติขึ้น โดบขอบเขตของระบบมี 2 แบบคือ ขอบเขตอยู่กับที่ (Fixed boundary) และขอบเขตที่เคลื่อนที่ได้ (Moving boundary) ดังแสดงรูปที่ 2.1



(ก) ขอบเขตอยู่กับที่ (ข) ขอบเขตที่เคลื่อนที่ได้

รูปที่ 2.1 ขอบเขตของระบบ

ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

1. ระบบปิด (Closed system)

คือระบบที่ไม่มีการถ่ายเทมวล แต่ยอมให้มีการถ่ายเทพลังงานผ่านขอบเขตของระบบเท่านั้น

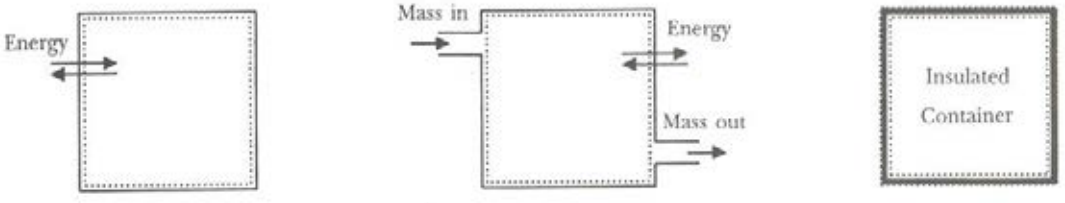
2. ระบบเปิด (Open system)

คือระบบที่มีการถ่ายเทมวล และพลังงานผ่านขอบเขตของระบบ

3. ระบบโดดเดี่ยว (Isolated system)

คือระบบที่ถูกแยกออกจากสิ่งแวดล้อมโดยสิ้นเชิง กล่าวคือไม่มีการถ่ายเทมวลและพลังงานผ่านขอบเขตของระบบ จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เกิดขึ้น

รูปแบบของระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



(ก) ระบบปิด (ข) ระบบเปิด (ค) ระบบโดดเดี่ยว

รูปที่ 2.2 รูปแบบของระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์

2.1.2 สมบัติของระบบ

สมบัติคือ ลักษณะใดๆที่สามารถทำการวัดหรือคำนวณค่าได้ โดยสมบัติจะขึ้นกับสภาวะของระบบ ในทางเทอร์โมไดนามิกส์สมบัติของระบบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

1. สมบัติที่ไม่ขึ้นกับมวลของระบบ (Intensive properties) เช่น อุณหภูมิ, ความดัน และความหนาแน่น
2. สมบัติที่ขึ้นกับมวลของระบบ (Extensive properties) เช่น ปริมาตร, น้ำหนัก, พลังงานภายใน และพลังงานภายรวม เป็นต้น

การระบุสมบัติระบบสามารถทำการตรวจสอบได้คือ ทำการแบ่งระบบเพื่อให้มวลเปลี่ยนแปลง หากสมบัติแต่ละส่วนมีค่าเท่าเดิมจึงจะถือเป็นสมบัติที่ไม่ขึ้นกับมวลของระบบ แต่หากสมบัติแต่ละส่วนเปลี่ยนแปลงไปจึงจะถือว่าเป็นสมบัติที่ขึ้นกับมวลของระบบนั่นเอง

2.1.3 สภาวะและสภาวะสมดุล

สภาวะ (State) คือสภาพของระบบที่ถูกกำหนดโดยชุดของสมบัติ (set of properties) ของระบบ ดังเช่นอุณหภูมิ, ความดัน และพลังงาน เป็นต้น โดยที่สภาวะหนึ่งๆ สมบัติของระบบจะมีค่าคงที่ หากมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งจึงจะถือว่าระบบมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะไปสู่สภาวะใหม่ทันที ทั้งนี้สภาวะของระบบสามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1. **สภาวะคงตัว (Steady-state system)** คือ สภาวะของระบบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการใดๆ นั่นคือ

$$\text{Material in} = \text{Material out}$$

โดยที่สารที่เข้าและออกจะไม่เปลี่ยนเมื่อเวลาผ่านไป และ อุณหภูมิ, ความดัน, อัตราการไหล ฯลฯ คงที่ เมื่อเวลาผ่านไป

2. **สภาวะไม่คงตัว (Unsteady-state system)** คือ สภาวะของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการใดๆ นั่นคือ

$$\text{Material in} \neq \text{Material out}$$

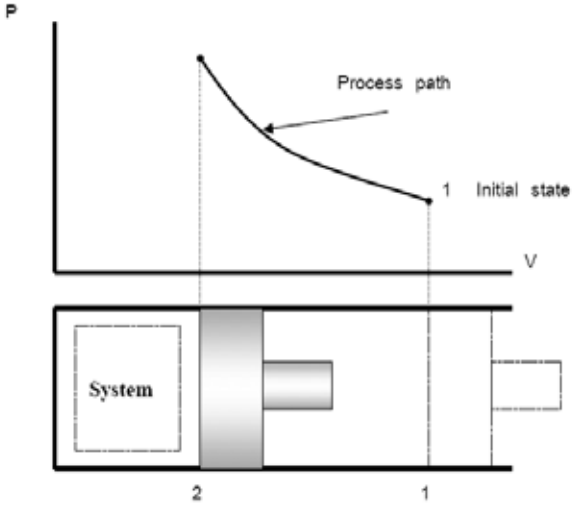
ทั้งนี้ สารที่เข้าและออกจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป และ อุณหภูมิ, ความดัน, อัตราการไหล ฯลฯ ไม่คงที่ เมื่อเวลาผ่านไป

สภาวะสมดุล (Equilibrium state) คือสภาวะที่ไม่มีแรงผลักดันที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆทั้งสิ้นเกิดขึ้นภายในระบบ ระบบที่อยู่ในสภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของสมดุลทั้ง 4 แบบดังต่อไปนี้

1. สมดุลทางความร้อน (Thermal equilibrium) คือสภาวะที่ภายในระบบมีอุณหภูมิเท่ากันทั่วทั้งระบบ
2. สมดุลทางกล (Mechanical equilibrium) คือสภาวะที่ภายในระบบมีความดันเท่ากันทั่วทั้งระบบและไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดันเกิดขึ้น
3. สมดุลทางเคมี (Chemical equilibrium) คือสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี
4. สมดุลเฟส (Phase equilibrium) สมดุลนี้จะใช้พิจารณาในระบบที่มีมากกว่าหนึ่งเฟส โดยสมดุลเฟส คือสภาวะที่ไม่มีแรงผลักดันที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างเฟส จึงทำให้สมบัติในแต่ละเฟสมีค่าคงที่

2.1.4 กระบวนการและวัฏจักร

กระบวนการ (Processes) คือการเปลี่ยนแปลงสภาวะของระบบจากสภาวะหนึ่งไปเป็นอีกสภาวะหนึ่ง ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของระบบอย่างน้อย 1 อย่างขึ้นไป จึงจะถือว่ามีการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเกิดขึ้น สำหรับเส้นทางในการแสดงสภาวะอย่างต่อเนื่องในระหว่างที่มีการเกิดกระบวนการ จะเรียกว่า เส้นทางของกระบวนการ (Process path) โดยจากรูปที่ 2.3 P คือ ความดัน (Pressure) และ V คือ ปริมาตร (Volume) จากรูปแสดงเส้นทางของกระบวนการได้ดังนี้

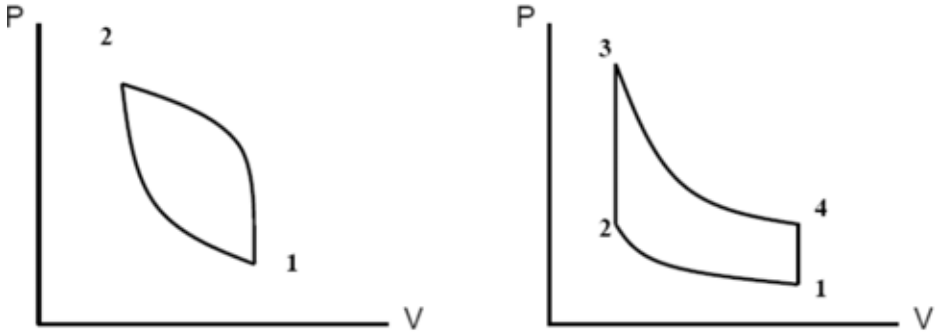


รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงลักษณะของกระบวนการ

ในกระบวนการหากมีการดำเนินกระบวนการอย่างรวดเร็ว จะทำให้สภาวะแต่ละส่วนภายในระบบไม่เหมือนกัน จึงไม่สามารถวัดสมบัติที่แน่นอนของสภาวะต่างๆในขณะที่ระบบดำเนินกระบวนการได้ จึงไม่สามารถระบุเส้นทางของกระบวนการได้ โดยกำหนดได้เพียงสภาวะเริ่มต้น (Initial state) และ สภาวะสุดท้าย (Final state) เท่านั้น กระบวนการลักษณะนี้จะเรียกว่ากระบวนการไม่สมดุลควอไซ (Non-quasi-equilibrium process) ในทางตรงกันข้ามหากมีการดำเนินกระบวนการอย่างช้าๆ ระบบจึงมีการเปลี่ยนแปลงทีละน้อย ทำให้สมบัติภายในระบบเหมือนกันทั่วทั้งระบบ จึงสามารถวัดสมบัติที่สภาวะต่างๆในขณะที่ระบบดำเนินกระบวนการได้ ส่งผลให้สามารถระบุเส้นทางของกระบวนการได้ ซึ่งกระบวนการลักษณะนี้เรียกว่า กระบวนการสมดุลควอไซ (Quasi-equilibrium process) โดยสภาวะที่ระบบดำเนินผ่านในกระบวนการสมดุลควอไซจะถือว่าเป็นสภาวะสมดุล ทั้งนี้กระบวนการสมดุลควอไซเป็นเพียงกระบวนการในทางอุดมคติ (Ideal process) ที่กำหนดขึ้นในทางทฤษฎีเท่านั้น โดยทั่วไปพบว่ามีหลายๆกระบวนการที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกระบวนการสมดุลควอไซ ดังนั้นจึงสามารถกำหนดให้กระบวนการเหล่านั้นเป็นกระบวนการสมดุลควอไซ โดยมีข้อผิดพลาดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งกระบวนการต่างๆแสดงได้ดังนี้

1. Adiabatic Process: กระบวนการที่สารในระบบไม่มีการถ่ายเทความร้อน
2. Isothermal Process: กระบวนการที่สารในระบบมีอุณหภูมิคงที่ตลอดกระบวนการ
3. Isobaric Process: กระบวนการที่สารในระบบมีความดันคงที่ตลอดกระบวนการ
4. Isometric Process: กระบวนการที่สารในระบบมีปริมาตรคงที่ตลอดกระบวนการ
5. Isentropic Process: กระบวนการที่สารในระบบมีเอนโทรปีคงที่ตลอดกระบวนการ

วัฏจักร (Cycles) หมายถึงการเกิดกระบวนการจากสภาวะเริ่มต้นโดยระบบดำเนินการผ่านสภาวะต่างๆ แล้วสามารถกลับสู่สภาวะเริ่มต้นได้อีก เมื่อระบบกลับเข้าสู่สภาวะเริ่มต้นแล้วนั้นสมบัติของระบบจะมีสมบัติเหมือนกับสภาวะเริ่มต้นเดิมทุกประการ จากรูปที่ 2.4 P คือ ความดัน (Pressure) และ V คือ ปริมาตร (Volume) โดยลักษณะของวัฏจักรแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงลักษณะของวัฏจักร

2.1.5 ความดัน และอุณหภูมิ

ความดัน (Pressure) หมายถึง แรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยของพื้นที่ สำหรับของไหลที่อยู่นิ่งหรือของไหลสถิต (Static fluid) จะมีความดันเท่ากันในทุกทิศทาง ความดันในของไหลจะเพิ่มขึ้นตามความลึก เนื่องจากผลของน้ำหนักของของไหล นั่นคือของไหลที่อยู่ด้านล่างจะได้รับน้ำหนักมากกว่าชั้นที่ถัดขึ้นมาโดยสามารถแสดงให้เห็นผลของความลึกต่อความดันของของไหล ส่วนกรณีของไหลที่เป็นแก๊ส สามารถถือได้ว่าความดันจะเท่ากันในทุกระดับความลึก เนื่องจากแก๊สมีน้ำหนักน้อยทำให้มีผลต่อความแตกต่างของความดันที่ระดับความลึกต่างๆน้อยเช่นกัน

อุณหภูมิ (Temperature) เป็นสมบัติที่ใช้ในการบอกความร้อน และความเย็นของวัตถุ ซึ่งจากปรากฏการณ์สมบัติของสสารหลายอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยมีทิศทางและขนาดของการเปลี่ยนแปลงที่แน่นอน จึงถูกนำมาใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการวัดอุณหภูมิที่มีความแม่นยำ โดยวิธีที่นิยมคือ การวัดจากการขยายและการหดตัวของปรอทที่บรรจุอยู่ในหลอดแก้ว หรือก็คือเทอร์โมมิเตอร์นั่นเอง จากปรากฏการณ์โดยทั่วไปที่เกิดขึ้น พบว่าเมื่อวัตถุที่มีอุณหภูมิต่างกันมาสัมผัสกันจะส่งผลทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จนกระทั่งอุณหภูมิทั้งสองเท่ากันหรือก็คือวัตถุทั้งสองอยู่ในสมดุลความร้อน ที่สภาวะดังกล่าวการถ่ายโอนความร้อนจะสิ้นสุดลง

2.2 กฎทางเทอร์โมไดนามิกส์

2.2.1 กฎข้อที่ศูนย์ของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อที่ศูนย์ของเทอร์โมไดนามิกส์ (The zeroth law of thermodynamics) กล่าวไว้ว่าเมื่อวัตถุสองชิ้นอยู่ในสมดุลกับวัตถุชิ้นที่สาม แสดงว่าวัตถุสองชิ้นจะอยู่ในสมดุลความร้อนต่อกันด้วย กฎข้อนี้เป็นกฎที่ได้จากการทดลองและเป็นหลักการในการวัดอุณหภูมิของวัตถุต่างๆด้วยเครื่องมือวัดอุณหภูมิหรือเทอร์โมมิเตอร์ โดยการแทนวัตถุชิ้นที่สามเป็นเทอร์โมมิเตอร์ โดยเมื่อใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดระดับอุณหภูมิของวัตถุสองชิ้น แล้วพบว่ามีอุณหภูมิเท่ากัน จากกฎข้อที่ศูนย์ของเทอร์โมไดนามิกส์จึงกล่าวได้ว่า วัตถุสองชิ้นอยู่ในสมดุลความร้อนต่อกัน แม้ว่าวัตถุสองชิ้นไม่ได้สัมผัสกันโดยตรงก็ตาม

2.2.2 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือก็คือกฎการอนุรักษ์พลังงาน มีหลักการคือ พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปหรือถูกถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างใหม่หรือทำลายให้สูญสลายไปได้ ดังนั้นหากพิจารณาการถ่ายโอนพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม จะพบว่าพลังงานรวมของระบบกับสิ่งแวดล้อมจะมีค่าคงที่ ดังเช่น เมื่อระบบได้รับพลังงานจากสิ่งแวดล้อมแล้ว ปริมาณพลังงานที่ระบบได้รับจะเท่ากับปริมาณพลังงานที่สิ่งแวดล้อมสูญเสีย สามารถเขียนเป็นสมการการถ่ายโอนพลังงานของระบบ ได้ดังนี้

$$[\text{พลังงานเข้าสู่ระบบ}] - [\text{พลังงานออกจากระบบ}]$$

$$= [\text{พลังงานรวมในระบบที่เปลี่ยนแปลงไป}] \qquad (2.1)$$

จากสมการข้างต้น พลังงานรวมของระบบประกอบขึ้นจากพลังงานที่อยู่ในรูปจุลภาค คือ พลังงานภายใน และพลังงานที่อยู่ในรูปมหภาค ได้แก่ พลังงานศักย์ และพลังงานจลน์ ส่วนพลังงานที่ถ่ายโอนเข้าออกจากระบบ เรียกว่าพลังงานที่สามารถถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบได้ สำหรับระบบปิดจะมีรูปแบบของพลังงานที่สามารถถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบปิด 2 รูปแบบ คือความร้อน (heat) และงาน (work)

2.2.3 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์นั้นกล่าวได้ว่า กระบวนการจะเกิดขึ้นในทิศทางที่แน่นอน และไม่เกิดขึ้นในทิศทางที่ย้อนกลับ และพลังงานจะเป็นค่าที่มีทั้งคุณภาพและปริมาณ ซึ่งจะแตกต่างจากกฎข้อที่หนึ่งที่จะกล่าวถึงเฉพาะปริมาณพลังงานและการเปลี่ยนรูปของพลังงานจากรูปหนึ่งไปยังอีกรูปหนึ่งโดยไม่คำนึงถึงคุณภาพของพลังงาน ทั้งนี้กระบวนการจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าไม่เป็นไปตามทั้งกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

2.3 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นวิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่ศึกษาการกำหนดการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งพิจารณาค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันในเนื้อของวัสดุ โดยการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยความร้อนจะถ่ายเทจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ ความแตกต่างของอุณหภูมิจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน กลไกลการถ่ายเทความร้อนจากจุดๆ หนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งแบ่งได้เป็น 3 วิธีคือ การนำ การพา และการแผ่รังสี โดยกระบวนการถ่ายเทความร้อนอาจเกิดจากการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวหรือหลายวิธีรวมกันก็ได้

2.3.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำเป็นวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ในตัวกลาง เนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิ ตัวกลางนี้อาจเป็นตัวกลางเดียวกัน หรือตัวกลางต่างชนิดที่อาจอยู่ติดกันก็ได้ ซึ่งการนำความร้อนเกิดขึ้นในระดับโมเลกุล โดยความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสสารจากโมเลกุลหนึ่งไปยังโมเลกุลถัดไป อัตราการถ่ายเทความร้อนของการนำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ และเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาหรือระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ นั่นคือ

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \tag{2.2}$$

เมื่อแทนด้วยสัดส่วนที่เป็นค่าคงที่ จะได้ดังสมการ

$$q = -kA\frac{\partial T}{\partial x} \tag{2.3}$$

เมื่อ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (W)

k คือ สภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ของวัสดุ (w/m.˚C)

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของความร้อน (m^2)

$\frac{\partial T}{\partial x}$ คือ ค่าอุณหภูมิในทิศทางที่ความร้อนไหล (˚C/m)

x คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน (m)

สมการ (2.3) เรียกว่า สมการของฟูเรียร์ (Fourier rate equation) เนื่องจากความร้อนจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่อุณหภูมิลดลงเสมอ นั่นคือจะมีการถ่ายโอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ จึงทำให้สมการมีเครื่องหมายเป็นลบ วัสดุแต่ละชนิดมีค่าการนำความร้อนเป็นสมบัติเฉพาะตัวแตกต่างกัน ซึ่งวัสดุที่มีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีจึงจะมีค่า k มาก จึงเรียกได้ว่า ตัวนำ (conduct) เช่น โลหะชนิดต่างๆ และเรียกวัสดุที่นำความร้อนว่า ฉนวน (insulator) เช่น อโลหะต่างๆ

2.3.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวของของวัตถุกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่ ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจึงเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน อาจกล่าวได้ว่าการพาความร้อนเกิดขึ้นจากผลของการนำความร้อนรวมกับการเคลื่อนที่ของของไหล การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้

1. การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection)

การพาความร้อนแบบอิสระเกิดขึ้นเมื่อของไหลเกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงลอยตัวของของไหลและแรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล อันเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหล

2. การพาความร้อนแบบบังคับ (force convection)

การพาความร้อนแบบบังคับเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า

ไม่ว่าจะเป็นการพาความร้อนแบบอิสระ หรือบังคับก็ตาม ต่างมีสมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของ **กฎการเย็นตัวของนิวตัน** (Newton's law of cooling) ซึ่งมีรูปสมการเป็นดังนี้

$$\mathrm{Q_{conv}} = hA(T_s - T_f) \tag{2.4}$$

เมื่อ Q_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (W)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convective heat transfer coefficient) ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ ($W/m^2 K$)

A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล (m^2)

T_s คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ (K)

T_f คือ อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุหรืออุณหภูมิส่วนต้นของของไหล (K)

2.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีต่างไปจากการนำและการพาความร้อน เนื่องจากไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน ความร้อนจากการแผ่รังสีจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnatic wave) การแผ่รังสีความร้อนจะเกิดได้ดีในบริเวณที่เป็นสูญญากาศ อัตราการแผ่รังสีความร้อนจากผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิสัมบูรณ์เท่ากับ T_S เป็นไปตามกฎของสตีฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann law) ดังนี้

$$Q = \sigma A T_s^4 \tag{2.5}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

σ คือ ค่าคงที่สตีฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2 K^4$

A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่แผ่รังสีความร้อน (m^2)

T_s คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุแผ่รังสีความร้อน (K)

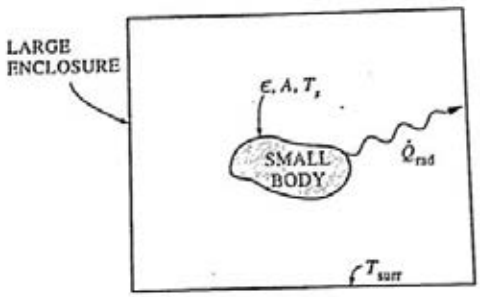
พื้นผิวของวัตถุอุดมคติ (Idealized surface) ที่สามารถแผ่รังสีได้สูงสุดซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.5) เรียกว่า วัตถุดำ (Blackbody) สำหรับวัตถุที่มีอยู่ทั่วไปจะแผ่รังสีได้น้อยกว่าวัตถุอุดมคติ โดยมีอัตราการแผ่รังสีความร้อนเป็นไปตามสมการดังนี้

$$Q = \epsilon \sigma A T_s^4 \tag{2.6}$$

เมื่อ ϵ คือ ค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงถึงประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุด (วัตถุอุดมคติ), $0 \leq \epsilon \leq 1$

เมื่อพิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุใดๆที่มีพื้นผิว A และมีค่าการแผ่รังสีเท่ากับ ϵ กับวัตถุที่ครอบคลุม (Enclosure) วัตถุที่แผ่รังสีอยู่ เมื่อวัตถุที่แผ่รังสีมีอุณหภูมิ T_s และวัตถุที่ครอบคลุมมีอุณหภูมิ $T_{surrounding}$ สามารถเขียนสมการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิของวัตถุทั้งสองได้ดังนี้

$$Q = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{surrounding}^4) \tag{2.7}$$



รูปที่ 2.5 การแผ่รังสีความร้อนระหว่างวัสดุกับพื้นผิวขนาดใหญ่ที่ครอบคลุมวัตถุ

2.4 แนวคิดด้านอัตราผลผลิต (Productivity)

(วันชัย ริจิรวนิช, 2539) อัตราผลผลิต (Productivity) เป็นดัชนีที่ใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตต่อทรัพยากรที่ใช้ในการผลิตผลผลิตนั้นๆ โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\text{อัตราผลผลิต} = \text{ผลผลิต} \,/\, \text{ทรัพยากรที่ใช้} \tag{2.8}$$

หรือ

$$\text{Productivity} = \text{Out put} \,/\, \text{In put} \tag{2.9}$$

ถึงแม้ว่าสมการอัตราผลผลิตที่ใช้จะเป็นเทอมเดียวกัน แต่ความหมายของอัตราผลผลิตนั้นจะมีความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตต่อทรัพยากรที่ใช้แตกต่างกัน ซึ่งอัตราผลผลิตจะเป็นตัวชี้วัดผล

การดำเนินงาน โดยหากสามารถทราบถึงผลการดำเนินงานอย่างต่อเนื่อง จะทำให้สามารถทำการปรับปรุงการดำเนินการผลิตเพื่อให้เกิดผลผลิตที่เพิ่มสูงขึ้นได้ ทั้งนี้ประเภทของอัตราผลผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. อัตราผลผลิตเฉพาะส่วน (Partial Productivity)

คือ อัตราส่วนระหว่างผลผลิตต่อทรัพยากรที่ใช้ในแต่ละชนิด เช่น อัตราผลผลิตด้านวัตถุดิบ (Material Productivity), อัตราผลผลิตด้านแรงงาน (Labor Productivity), อัตราผลผลิตด้านพลังงาน (Energy Productivity), อัตราผลผลิตด้านเงินลงทุน (Capital Productivity) และอัตราผลผลิตด้านค่าใช้จ่าย (Expense Productivity) เป็นต้น

2. อัตราผลผลิตองค์ประกอบรวม (Total Factor Productivity)

คือ อัตราส่วนผลผลิตสุทธิต่อผลรวมของทรัพยากรด้านเงินลงทุนและด้านแรงงาน ซึ่งผลผลิตสุทธิอธิบายได้จากผลผลิตรวมลบด้วยค่าวัสดุและค่าบริการที่เป็นค่าใช้จ่าย

3. อัตราผลผลิตรวม (Total Productivity)

คือ อัตราส่วนของผลผลิตต่อทรัพยากรที่ใช้ทั้งหมด

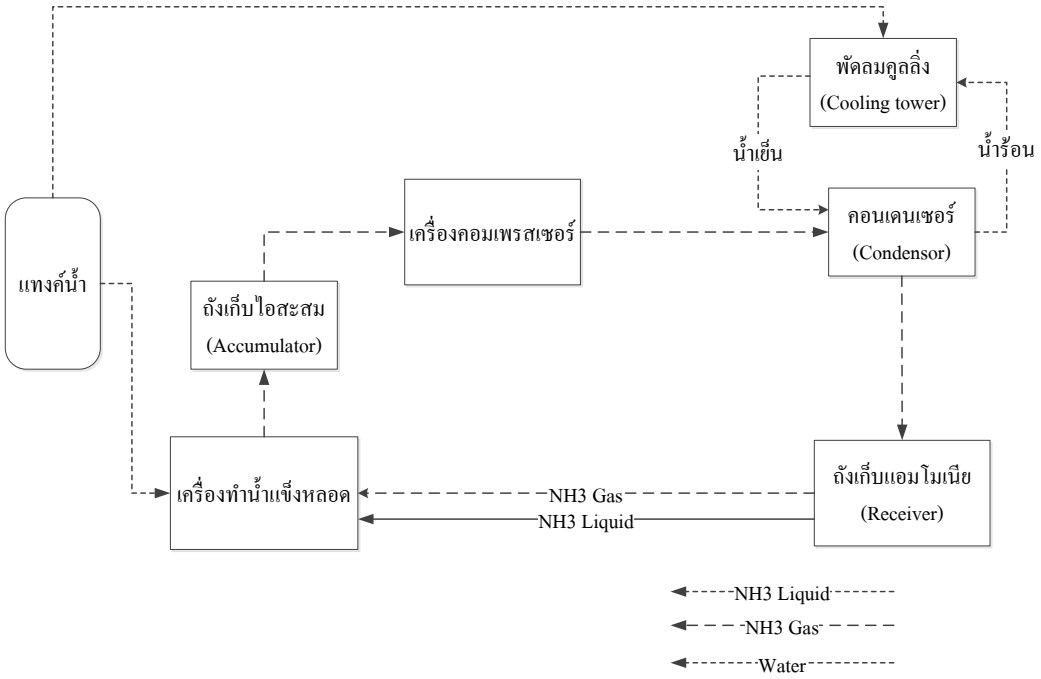
2.5 กระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด

การทำความเย็น คือการลดและรักษาอุณหภูมิของวัตถุต่างๆให้ต่ำกว่าปกติ ทั้งนี้การทำความเย็นนั้นจะใช้สารตัวกลางเพื่อให้เกิดความเย็นขึ้น โดยอาศัยการเปลี่ยนสถานะของสารตัวกลางจากการดูดความร้อนในบริเวณใกล้เคียง จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอและทำให้เกิดความเย็นขึ้นในบริเวณนั้น

2.5.1 ระบบการทำความเย็น (Refrigeration system)

ระบบการทำความเย็นแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบคือ ระบบใช้กลไก (Mechanical) เป็นระบบที่อาศัยการทำงานของกลไกต่างๆ ในการทำความเย็น ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่แพร่หลายมากที่สุด ระบบนี้มีชื่อเรียกทั่วไปว่า การทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression) และระบบไม่ใช้กลไก (Non mechanical) เป็นระบบที่ไม่อาศัยกลไกการทำงานใดๆ ในการทำความเย็น ได้แก่ การทำความเย็นแบบดูดซึม, การทำความเย็นแบบใช้ไอน้ำ และการทำความเย็นแบบใช้การขยายตัวของอากาศ

ทั้งนี้ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งของโรงงานตัวอย่างนั้น เป็นระบบการทำความเย็นแบบใช้กลไก หรือการทำความเย็นแบบอัดไอ โดยมีแอมโมเนียเป็นสารตัวกลางในการทำความเย็นในระบบ วัฏจักรการทำความเย็นแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วัฏจักรการทำความเย็น

ซึ่งระบบการทำความเย็นในโรงงานตัวอย่างนี้มีหน้าที่และอุปกรณ์หลักในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด ดังนี้

2.5.2 คอมเพรสเซอร์ (Compressor)

คอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็ง ทำหน้าที่ในการดูดไอของแอมโมเนียที่ออกมาจากชุดทำน้ำแข็งหลอดหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำเพื่อทำน้ำแข็ง แล้วอัดเพิ่มความดันให้สูงขึ้นไปยังคอนเดนเซอร์ต่อไป

2.5.3 คอนเดนเซอร์ (Condenser)

คอนเดนเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการระบายความร้อนออกจากไอของแอมโมเนีย โดยใช้น้ำจากหอทำความเย็นเข้ามาทำการระบายความร้อนออกจากไอของแอมโมเนีย ทำให้ไอของแอมโมเนียที่มาจากคอมเพรสเซอร์ควบแน่นกลายเป็นของเหลวกลับเข้าสู่ถังเก็บแอมโมเนีย

2.5.4 หอทำความเย็น (Cooling tower)

หอทำความเย็นเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการระบายความร้อนออกจากน้ำที่มาจากคอนเดนเซอร์ โดยน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะถูกปั๊มขึ้นไปสู่ด้านบนของหอทำความเย็น แล้วถูกปล่อยให้ตกลงมาด้านล่างเพื่อให้น้ำแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ ทำให้ได้น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำลง และนำน้ำที่ได้ไปใช้ระบายความร้อนในคอนเดนเซอร์ต่อไป

2.5.5 ถังเก็บแอมโมเนีย (Receiver)

ถังเก็บแอมโมเนียเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บสะสมแอมโมเนียเหลวที่มาจากคอนเดนเซอร์ ทั้งนี้ภายในถังเก็บแอมโมเนียจะมีการแยกสถานะของแอมโมเนียเกิดขึ้น คือก๊าซกับของเหลว ซึ่งในช่วงเวลาทำน้ำแข็งจะจ่ายแอมโมเนียเหลวเข้าสู่ชุดทำน้ำแข็งหลอด ส่วนช่วงเวลาละลายน้ำแข็งจะจ่ายแอมโมเนียที่เป็นก๊าซเข้าไปแทน

2.5.6 ชุดทำน้ำแข็งหลอด

ชุดทำน้ำแข็งหลอดเป็นส่วนที่ให้แอมโมเนียเข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำเพื่อให้น้ำกลายเป็นน้ำแข็งภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด การทำน้ำแข็งหลอดทำได้โดยใช้แอมโมเนียเหลวจากถังเก็บแอมโมเนียฉีดเข้าสู่ด้านล่างของชุดทำน้ำแข็งหลอด เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่เข้ามาทางด้านบนของชุดทำน้ำแข็งหลอด โดยด้านบนของชุดทำน้ำแข็งหลอดจะมีตัวปรับอัตราการไหลของน้ำอยู่ จากนั้นน้ำจะไหลเข้าสู่ท่อทำน้ำแข็งหลอดแล้วเกิดน้ำแข็งภายในท่อทำน้ำแข็งหลอดนี้ ซึ่งแอมโมเนียเหลวจะอยู่ภายนอกท่อทำน้ำแข็งหลอด ส่วนน้ำอยู่ภายในท่อทำน้ำแข็งหลอด ทั้งนี้แอมโมเนียที่ถูกฉีดเข้ามาภายในชุดทำน้ำแข็งหลอดจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ เนื่องจากแอมโมเนียดูดความร้อนออกจากน้ำ จึงทำให้น้ำกลายเป็นน้ำแข็ง และเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ ไอของแอมโมเนียนี้จะถูกดูดกลับขึ้นไปสู่ถังเก็บไอสะสม ในส่วนของท่อทำน้ำแข็งหลอดนั้นจะยาวตั้งแต่ด้านบนตัวถังทำน้ำแข็งหลอดไปจนถึงมีดตัดน้ำแข็ง ซึ่งน้ำแข็งที่ตกลงมาจะถูกมีดตัดให้เป็นท่อนสั้นๆ เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมต่อการจัดจำหน่าย

2.5.7 ถังเก็บไอสะสม (Accumulator)

ถังเก็บไอสะสมเป็นถังที่อยู่ด้านบนของชุดทำน้ำแข็งหลอดทำหน้าที่ดักแอมโมเนียที่เป็นของเหลว เพื่อไม่ให้แอมโมเนียเหลวผ่านไปยังคอมเพรสเซอร์ เนื่องจากจะทำให้เครื่องคอมเพรสเซอร์เสียหายได้ ถังเก็บไอสะสมนี้จึงให้ไอของแอมโมเนียผ่านเข้าสู่คอมเพรสเซอร์เท่านั้น

2.5.8 ชุดควบคุมเวลาในการทำงาน

ชุดควบคุมเวลาในการทำงานเป็นส่วนที่ใช้ในการตั้งเวลาของส่วนต่างๆเพื่อผลิตน้ำแข็งหลอด โดยสามารถแบ่งได้เป็น 5 ส่วน ดังนี้

1. ระบบควบคุมการผลิตน้ำแข็ง

ระบบนี้มีหน้าที่กำหนดระยะเวลาในการทำน้ำแข็งหลอด หากทำการตั้งเวลาในการทำน้ำแข็งหลอดมากเกินไปจะทำให้น้ำแข็งตัน จึงเกิดการเสียเวลาและพลังงานเกิดขึ้น แต่หากตั้งเวลาการทำน้ำแข็งหลอดน้อยเกินไปจะทำให้น้ำแข็งบาง และแตกหักง่าย ดังนั้นจึงควรมีการตั้งเวลาทำน้ำแข็งหลอดที่เหมาะสม

2. ระบบควบคุมการละลายน้ำแข็ง

เป็นระบบที่ใช้ในการละลายน้ำแข็ง โดยใช้แอมโมเนียในสถานะก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงเข้าไปในชุดทำน้ำแข็งหลอด เพื่อให้น้ำแข็งหลุดออกจากผนังท่อ ในการตั้งเวลาละลายน้ำแข็งนั้นควรตั้งให้เหมาะสมเนื่องจากหากตั้งเวลาละลายน้ำแข็งมากเกินไปจะส่งผลให้น้ำแข็งละลายมากเกินไป รวมทั้งเสียเวลา และพลังงานเกินจำเป็นอีกด้วย แต่หากตั้งเวลาละลายน้ำแข็งน้อยเกินไปส่งผลให้น้ำแข็งบางส่วนไม่หลุดออกจากท่อทำน้ำแข็งหลอด

3. ระบบควบคุมการจ่ายแอมโมเนีย

เป็นระบบที่ทำหน้าที่ในการกำหนดเวลาให้แอมโมเนียเข้าไปในเครื่องทำน้ำแข็งหลอด หากทำการตั้งเวลาในการจ่ายแอมโมเนียมาก จะทำให้น้ำแข็งเกิดขึ้นเร็ว แต่หากมากเกินไปส่งผลให้เครื่องคอมเพรสเซอร์ทำงานหนัก และอาจดูดแอมโมเนียเหลวกลับเข้ามาได้ ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับเครื่องคอมเพรสเซอร์ อีกทั้งยังเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นอีกด้วย

4. ระบบควบคุมการเปิดปิดพัดลมคูลลิ่ง

ทำหน้าที่ในการควบคุมการเปิดปิดพัดลมคูลลิ่งทาวเวอร์ โดยการตั้งเวลาในการเปิดปิดพัดลมคูลลิ่งทาวเวอร์ เวลาในส่วนนี้จะเปิดพัดลมคูลลิ่งทาวเวอร์ในช่วงที่ทำน้ำแข็งเพื่อระบายความร้อนออกจากระบบ และปิดพัดลม คูลลิ่งทาวเวอร์เมื่อใกล้ละลายน้ำแข็งเพื่อให้มีความร้อนเพียงพอสำหรับการละลายน้ำแข็ง

5. ระบบควบคุมการตัดน้ำแข็ง

เป็นระบบที่ควบคุมใบมีดคัตเตอร์ตัดน้ำแข็งจากการตั้งเวลาในการตัด โดยจะเริ่มสั่งให้ตัดน้ำแข็งหลังจากเริ่มละลายน้ำแข็งแล้วสักระยะหนึ่ง และหยุดตัดน้ำแข็งเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการทำน้ำแข็ง

2.6 ขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งหลอด

ในกระบวนการผลิตน้ำแข็งจะใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น ซึ่งการทำงานเริ่มต้นจากคอมเพรสเซอร์ดูดแอมโมเนียที่เป็นไอจากชุดทำน้ำแข็งหลอดเข้าด้านทางดูด และอัดแอมโมเนียให้มีความดันสูงขึ้นออกไปด้านทางส่ง แล้วเข้าสู่คอนเดนเซอร์เพื่อระบายความร้อน ทำให้แอมโมเนียควบแน่นตกกลับมาเป็นของเหลวเข้าสู่ถังเก็บแอมโมเนีย ซึ่งน้ำที่ระบายความร้อนจากแอมโมเนียจะถูกทำให้เย็นลงโดยหอทำความเย็น และถูกนำกลับมาใช้ในคอนเดนเซอร์ต่อไป ทั้งนี้แอมโมเนียที่เป็นของเหลวในถังเก็บจะมีบางส่วนแปรสภาพกลายเป็นไอ แยกชั้นกันอยู่ภายในถังเก็บแอมโมเนีย

เมื่อเริ่มการผลิตน้ำแข็งหลอด แอมโมเนียที่เป็นของเหลวในถังเก็บแอมโมเนีย จะถูกส่งผ่านวาล์วลดความดัน ทำให้มีความดัน และอุณหภูมิลดลง ซึ่งอุณหภูมิที่ลดต่ำลงมากจะถูกใช้ในการทำความเย็นโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ ส่งผลให้น้ำกลายเป็นน้ำแข็ง ในขณะที่น้ำไหลผ่านตัวปรับอัตราการไหลของน้ำที่อยู่ด้านบน น้ำจะเริ่มจับตัวเป็นน้ำแข็งภายในผิวท่อ ส่วนน้ำที่ไม่จับตัวเป็นน้ำแข็งจะตกลงสู่ถังน้ำหมุนเวียนที่อยู่ด้านล่าง และจะถูกปั๊มน้ำดูดกลับขึ้นไปใหม่อีกครั้ง เมื่อน้ำเป็นน้ำแข็งจนได้ขนาดตามต้องการ ไอของแอมโมเนียจากถังเก็บแอมโมเนียที่มีอุณหภูมิสูงจะถูกใช้เพื่อละลายน้ำแข็งให้หลุดออกจากท่อ ทำให้น้ำแข็งหลอดตกลงมาแล้วถูกคัตเตอร์ตัดน้ำแข็งตัดน้ำแข็งให้เป็นท่อนสั้นๆ แล้วน้ำแข็งหลอดจะตกลงไปสู่เกลียวลำเลียง เพื่อทำการบรรจุต่อไป ทั้งนี้แอมโมเนียในสภาวะของเหลวที่ดูดความร้อนออกจากน้ำ จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอลอยขึ้นไปด้านบนอยู่ในถังเก็บไอสะสม แล้วคอมเพรสเซอร์จะทำการดูดไอของแอมโมเนียกลับมาแล้วอัดให้มีความดันสูงขึ้นเพื่อเข้าคอนเดนเซอร์ต่อไป หมุนเวียนเป็นวัฏจักรเช่นนี้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นันทวัฒน์ ไพรัชเวทย์ (2548) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเชิงเลขของผลกระทบของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ออัตราการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีซิมิลาร์ริตี และวิธีผลต่างสืบเนื่องแบบปริยาย โดยในวิธีผลต่างสืบเนื่องจะทำทั้งในระบบพิกัดฉากและพิกัดเชิงขั้ว แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบ จากผลการศึกษาพบว่า ความหนาที่ได้จากการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับภาคสนามพบว่ามีความผิดพลาดประมาณ 8% และในช่วงการผลิตที่ 10 นาทีแรก ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแอมโมเนีย, อัตราการแข็งตัว และภาระการทำความเย็นลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นค่าดังกล่าวจึงจะค่อยๆ ลดลงจนเกือบคงที่ เนื่องจากน้ำแข็งนำความร้อนต่ำจึงมีการประพฤติตัวเป็นฉนวนทางความร้อน ทั้งนี้ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแอมโมเนียส่งผลโดยตรงต่ออัตราการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยอุณหภูมิแอมโมเนียจะส่งกระทบอย่างมาก นั่นคือ เมื่อใช้อุณหภูมิแอมโมเนียเท่ากับ -7.5 องศาเซลเซียส เป็นค่าอ้างอิง การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของแอมโมเนีย 0.5 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อัตราการแข็งตัวของน้ำแข็งหลอดเปลี่ยนแปลงไปประมาณ 8% ส่วนปริมาณพลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยมวลการผลิตในช่วงแรกจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 4 นาที แล้วจึงค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ยโดยรวมประมาณ 0.36 MJ/kg

ภูวนาถ กาบคำ (2547) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยได้ทำการศึกษาภาระการทำความเย็นและอัตราการผลิตน้ำแข็ง เมื่อเทียบกับเวลาของกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด ซึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งหลอดนี้จะเป็นการศึกษาระหว่างท่อผิวเรียบกับท่อที่มีการตกแต่งผิวภายนอก โดยเริ่มแรกทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างการคำนวณทางทฤษฎีและการตรวจวัดทางภาคสนามภายในโรงงานอุตสาหกรรม โดยการคำนวณทางทฤษฎีนั้นจะอาศัยวิธีการคำนวณผลเชิงตัวเลขมาช่วยในการแก้ไขปัญหาของระบบสมการและกระบวนการคำนวณซ้ำ ส่วนความหนาของน้ำแข็งจะประมาณได้จากเงื่อนไขขอบเขตบริเวณรอยต่อของน้ำและน้ำแข็ง และมีสมมติฐานเบื้องต้นคือ กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ Quasi-steady ใน 1 มิติ และความหนาของน้ำแข็งเป็นฟังก์ชันของเวลา ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าอัตราการผลิตน้ำแข็งและภาระการทำความเย็นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกภายหลังจากการเริ่มแข็งตัว หลังจากนั้นอัตราการผลิตน้ำแข็งและภาระการทำความเย็นจะเริ่มลดลงอย่างช้าๆจนเกือบคงที่จนกระทั่งเสร็จสิ้นกระบวนการ จากนั้นทำนายภาระการทำความเย็นและอัตราการผลิตน้ำแข็งหากพื้นผิวภายนอกของท่อได้ทำการพ่นแต่งด้วยลูกปราย พบว่าค่าภาระการทำความเย็นเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้น

A. E. Carte (1960) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับฟองอากาศภายในน้ำแข็ง ซึ่งน้ำแข็งขุ่นนั้นเกิดจากในน้ำมีอากาศแทรกตัวอยู่ เมื่อนำมาทำน้ำแข็งจึงทำให้มองเห็นเป็นฟองอากาศอยู่ภายในน้ำแข็ง ทั้งนี้ความหนาแน่นและขนาดของฟองอากาศนั้นจะขึ้นกับอัตราการแข็งตัว, ปริมาณอากาศที่แทรกตัวอยู่ในน้ำ, ความดันที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะเกิดการแข็งตัวของน้ำแข็ง, การเคลื่อนที่ของน้ำ และการหลุดออกของฟองอากาศเนื่องจากแรงลอยตัว การทำให้น้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่แทรกตัวอยู่ แข็งตัวเป็นน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะมีฟองอากาศ 6 ฟองต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร เมื่ออัตราการแข็งตัวเท่ากับ 0.5 mm min^{-1} และจะมีฟองอากาศ 300 ฟองต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร เมื่ออัตราการแข็งตัวเท่ากับ 5 mm min^{-1} การฟอร์มตัวของฟองอากาศจะเกิดขึ้นบริเวณขอบเขตของน้ำและน้ำแข็ง เมื่อความเข้มข้นของอากาศที่แทรกตัวอยู่ในน้ำสูงถึงค่าวิกฤต (สำหรับอัตราการแข็งตัวมากกว่า 2 mm min^{-1}) ซึ่งสามารถป้องกันไม่ให้ความเข้มข้นของอากาศสูงถึงค่าวิกฤตได้โดยการปั่นป่วนน้ำ ส่งผลทำให้ได้น้ำแข็งที่มีความใส และความหนาของน้ำแข็งมีผลต่อความขุ่นของน้ำแข็ง นั่นคือ ความหนาจะส่งผลต่อการหนีของอากาศที่แทรกอยู่ในน้ำ ดังนั้นเมื่อความหนาของน้ำแข็งมาก จึงควรใช้อัตราการแข็งตัวที่ลดต่ำลง

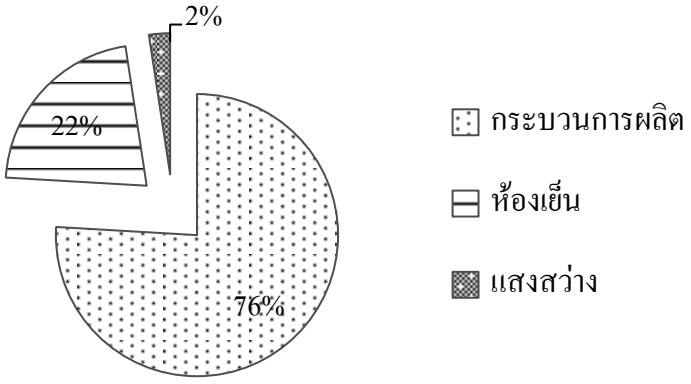
C. Tangthieng (2011) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของขนาดท่อที่มีต่อการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ของกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาผลเชิงตัวเลขของผลกระทบของขนาดท่อที่มีต่อความหนาของน้ำแข็งหลอด, ภาระการทำความเย็น และการใช้พลังงานจำเพาะ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ของการขึ้นรูปน้ำแข็งภายในท่อทำน้ำแข็งจะมีการตั้งสมมติฐานคือกำหนดให้สภาวะเป็นสภาวะไม่คงที่ และการนำความร้อนมีหนึ่งมิติในแนวรัศมี ซึ่งสมการจะประกอบไปด้วยเงื่อนไขขอบเขตการพาความร้อนของบริเวณผนังท่อ และบริเวณน้ำแข็ง และการแข็งตัวมีอุณหภูมิเท่ากันเสมอบนพื้นผิวน้ำแข็ง ทั้งนี้ระบบของสมการจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเทอมไร้มิติ และการวิเคราะห์ผลเชิงตัวเลขทำได้โดยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) ซึ่งการตรวจสอบผลจากการวิเคราะห์ผลเชิงตัวเลขทำได้จากการเปรียบเทียบความหนาของน้ำแข็งจากการทำนายผลเชิงตัวเลขและจากการวัดข้อมูลภาคสนาม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความแปรผันของความหนาน้ำแข็ง, ภาระการทำความเย็น และการใช้พลังงานจำเพาะ กับเวลาสำหรับขนาดท่อที่แตกต่างกัน 4 ขนาดคือ 3/4, 1, 1-1/4 และ 1-1/2 นิ้ว ผลที่ได้พบว่าเมื่อความหนาน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนผ่านชั้นน้ำแข็งจะลดลงเนื่องจากการประพฤติตัวเป็นฉนวนของน้ำแข็ง และจุดต่ำสุดของการใช้พลังงานจำเพาะเป็นฟังก์ชันกับเวลา ซึ่งจากการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างขนาดท่อทั้ง 4 ขนาดจะเห็นว่าท่อขนาดเล็กสุดให้ค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่ำกว่าท่อขนาดใหญ่สุด แต่อย่างไรก็ตามท่อขนาดใหญ่สุดจะมีค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่ำเป็นช่วงกว้าง

J.D. Zhao et al. (2008) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหาความเหมาะสมของระยะเวลาการทำน้ำแข็งสำหรับระบบเก็บน้ำแข็ง (Ice storage system) โดยใช้ระบบการทำน้ำแข็งแบบน้ำแข็งเกล็ด ซึ่งระบบเก็บน้ำแข็งโดยใช้ระบบการทำน้ำแข็งเกล็ดนี้จะถูกติดตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยตงหัว ประเทศจีน ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบเปลี่ยนเฟสของการทำน้ำแข็งเกล็ด และศึกษาความเหมาะสมของเวลาในการทำน้ำแข็งที่อุณหภูมิของน้ำล้างแตกต่างกัน โดยทำการเปรียบเทียบผลระหว่างค่าทางทฤษฎีจากสมการการถ่ายโอนความร้อนกับการทดลองภาคสนาม ซึ่งผลที่ได้จากทางทฤษฎีและทางภาคสนามมีความสอดคล้องกันคือเมื่อเวลาทำน้ำแข็งเพิ่มขึ้นความหนาน้ำแข็งจึงเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิน้ำล้างสูงขึ้นการเกิดน้ำแข็งจึงเป็นไปได้ยากขึ้น ส่วนผลจากการหาค่าที่เหมาะสมพบว่าสามารถปรับปรุงพลังงานความเย็นที่ใช้ได้ 40% แต่ทั้งนี้อาจจะต้องมีการศึกษาต่อโดยการศึกษาผลของปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น สัมประสิทธิ์การพาความร้อน เป็นต้น

Nobuhiko Azuma et al. (2012) ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเติบโตของเกรนน้ำแข็ง (Grain growth of ice) โดยทำได้จากการทำน้ำแข็ง ทั้งแบบที่มีฟองอากาศและไม่มีฟองอากาศ ซึ่งการทำน้ำแข็งแบบที่ไม่มีฟองอากาศทำได้จากการใช้เทคนิคในการเตรียมตัวอย่างแบบพิเศษ คือการใช้เทคนิคการเปลี่ยนเฟส ส่วนการทำน้ำแข็งแบบที่มีฟองอากาศทำได้จากการใช้ส่วนผสมของเกล็ดน้ำแข็งและน้ำกลั่นบริสุทธิ์ในการทำน้ำแข็งโดยวิธีการทำน้ำแข็งทั่วไป โดยการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาถึงอุณหภูมิการทำน้ำแข็งที่มีผลต่ออัตราการเติบโตของเกรนน้ำแข็งทั้งแบบที่มีฟองอากาศและไม่มีฟองอากาศ รวมทั้งพิจารณาพลังงานกระตุ้นของการเคลื่อนย้ายขอบเขตของเกรน ซึ่งใช้กล้องจุลทรรศน์ในการศึกษาน้ำแข็งที่ทำการทดลอง และวิเคราะห์วิวัฒนาการของการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าการเติบโตของเกรนน้ำแข็งที่มีฟองอากาศมีค่ามากกว่า 2 แต่ในขณะที่การเติบโตของเกรนน้ำแข็งที่ไม่มีฟองอากาศนั้นจะมีค่าประมาณ 2 เท่านั้น ส่วนพลังงานกระตุ้นของการเคลื่อนย้ายขอบเขตของเกรนน้ำแข็งที่ไม่มีฟองอากาศมีค่าเท่ากับ 110 - 120 kJ mol^{-1} ในขณะที่พลังงานกระตุ้นของการเคลื่อนย้ายขอบเขตของเกรนน้ำแข็งที่มีฟองอากาศมีค่าเท่ากับ 40 -70 kJ mol^{-1} ทั้งนี้ผลจากการส่องกล้องจุลทรรศน์พบว่าฟองอากาศขนาดเล็กจะถูกจับรวมกันจากการเคลื่อนที่ของขอบเขตเกรนจึงทำให้เห็นเป็นฟองอากาศเกิดขึ้นในขณะที่มีการเติบโตของเกรน ทั้งนี้จึงแสดงได้ว่าความเร็วในการเคลื่อนย้ายขอบเขตเกรนของน้ำแข็งที่มีฟองอากาศจะถูกควบคุมโดยความเร็วในการเคลื่อนย้ายฟองอากาศในน้ำแข็ง

บทที่ 3
การสำรวจสภาพปัญหาปัจจุบันของโรงงานตัวอย่าง

โรงงานตัวอย่างที่เข้าทำการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอด โดยมีกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดเป็นระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ และใช้สารตัวกลางเป็นแอมโมเนียในการทำความเย็น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการลดพลังงานสำหรับระบบการผลิตน้ำแข็งหลอด โดยการศึกษาข้อมูลจะทำการศึกษาในสภาวะที่เครื่องจักรมีกำลังการผลิตที่ 98% ทั้งนี้จากการศึกษาข้อมูลสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าของโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอดภายในโรงงานสามารถแบ่งเป็นสัดส่วนการใช้พลังงานได้ 3 สัดส่วนคือ กระบวนการผลิต, ห้องเย็น และแสงสว่าง ซึ่งได้ข้อมูลสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าเป็นดังนี้



รูปที่ 3.1 สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอด

จากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอดนั้น มีกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดเป็นส่วนที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดภายในโรงงานคือ 76% รองลงมาคือห้องเย็น และแสงสว่าง ตามลำดับ ดังนั้นในการเข้าสำรวจโรงงานตัวอย่างนี้จะเป็นการเข้าศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด เพื่อลดการใช้พลังงานสำหรับระบบการผลิตน้ำแข็งหลอด

ทั้งนี้ในการผลิตน้ำแข็งหลอดจะมีการปรับตั้งเวลาการผลิตเพื่อให้สามารถผลิตน้ำแข็งหลอดได้ตรงตามความต้องการ โดยการปรับตั้งมีทั้งหมด 5 การปรับตั้งคือ เวลาทำน้ำแข็ง, เวลาละลายน้ำแข็ง, เวลาเปิดปิดพัดลมคูลลิ่ง, เวลาจ่ายแอมโมเนีย และเวลาตัดน้ำแข็ง ซึ่งในปัจจุบันโรงงานมีการปรับตั้งระบบการผลิตน้ำแข็งหลอด ดังนี้

ตารางที่ 3.1 การปรับตั้งเวลาการผลิตในปัจจุบัน

การปรับตั้ง	นาที
เวลาทำน้ำแข็ง	35.50
เวลาละลายน้ำแข็ง	5
เวลาเปิดปิดพัดลมคูลลิ่ง	19
เวลาจ่ายแอมโมเนีย	จ่าย 5 วินาที หยุด 20 วินาที
เวลาตัดน้ำแข็ง	5

3.1 การสำรวจด้านการสูญเสีย

จากการเข้าสำรวจกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดในโรงงานตัวอย่างพบว่า ในการผลิตน้ำแข็งหลอดทุกรอบการผลิตมีการทิ้งน้ำเย็นเกิดขึ้น โดยน้ำเย็นทิ้งที่เกิดขึ้นนั้น เกิดจากในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดมีช่วงที่ทำการละลายน้ำแข็ง ซึ่งช่วงนี้จะมีการใส่น้ำเข้าไปเพื่อละลายน้ำแข็งออกมา ดังนั้นน้ำที่เข้าไปละลายน้ำแข็ง จึงตกลงมาสู่ถังน้ำหมุนเวียน ปริมาณน้ำในถังน้ำหมุนเวียนจึงเพิ่มสูงขึ้นทำให้มีน้ำเย็นล้นออกมาจากท่อน้ำเย็นทิ้งในทุกรอบการผลิต จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงทำการวัดปริมาณน้ำเย็นทิ้งพบว่า น้ำเย็นทิ้งมีปริมาณ 401 ลิตรต่อรอบการผลิต โดยผลดังกล่าวแสดงอยู่ในภาคผนวก ก ดังนั้นปริมาณน้ำเย็นทิ้งที่เกิดขึ้นจึงเป็นการสูญเสียทั้งในด้านปริมาณน้ำ และพลังงานเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

3.2 การสำรวจด้านการผลิต

จากการศึกษากระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด จึงทำการเก็บข้อมูลขนาดน้ำแข็งหลอด โดยการเก็บข้อมูลขนาดน้ำแข็งหลอดนั้น จะทำการพิจารณาในส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็ง และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งเป็นตัวแปรตอบสนอง เนื่องจากเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งเป็นตัวแปรที่โรงงานนำมาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ และลูกค้ามักใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งในการตัดสินใจเลือกซื้อสินค้า ส่วนความยาวของน้ำแข็งจะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากความยาวของน้ำแข็งหลอดจะขึ้นกับจำนวนรอบต่อนาทีในการตัดน้ำแข็งของใบมีดคัตเตอร์ ซึ่งจำนวนรอบต่อนาทีของใบมีดคัตเตอร์มีค่าคงที่ จึงทำให้ขนาดความยาวของน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้ใกล้เคียงกัน

ทั้งนี้การเก็บข้อมูลการผลิตในปัจจุบันพบว่า ขนาดน้ำแข็งที่ผลิตได้ในปัจจุบัน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเฉลี่ยเท่ากับ 8.65 มิลลิเมตร มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.13 มิลลิเมตร มีค่าการกระจายตัวเท่ากับ 2.17 เปอร์เซ็นต์ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเฉลี่ยเท่ากับ 35.57 มิลลิเมตร มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.10 มิลลิเมตร มีค่าการกระจายตัวเท่ากับ 0.28 เปอร์เซ็นต์ โดยผลดังกล่าวแสดงอยู่ในภาคผนวก ง ซึ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอกของน้ำแข็งหลอดที่โรงงานกำหนดขึ้น คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็ง 9.5 ± 0.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งมากกว่าเท่ากับ 35 มิลลิเมตร จึงพบว่าในปัจจุบันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งที่ผลิตได้น้อยกว่าเกณฑ์ที่โรงงานกำหนด ส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกอยู่ในเกณฑ์ที่โรงงานกำหนดไว้ ทั้งนี้โรงงานยังไม่มีการคำนึงถึงขนาดน้ำแข็งหลอดที่ลูกค้าต้องการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการหาเกณฑ์ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งหลอดที่ลูกค้าต้องการ แล้วจึงทำการแก้ไขปัญหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกไม่ได้ตามเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้าต่อไป

3.3 การสำรวจค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้อง

3.3.1 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

ในการสำรวจค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน จะทำการคำนวณค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานภายหลังจากการปรับปรุงปัญหาทั้งหมดที่เกิดขึ้น โดยจะเป็นผลการคำนวณค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ลดลงได้เนื่องจากการปรับปรุง โดยค่าใช้จ่ายด้านพลังงานนี้ จะคำนวณจากค่าไฟฟ้าฐานเพียงอย่างเดียว ซึ่งค่าไฟฟ้าฐานนั้นจะคำนวณจากจำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ (kwh) คูณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kwh) โดยแสดงได้ดังสมการที่ (3.1) ทั้งนี้ราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วยเป็นราคาที่กำหนดขึ้นโดยรัฐบาล ซึ่งอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา

$$\text{ค่าไฟฟ้าฐาน} = \text{จำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้} * \text{ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย} \quad (3.1)$$

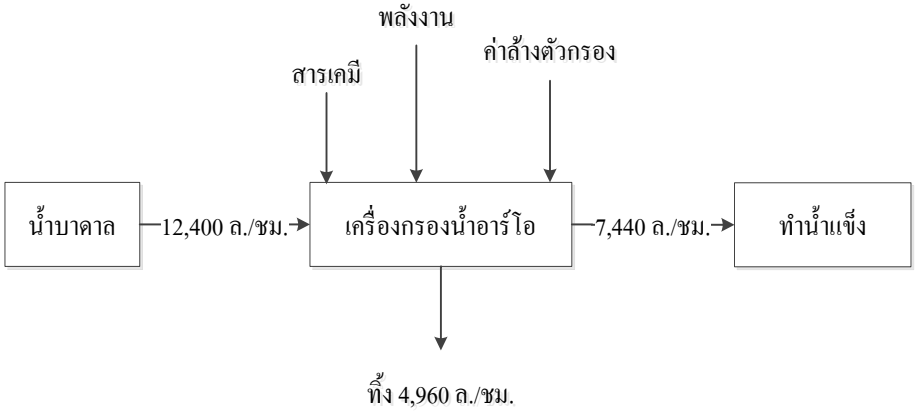
การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงานนี้ จะทำให้ทราบถึงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ลดลงได้ภายหลังจากการปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้น

3.3.2 ค่าใช้จ่ายของน้ำ

การสำรวจค่าใช้จ่ายของน้ำ จะเป็นการคำนวณค่าใช้จ่ายของน้ำภายหลังจากการปรับปรุงปัญหาน้ำเย็นทิ้งที่เกิดขึ้น เนื่องจากภายหลังการปรับปรุงนี้จะส่งผลให้สามารถนำน้ำเย็นทิ้งนั้นกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งเป็นการประหยัดน้ำจากการสูญเสียที่เกิดขึ้น จึงนำผลที่ได้จากการ

ปรับปรุงมาทำการคำนวณค่าใช้จ่ายของน้ำ โดยการคำนวณจะทำการคำนวณในส่วนของค่าใช้จ่ายในการกรองน้ำที่จะใช้ในการทำน้ำแข็ง นั่นคือจะเป็นการคำนวณในส่วนของน้ำบาดาลที่ถูกสูบขึ้นมาแล้วเข้าเครื่องกรองน้ำอาร์โอ (Reverse Osmosis, RO) ทำให้ได้น้ำสะอาดและมีคุณภาพเพื่อใช้ในการทำน้ำแข็งต่อไป

ทั้งนี้ในการกรองน้ำอาร์โอนั้นจะมีการทิ้งน้ำออกไปส่วนหนึ่งเนื่องจากน้ำส่วนนั้นจะเป็นน้ำส่วนที่ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เนื่องมาจากการผลิตน้ำแข็งให้ได้คุณภาพ หรือคือการผลิตให้ได้น้ำแข็งที่มีความใสนั้น จำเป็นต้องใช้น้ำบริสุทธิ์ในการผลิตน้ำแข็ง ดังนั้นหากน้ำที่ได้จากการกรอง ไม่มีความบริสุทธิ์พอจะทำให้น้ำแข็งที่ผลิตไม่ได้คุณภาพ คือน้ำแข็งจะมีความขุ่นเกิดขึ้น ในการกรองน้ำอาร์โอจึงมีการทิ้งน้ำเกิดขึ้น และไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ โดยในการกรองจะมีค่าใช้จ่ายในส่วนต่างๆดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบการกรองน้ำอาร์โอ

จากรูปที่ 3.2 จะแสดงให้เห็นว่า ในกระบวนการกรองน้ำอาร์โอนั้น มีค่าใช้จ่ายใดบ้างที่เกิดจากการกรอง โดยค่าใช้จ่ายในการกรองจะมีค่าน้ำบาดาล, ค่าสารเคมี, พลังงานที่ใช้ในการกรอง รวมไปถึงแรงงานที่ใช้ในการกรอง, ค่าล้างตัวกรองและค่าเสื่อมราคาของตัวกรอง อีกทั้งแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนน้ำบาดาลที่เข้ากรอง, น้ำทิ้งจากการกรอง และน้ำที่กรองได้ โดยจะมีค่าเท่ากับ 12,400 , 4,960 และ 7,400 ลิตร/ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการคำนวณค่าใช้จ่ายในการกรองนั้น โดยใช้แนวทางในการคำนวณจากสมการการคำนวณต้นทุนการผลิตทั่วไป ซึ่งต้นทุนการผลิตจะคำนวณจากวัตถุดิบทางตรง, แรงงานทางตรง, พลังงานที่ใช้ในการผลิตนั้น และโสหุ้ยการผลิต ดังนั้นการคำนวณค่าใช้จ่ายในการกรองน้ำอาร์โอจะแสดงได้ดังสมการ (3.2)

$$\text{ค่าใช้จ่ายในการกรองน้ำอาร์โอ} = \text{วัตถุดิบทางตรง} + \text{แรงงานทางตรง} + \text{พลังงาน} + \text{โสหุ้ยการผลิต} \quad (3.2)$$

จากสมการ (3.2) จะเป็นการคำนวณค่าใช้จ่ายในการกรองน้ำอาร์โอ โดยค่าใช้จ่ายในส่วนของวัตถุดิบทางตรงจะประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าน้ำบาดาล ส่วนค่าใช้จ่ายด้านแรงงานทางตรงจะเป็นแรงงานที่ใช้ในการกรองน้ำอาร์โอโดยตรง ส่วนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานคือพลังงานที่ใช้ในระบบการกรองน้ำอาร์โอ และโสหุ้ยการผลิตคือ ค่าสารเคมีที่ใช้ในการกรองน้ำอาร์โอ, ค่าล้างตัวกรอง และค่าเสื่อมราคาของตัวกรอง โดยสารเคมีที่ใช้คือกรดเกลือ และแอนตี้สเกล ส่วนค่าล้างตัวกรอง จะเป็นการล้างตัวกรองทุกๆปี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกรอง และค่าเสื่อมราคาของตัวกรอง จะเป็นค่าในการเปลี่ยนตัวกรอง เนื่องมาจากการเสื่อมจากการใช้งานตัวกรองทำให้อายุการใช้งานตัวกรองลดลง จนเมื่อหมดอายุการใช้งานจึงทำการเปลี่ยนตัวกรอง ทั้งนี้สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.3)

$$\begin{aligned}\text{ค่าใช้จ่ายในการกรองน้ำอาร์โอ} = {} & [\text{ปริมาณน้ำ} * \text{ค่าน้ำบาดาล}] + \text{ค่าแรงงาน} \\ & + \text{พลังงานในการกรองน้ำอาร์โอ} + \text{ค่าสารเคมี} \\ & + \text{ค่าล้างตัวกรอง} + \text{ค่าเสื่อมของตัวกรอง}\end{aligned} \tag{3.3}$$

3.4 สรุปข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

1. ด้านน้ำ

น้ำบาดาลที่เข้ากรอง	มีค่าเท่ากับ	12,400 ลิตร/ชั่วโมง
น้ำทิ้งจากการกรอง	มีค่าเท่ากับ	4,960 ลิตร/ชั่วโมง
น้ำที่กรองได้	มีค่าเท่ากับ	7,400 ลิตร/ชั่วโมง
ค่าน้ำบาดาล	มีค่าเท่ากับ	0.017 บาท/ลิตร

2. ด้านสารเคมี

ปริมาณการใช้กรดเกลือ	มีค่าเท่ากับ	3.22 ลิตร/ชั่วโมง
ราคากรดเกลือ	มีค่าเท่ากับ	5.3 บาท/ลิตร
ปริมาณการใช้แอนตี้สเกล	มีค่าเท่ากับ	1.56 ลิตร/ชั่วโมง
ราคาแอนตี้สเกล	มีค่าเท่ากับ	237.54 บาท/ลิตร

3. ด้านแรงงาน

ค่าแรงงาน	มีค่าเท่ากับ	300 บาท/วัน/คน
จำนวนชั่วโมงทำงาน	มีค่าเท่ากับ	8 ชั่วโมง/วัน/คน
จำนวนแรงงานในการกรอง	มีค่าเท่ากับ	2 คน

4. ด้านพลังงาน

พลังงานในการกรองน้ำอาร์โอ	มีค่าเท่ากับ	38.45 kwh/ชั่วโมง
ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย	มีค่าเท่ากับ	2.176 บาท/kwh

5. ด้านโสหุ้ยการผลิต

ค่าล้างตัวกรอง	มีค่าเท่ากับ	14.29 บาท/ชั่วโมง
ค่าเสื่อม	มีค่าเท่ากับ	64.29 บาท/ชั่วโมง

บทที่ 4
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เข้าทำการศึกษาโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอด เพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น และทำการแก้ไขปัญหานั้นๆจากการนำความรู้ การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ซึ่งจากการสำรวจสภาพปัญหาปัจจุบันของโรงงานข้างต้น ทำให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ปัญหาน้ำเย็นทิ้ง และปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงมีวิธีดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

4.1 มาตรการที่ 1 : การค้นหาแนวทางในการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้

4.1.1 การวิเคราะห์หาสาเหตุของการสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง

จากปัญหาน้ำเย็นทิ้งที่เกิดขึ้น จึงทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของการทิ้งน้ำเย็น เพื่อสามารถแก้ไขปัญหาน้ำเย็นทิ้งได้อย่างตรงจุด โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลน้ำเย็นทิ้ง แล้วทำการหาสมดุลระหว่างน้ำเข้าและออก เพื่อศึกษาถึงการสูญเสียทางด้านอื่นที่อาจเกิดขึ้น จากนั้นทำการสอบถามทางผู้เชี่ยวชาญของโรงงานถึงการทิ้งน้ำเย็นดังกล่าว เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ถึงแนวทางการแก้ไขปัญหาที่มีความเป็นได้ต่อการนำมาใช้งานจริงต่อไป

4.1.2 การหาแนวทางนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้

ภายหลังจากทราบถึงสาเหตุของปัญหาน้ำเย็นทิ้งที่เกิดขึ้น จึงทำการวิเคราะห์หาแนวทางต่างๆในการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ โดยจากการแก้ไขที่สาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ถึงแนวทางในการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ได้อย่างถูกต้อง และสามารถนำมาใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้น้ำเย็นทิ้งที่เกิดขึ้นสามารถนำกลับมาทำน้ำแข็งได้ โดยจะเป็นการลดการสูญเสียพลังงานได้เป็นอย่างดี หรืออาจจะนำมาทำเป็นน้ำหล่อเย็นก็เป็นไปได้หลากหลายแนวทางเช่นกัน

4.1.3 การปรับปรุงความสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง

ภายหลังจากทราบถึงแนวทางต่างๆในการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์แล้ว จึงทำการพิจารณาและคัดเลือกแนวทางต่างๆนั้น โดยแนวทางแต่ละแนวทางที่ถูกคัดเลือกจะเป็นแนวทางที่สามารถนำมาใช้งานจริงได้ แต่การเลือกนำแนวทางใดมาใช้งานจริงนั้นจะวิเคราะห์จากความ

เหมาะสมในการนำมาใช้งานจริง, ประโยชน์ที่ได้รับ รวมไปถึงการมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนอีกด้วย จากนั้นจึงทำการเลือกแนวทางที่เหมาะสมในการใช้งานจริง เพื่อปรับปรุงความสูญเสียจากการทิ้งน้ำเย็นภายในกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้น

4.1.4 คำนวณค่าใช้จ่าย

จากการปรับปรุงความสูญเสียน้ำเย็นทิ้งข้างต้น จึงนำมาทำการคำนวณค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน และด้านน้ำที่ลดลงเนื่องจากการปรับปรุง โดยค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน จะคำนวณได้จากสมการ (3.1) ซึ่งการคำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงานนี้ จะทำให้ทราบถึงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ลดลงได้ภายหลังจากการปรับปรุงลดความสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง ส่วนค่าใช้จ่ายของน้ำ จะคำนวณได้จากสมการ (3.3) เพื่อให้ทราบถึงค่าใช้จ่ายที่ประหยัดลงได้จากการปรับปรุงนี้

4.2 มาตรการที่ 2 : การศึกษาปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น

4.2.1 การกำหนดขนาดน้ำแข็งหลอดที่ต้องการ

จากปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น จึงเริ่มสอบถามเกณฑ์ที่โรงงานต้องการ แล้วจึงทำการสัมภาษณ์ลูกค้าเพื่อหาเกณฑ์ขนาดน้ำแข็งหลอดที่ตรงตามความต้องการของลูกค้า โดยขนาดน้ำแข็งหลอดที่ทำการสัมภาษณ์คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอด เนื่องจากเป็นขนาดน้ำแข็งหลอดที่ลูกค้าใช้ในการพิจารณาเพื่อตัดสินใจเลือกซื้อสินค้า ซึ่งการสัมภาษณ์นี้จะทำการสัมภาษณ์เพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอดต่ำสุด และสูงสุดที่ลูกค้ายอมรับได้

4.2.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลต่อขนาดน้ำแข็งหลอด

จากปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น, ไม่ตรงตามเกณฑ์ของโรงงาน และไม่มีการคำนึงขนาดน้ำแข็งหลอดที่ตรงต่อความต้องการของลูกค้า ซึ่งเป็นปัญหาจากกระบวนการผลิตที่ผลิตสินค้าไม่ได้ตามเกณฑ์ของโรงงานและเป็นการผลิตที่ไม่มีการคำนึงถึงความต้องการของลูกค้า โดยในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดจะมีการปรับตั้งเป็นปัจจัยในการผลิต ซึ่งการปรับตั้งนั้นจะเป็นการปรับตั้งที่ทำให้ได้ขนาดน้ำแข็งตามต้องการ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาปัจจัยการปรับตั้งที่ส่งผลต่อขนาดน้ำแข็งหลอด โดยการปรับตั้งมีทั้งหมด 5 การปรับตั้งดังนี้ เวลาทำน้ำแข็ง , เวลาละลายน้ำแข็ง, เวลาเปิดปิดพัดลมคูลลิ่ง, เวลาจ่ายแอมโมเนีย และเวลาตัดน้ำแข็ง ทั้งนี้จากทั้ง 5 การปรับตั้งนั้น นำมาทำการคัดเลือกปัจจัยเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง

ภายใน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก ซึ่งในการคัดเลือกปัจจัย ทำได้โดยการใช้ความรู้และประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญในด้านกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดในการพิจารณาตัดสินใจ เมื่อคัดเลือกปัจจัยการปรับตั้งที่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งหลอดได้แล้วจึงนำปัจจัยการปรับตั้งดังกล่าวที่ถูกเลือกมาทำการทดสอบผลต่อไป

4.2.3 การกำหนดระดับของปัจจัย

จากการคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งหลอด จึงทำการกำหนดค่าของปัจจัยเพื่อนำมาใช้ในการทดลองโดยทำการศึกษาแต่ละค่าของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งค่าของปัจจัยที่จะทำการทดลอง กำหนดได้จากขอบเขตที่อยู่ในช่วงที่สามารถดำเนินงานได้ นั่นคือค่าของปัจจัยที่ถูกเลือกจะอยู่ในช่วงของขอบเขตที่สามารถดำเนินงานได้ เพื่อให้สามารถทำการทดลองได้, ผลผลิตที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปจำหน่ายได้ และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปใช้งานจริงได้

4.2.4 การออกแบบการทดลอง

ภายหลังจากการกำหนดระดับปัจจัย ทำการออกแบบการทดลอง โดยออกแบบตารางการทดลอง (Experimental plan layout) จากการรันโปรแกรม Minitab 16 เพื่อให้โปรแกรมสุ่มลำดับการทดลอง แล้วทำการทดลองตามลำดับที่โปรแกรมรันไว้

4.2.5 การทดลอง

ภายหลังจากการกำหนดค่าของปัจจัยแล้ว จึงเริ่มทำการทดลองดังที่ได้กำหนดไว้ในตารางออกแบบการทดลอง โดยในการทดลองนี้จะมีตัวแปรตอบสนองที่ต้องการพิจารณาคือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอด, เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งหลอด, ปริมาณน้ำแข็ง, การใช้พลังงานในแต่ละรอบการผลิต, อัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต หลังจากทำการทดลองทั้งหมดแล้วจึงนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลต่อไป

ทั้งนี้การเก็บข้อมูลต่างๆทำได้ดังนี้ การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอดและเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งหลอด ทำได้โดยการใช้เวอร์เนียในการวัดขนาด ส่วนปริมาณน้ำแข็งหลอด จะใช้การชั่งน้ำหนักของน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้ในแต่ละรอบการผลิต ส่วน

การใช้พลังงานในการผลิต ใช้พาวเวอร์มิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดพลังงานที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งหลอดในแต่ละรอบการผลิต และการวัดปริมาณน้ำเข้าทำน้ำแข็ง จะใช้มิเตอร์น้ำในการวัดปริมาณน้ำที่จะเข้าทำน้ำแข็งในแต่ละรอบการผลิต

ภายหลังจากการทดลองจึงใช้ตัวชี้วัดคือ อัตราผลผลิตด้านพลังงาน (Energy productivity, EP) และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต (Process time productivity, TP) เป็นตัวชี้วัดผลที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากอัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต จะเป็นตัวที่ทำให้สามารถตัดสินใจเลือกค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอดอยู่ในเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า ทั้งนี้อัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Energy productivity (EP)} = \text{Out put/Energy} = \text{O/E} \tag{4.1}$$

$$\text{Process time productivity (TP)} = \text{Out put/Process time} = \text{O/PT} \tag{4.2}$$

เมื่อ EP คือ อัตราผลผลิตด้านพลังงาน (กก./kwh)

TP คือ อัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต (กก./นาที)

O คือ ผลผลิตที่ได้ (กก./รอบ)

E คือ พลังงานที่ใช้ (kwh/รอบ)

PT คือ เวลาการผลิตน้ำแข็งทั้งหมด (นาที/รอบ)

4.2.6 การเปรียบเทียบภายหลังการศึกษา

ภายหลังจากการทำการทดลอง และการประเมินผลอัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต จะทำให้สามารถตัดสินใจเลือกค่าของปัจจัยที่ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งหลอดอยู่ในเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้าได้ จากนั้นจึงนำผลจากการตัดสินใจเลือกค่าของปัจจัยดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบผลตั้งแต่ก่อนการศึกษาไปจนถึงหลังการศึกษา เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างที่ได้จากการปรับปรุง

4.2.7 คำนวณค่าใช้จ่าย

ผลจากการทดสอบปัจจัยข้างต้น นำมาทำการคำนวณค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ลดลงเนื่องจากการปรับปรุง โดยค่าใช้จ่ายด้านพลังงานนี้จะคำนวณได้จากสมการ (3.1) ทั้งนี้การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงานจะทำให้ทราบถึงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ลดลงได้ภายหลังจากการปรับปรุง

4.3 การประเมินผลประหยัด

จากปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งในด้านการสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง และด้านขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น จึงทำการรวมค่าใช้จ่ายที่ประหยัดลงได้ทั้งหมดภายหลังการปรับปรุง คือการรวมค่าใช้จ่ายของ 2 มาตรการ ทั้งในด้านพลังงาน และน้ำ เพื่อแสดงให้เห็นผลจากการปรับปรุงทั้งหมดในงานวิจัยนี้

บทที่ 5
ผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 มาตรการที่ 1 : ผลการค้นหาแนวทางในการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้

5.1.1 ผลวิเคราะห์หาสาเหตุของการสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง

จากปัญหาน้ำเย็นทิ้งที่เกิดขึ้น จึงเริ่มทำการศึกษาสมดุลวัสดุระหว่างน้ำเข้าและน้ำออก โดยใช้ข้อมูลจากภาคผนวก ก จึงสามารถแสดงสมดุลวัสดุได้ดังสมการที่ (5.1)

น้ำเข้า = น้ำออก

ปริมาณน้ำเข้าทำน้ำแข็ง = ปริมาณน้ำแข็ง + น้ำเย็นสูญเสีย + การสูญเสียจากการวัด (5.1)

$$1{,}978.04 = 1{,}556.58 + 401 + 20.46 \quad (5.2)$$

จากสมการที่ (5.2) แสดงถึงสมดุลวัสดุที่เข้าและออกจากระบบการผลิต ทำได้โดยในหนึ่งรอบการผลิตจะทำการวัดปริมาณน้ำเข้าทำน้ำแข็งจากมิเตอร์น้ำ, ชั่งน้ำหนักปริมาณน้ำแข็งที่ผลิตได้ และวัดปริมาณน้ำเย็นทิ้งที่ออกจากระบบ ได้ผลดังนี้ปริมาณน้ำเข้าทำน้ำแข็งเท่ากับ 1,978.04 กิโลกรัม/รอบการผลิต ปริมาณน้ำแข็งที่ผลิตได้เท่ากับ 1,556.58 กิโลกรัม/รอบการผลิต และมีการสูญเสียน้ำเย็นปริมาณ 401 กิโลกรัม/รอบการผลิต ที่มีอุณหภูมิ 1.76 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นว่ามีการสูญเสียอีก 20.46 กิโลกรัม/รอบการผลิต นั่นคือเป็นการสูญเสียที่เกิดการจากชั่งน้ำหนักน้ำแข็ง โดยขณะชั่งน้ำหนักอาจมีการละลายของน้ำแข็งเกิดขึ้นเล็กน้อย และการวัดปริมาณน้ำเย็นทิ้ง อาจมีน้ำหกออกไปบ้างขณะทำการวัด เมื่อทราบถึงปริมาณความสูญเสียที่เกิดขึ้น จึงทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของการสูญเสียน้ำเย็นทิ้งต่อไป

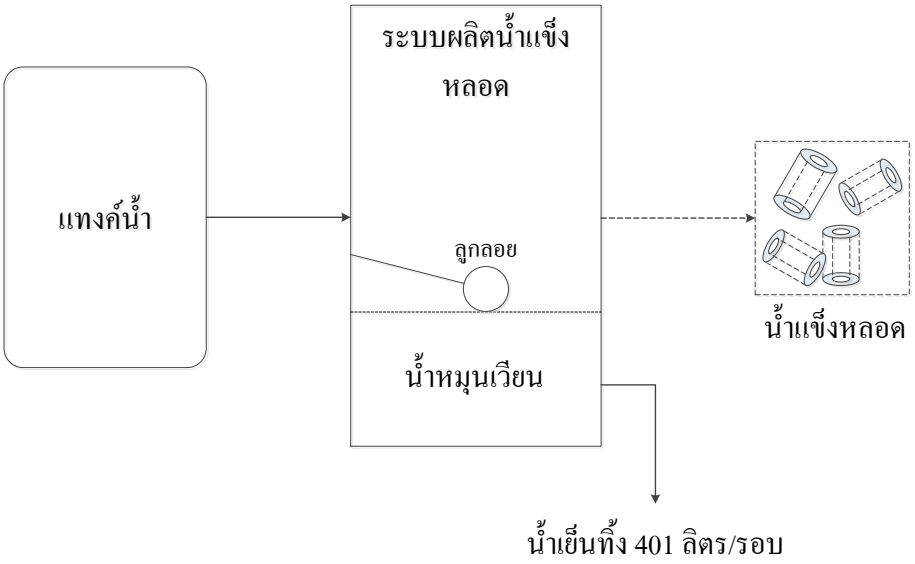
การวิเคราะห์หาสาเหตุของการทิ้งน้ำเย็นนั้น ทำได้โดยเริ่มจากการสอบถามทางโรงงานถึงการทิ้งน้ำเย็น พบว่าหากไม่ทำการทิ้งน้ำเย็นส่วนนี้ เมื่อทำการผลิตน้ำแข็งไประยะหนึ่งจะส่งผลให้น้ำแข็งที่ผลิตได้มีความขุ่น ไม่ใส ซึ่งคุณภาพของน้ำแข็งหลอดที่โรงงานกำหนดคือ ใส และไม่ขุ่น ดังนั้นการผลิตที่ทำให้ได้น้ำแข็งขุ่นจึงเป็นการผลิตที่ทำให้เกิดสินค้าที่ไม่ได้คุณภาพตามที่กำหนด ส่งผลให้ไม่สามารถจำหน่ายออกสู่ท้องตลาดได้ และสูญเสียค่าใช้จ่ายในการผลิต จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้โรงงานทิ้งน้ำเย็นนี้

จากสาเหตุการทิ้งน้ำเย็นของโรงงาน จึงทำการศึกษางานวิจัยเพื่อหาสาเหตุที่ทำให้การผลิตน้ำแข็งผลิตได้น้ำแข็งที่มีความขุ่น โดยจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Nobuhiko Azuma et al., 2012) พบว่ามีการทดลองโดยทำการเตรียมน้ำแข็งขุ่น จากการเติมเกล็ดน้ำแข็งลงไปในน้ำที่ต้องการนำไปทำน้ำแข็ง จึงกล่าวได้ว่าสาเหตุที่ทำให้น้ำแข็งขุ่น และส่งผลให้มีการทิ้งน้ำเย็นเกิดขึ้นนั้น เกิด

จากการมีเกล็ดน้ำแข็งปะปนอยู่ในน้ำที่ใช้ทำน้ำแข็ง นั่นคือน้ำที่ใช้ทำน้ำแข็งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดในปัจจุบันมีเศษน้ำแข็งปะปนอยู่ในน้ำที่เข้าทำน้ำแข็ง เนื่องจากการตัดน้ำแข็งบางครั้งอาจมีน้ำแข็งชิ้นเล็กๆเกิดขึ้น น้ำแข็งส่วนนี้จะตกลงไปอยู่บนตะแกรงกรองด้านล่างหากน้ำแข็งมีขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรง แต่หากน้ำแข็งส่วนนี้มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูตะแกรงก็จะผ่านรูตะแกรงไปแล้วตกกลับลงไปอยู่ในถังน้ำหมุนเวียน โดยน้ำที่เข้าทำน้ำแข็งจะเป็นน้ำที่อยู่ในถังน้ำหมุนเวียน

5.1.2 ผลการหาแนวทางนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้

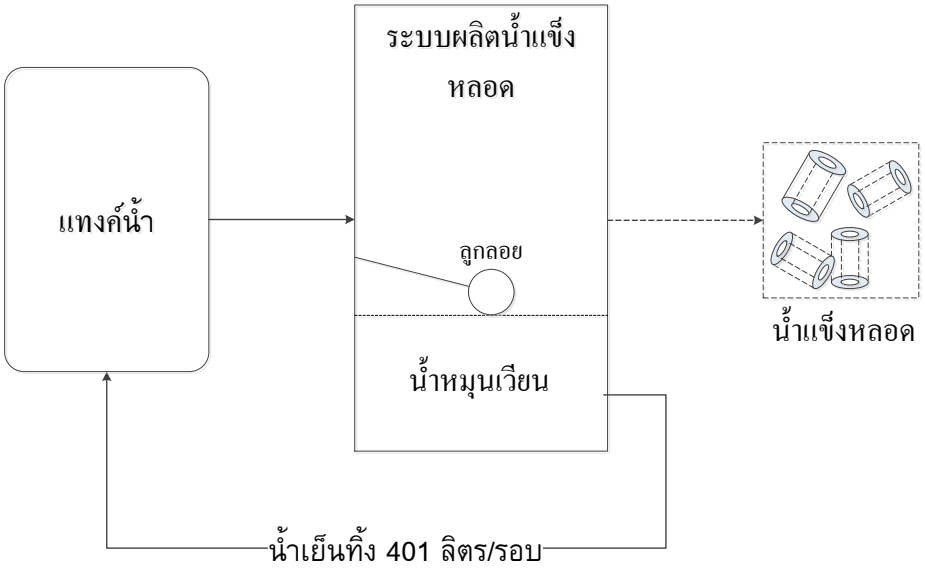
จากสาเหตุของการทิ้งน้ำเย็นข้างต้น ทำให้ไม่สามารถนำน้ำเย็นทิ้งมาใช้ทำน้ำแข็งหลอดได้โดยตรง การนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ทำน้ำแข็งหลอดจึงจำเป็นต้องทำน้ำที่เข้าทำน้ำแข็งให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อน หรือก็คือการทำให้เกล็ดน้ำแข็งที่ปะปนอยู่ในน้ำที่เข้าทำน้ำแข็งละลายกลายเป็นน้ำ หรืออาจจะนำน้ำเย็นทิ้งมาใช้เป็นเพียงน้ำหล่อเย็นก็ได้ ซึ่งแนวทางในการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้เป็นไปได้หลากหลายแนวทาง แต่งานวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอ 4 แนวทางที่เป็นไปได้ในการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ โดยการผลิตในปัจจุบันจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การผลิตในปัจจุบัน

จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงการผลิตในปัจจุบันที่มีความสูญเสียน้ำเย็นทิ้งจำนวน 401 ลิตร/รอบการผลิตเกิดขึ้น

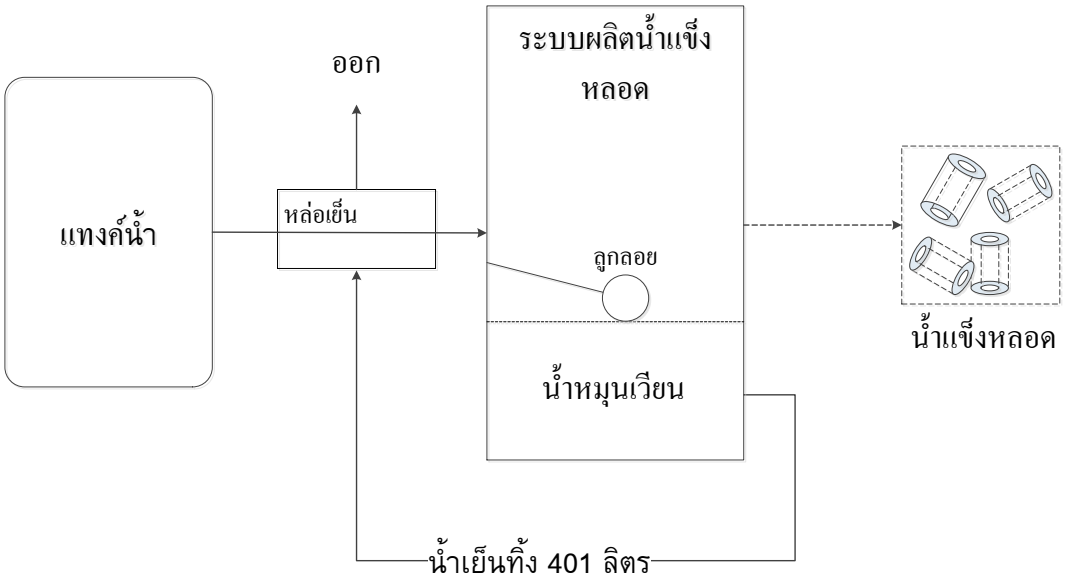
1. **แนวทางที่ 1 : การนำน้ำเย็นทิ้งผสมกับน้ำแทงค์**



รูปที่ 5.2 แนวทางที่ 1 : การนำน้ำเย็นทิ้งผสมกับน้ำแทงค์

จากรูปที่ 5.2 เป็นแนวทางที่มีการนำน้ำเย็นทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำประมาณ 1.76 องศาเซลเซียส ขึ้นไปเก็บไว้ในแทงค์น้ำเพื่อผสมกับน้ำก่อนเข้าทำน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 31.47 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องใช้ฉนวนหุ้มแทงค์น้ำเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากบรรยากาศภายนอก และเนื่องจากแทงค์น้ำอยู่ในระดับสูง จึงต้องใช้ปั๊มน้ำเพื่อสูบน้ำกลับขึ้นไปในแทงค์น้ำ ทั้งนี้เนื่องจากต้องการให้น้ำเป็นเนื้อเดียวกัน นั่นคือต้องการไม่ให้มีน้ำแข็งปะปนอยู่ จึงนำน้ำเย็นทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำกลับขึ้นไปไว้ในแทงค์น้ำ เพื่อให้น้ำแข็งบางส่วนที่อยู่ในน้ำเย็นทิ้งละลายออกไปและนำน้ำในส่วนนี้กลับไปทำน้ำแข็งต่อไป

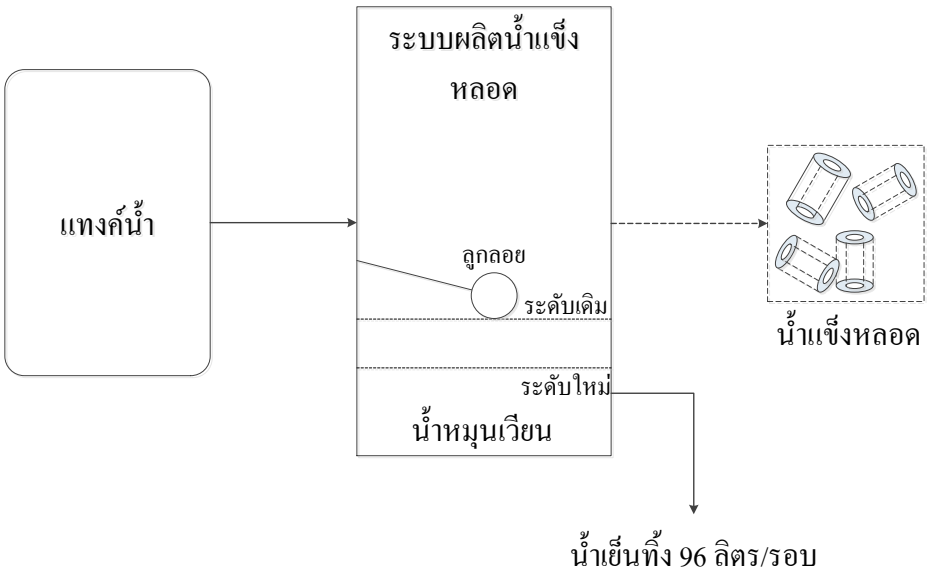
2. แนวทางที่ 2 : การใช้น้ำเย็นทิ้งเป็นน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 5.3 แนวทางที่ 2 : การใช้น้ำเย็นทิ้งเป็นน้ำหล่อเย็น

จากรูปที่ 5.3แนวทางนี้เป็นการใช้อุณหภูมิของน้ำเย็นทิ้งเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่จะเข้าทำน้ำแข็ง ซึ่งอุณหภูมิน้ำเย็นทิ้งประมาณ 1.76 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าทำน้ำแข็งประมาณ 31.47 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เป็นการทำบ่อเก็บน้ำเย็นทิ้งไว้ใต้เครื่องทำน้ำแข็งหลอด ซึ่งเมื่อทำการผลิตน้ำแข็งหลอด น้ำเย็นที่ถูกปล่อยออกมาจะถูกเก็บไว้ในบ่อนี้ แล้วให้ท่อสเตนเลสของน้ำที่จะเข้าทำน้ำแข็งวนอยู่ในบ่อน้ำเย็นทิ้งที่ทำไว้เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำเย็นทิ้งกับน้ำเข้าทำน้ำแข็ง ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของน้ำเข้าทำน้ำแข็งลดลง โดยแนวทางที่ 2 นี้จะเป็นเพียงการนำน้ำเย็นทิ้งมาใช้เป็นน้ำหล่อเย็นเท่านั้น

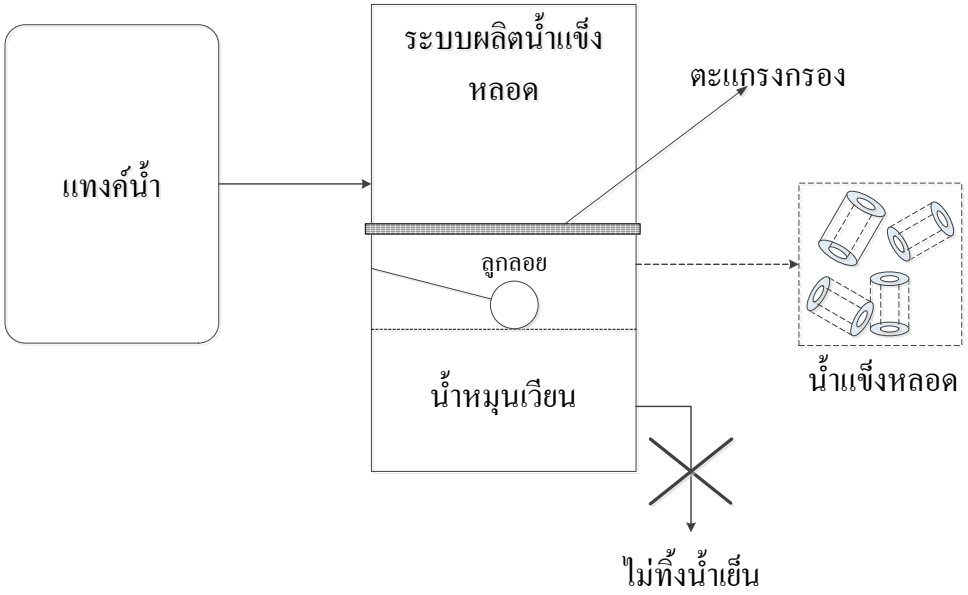
3. แนวทางที่ 3 : การปรับระดับลูกลอย



รูปที่ 5.4 แนวทางที่ 3 : การปรับระดับลูกลอย

จากรูปที่ 5.4 แนวทางนี้เป็นการปรับระดับลูกลอย โดยการปรับระดับลูกลอยในถังน้ำหมุนเวียนให้ต่ำลง เนื่องจากเมื่อเกิดการละลายน้ำแข็ง น้ำที่เข้าละลายน้ำแข็งจะตกลงมาในถังน้ำหมุนเวียน ทำให้ระดับน้ำในถังหมุนเวียนเพิ่มขึ้นจึงมีน้ำเย็นทิ้งปริมาณมาก ซึ่งหากลดระดับลูกลอยลง ทำให้ปริมาตรน้ำหมุนเวียนลดลง เมื่อถึงช่วงเวลาละลายน้ำแข็งปริมาณน้ำจากการละลายน้ำแข็งที่ตกลง จะส่งผลให้เกิดการเพิ่มระดับของน้ำในถังน้ำหมุนเวียน แต่จะไม่มากพอที่จะทำให้เกิดปริมาณน้ำเย็นทิ้งจำนวนมากเท่าเดิมได้ (401 ลิตร) ดังนั้นการลดระดับลูกลอยจึงสามารถลดปริมาณน้ำเย็นทิ้งลงได้ แต่ไม่สามารถลดปริมาณน้ำเย็นทิ้งได้ทั้งหมด เนื่องจากหากไม่ทิ้งน้ำเย็นทั้งหมดเมื่อทำการผลิตน้ำแข็งไประยะหนึ่งจะทำให้น้ำแข็งขุ่นไม่ใส

4. แนวทางที่ 4 : การเพิ่มตะแกรงกรอง



รูปที่ 5.5 แนวทางที่ 4 : การเพิ่มตะแกรงกรอง

จากรูปที่ 5.5 เป็นแนวทางที่ทำการเพิ่มตะแกรงกรอง โดยทำตะแกรงกรองที่มีรูตะแกรงขนาดเล็กลง วางไว้ล่างตะแกรงกรองเดิมที่มีขนาดรูตะแกรงใหญ่กว่า เพื่อให้เศษน้ำแข็งขนาดเล็กที่ตัดไม่ได้ขนาดตกลงมาอยู่บนตะแกรงที่ทำขึ้น นั่นคือป้องกันไม่ให้เศษน้ำแข็งตกลงไปในถังน้ำหมุนเวียน แล้วทำการเปลี่ยนตำแหน่งของท่อน้ำที่จะเข้าทำน้ำแข็ง โดยเปลี่ยนให้น้ำเข้าในตำแหน่งเหนือตะแกรงกรองเพื่อเป็นการละลายน้ำแข็งที่ยังคงค้างอยู่บนตะแกรง

5.1.3 ผลการปรับปรุงความสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง

จากแนวทางทั้ง 4 แนวทางข้างต้น เมื่อทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบแต่ละแนวทาง จากประโยชน์ที่ได้รับ ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง พบว่าเมื่อเริ่มทำการพิจารณาจากแนวทางที่ 1 จะเห็นว่าสามารถนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งได้ทั้งหมด แต่จะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น เนื่องจากการนำน้ำเย็นทิ้งกลับขึ้นไปผสมกับน้ำแทงค์ที่มีอุณหภูมิสูง จะทำให้มีการสูญเสียอุณหภูมิของน้ำเย็นทิ้งไป อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง เนื่องจากการนำน้ำเย็นกลับขึ้นไปใส่ในแทงค์จำเป็นจะต้องใช้ปั๊มน้ำที่มีแรงดันมากพอที่จะดันน้ำเย็นกลับเข้าสู่แทงค์น้ำ โดยแทงค์น้ำนี้จะอยู่สูงกว่าระดับพื้นดินขึ้นไปอีก 6 เมตร จึงจำเป็นต้องใช้ปั๊มน้ำที่มีแรงดันมากพอซึ่งมีราคาค่อนข้างแพง ทั้งยังจำเป็นต้องทำฉนวนเพื่อป้องกันการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำเย็นกับอากาศภายนอกอีกด้วย ดังนั้นในแนวทางที่ 1 นี้จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนคือ ปั๊ม

น้ำ 25 แรงม้า (ราคา 70,000 บาท), โฟมฉนวน (ราคา 7,500 บาท) และท่อน้ำ (ราคา 5,000 บาท) รวมค่าใช้จ่ายในการลงทุนของแนวทางที่ 1 ทั้งสิ้นเท่ากับ 82,500 บาท

ส่วนแนวทางที่ 2 เป็นการใช้น้ำเย็นทิ้งเป็นน้ำหล่อเย็น เพื่อแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกันระหว่างน้ำเย็นทิ้งกับน้ำที่เข้าทำน้ำแข็ง ทำให้อุณหภูมิของน้ำที่เข้าทำน้ำแข็งลดลง ซึ่งการแลกเปลี่ยนอุณหภูมินี้ทำให้อุณหภูมิของน้ำที่เข้าทำน้ำแข็งลดลงได้ และไม่มีการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็ง ทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน เนื่องจากต้องทำท่อสแตนเลสวนอยู่ในบ่อน้ำเย็นทิ้ง เพื่อให้น้ำเย็นทิ้งแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่เข้าทำน้ำแข็ง และจำเป็นต้องใช้ท่อสแตนเลสเพราะน้ำที่เข้าผ่านท่อสแตนเลสนี้เป็นน้ำที่ใช้ทำน้ำแข็ง จึงจำเป็นต้องรักษาความสะอาดในการทำน้ำแข็ง ซึ่งราคาท่อสแตนเลสค่อนข้างสูงกว่าท่อน้ำปกติทั่วไป อีกทั้งยังจำเป็นต้องมีความยาวพอสมควรเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำเย็นทิ้งกับน้ำเข้าทำน้ำแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสำหรับแนวทางนี้มีราคาค่อนข้างสูง และยังจำเป็นต้องทำฉนวนภายในบ่อน้ำเย็นทิ้งเพื่อป้องกันการสูญเสียอุณหภูมิของน้ำเย็นทิ้งไปกับอุณหภูมิอากาศภายนอกอีกด้วย ดังนั้นในแนวทางที่ 2 นี้จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนคือ โฟมฉนวน (ราคา 7,500 บาท) และท่อน้ำสแตนเลส (ราคา 22,500 บาท) รวมค่าใช้จ่ายในการลงทุนของแนวทางที่ 2 ทั้งสิ้นเท่ากับ 30,000 บาท

เมื่อพิจารณาแนวทางที่ 3 พบว่าเป็นแนวทางที่ไม่เสียค่าใช้จ่ายในการลงทุน เนื่องจากเป็นการปรับระดับลูกลอยลง 15 เซนติเมตร เพื่อลดปริมาณน้ำเย็นทิ้งแต่ยังคงมีน้ำเย็นทิ้งเกิดขึ้นอยู่ แนวทางที่ 3 นี้จึงสามารถนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ทำน้ำแข็งหลอดได้บางส่วน รวมทั้งสามารถนำพลังงานเนื่องจากอุณหภูมิน้ำเย็นทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำกลับมาใช้ประโยชน์ได้

สำหรับแนวทางที่ 4 เป็นแนวทางที่ไม่มีการสูญเสียอุณหภูมิของน้ำเย็นทิ้ง และสามารถนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งได้ทั้งหมด แต่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนในส่วนของตะแกรงกรอง โดยตะแกรงกรองที่ใช้จำเป็นจะต้องใช้วัสดุที่ทำจากสแตนเลสเนื่องจากตะแกรงกรองนี้จะสัมผัสกับน้ำแข็งโดยตรงจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่ไม่ทำให้เกิดสนิมเมื่อระยะเวลาการใช้งานเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาความสะอาดในการผลิต จึงส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าใช้จ่ายในส่วนของท่อน้ำเนื่องจากทำการเปลี่ยนตำแหน่งของท่อน้ำให้อยู่เหนือตะแกรงกรองเพื่อละลายน้ำแข็งที่ติดอยู่บนตะแกรงกรองนี้ ดังนั้นในแนวทางที่ 4 นี้จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนคือ ตะแกรงกรอง (ราคา 37,500 บาท) และท่อน้ำ (ราคา 1,000 บาท) รวมค่าใช้จ่ายในการลงทุนของแนวทางที่ 4 ทั้งสิ้นเท่ากับ 38,500 บาท

จากการวิเคราะห์ผลข้างต้นจึงสามารถสรุปผลการเลือกแนวทาง เพื่อนำมาใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม ทั้งทางด้านประโยชน์ที่ได้รับ และค่าใช้จ่ายในการลงทุน โดยสามารถแสดงผลได้ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแนวทางต่างๆ

แนวทางที่	ข้อดี	ข้อเสีย
1	นำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งได้ทั้งหมด	มีการสูญเสียอุณหภูมิของน้ำเย็นทิ้ง และมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของปั๊มน้ำเพิ่มเข้ามา ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงเมื่อเทียบกับแนวทางที่ 2, 3 และ 4
2	ลดอุณหภูมิของน้ำที่เข้าทำน้ำแข็งลงได้	ไม่สามารถนำน้ำเย็นกลับมาทำน้ำแข็งได้ เนื่องจากใช้น้ำเย็นเป็นน้ำหล่อเย็น และมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างสูง
3	ไม่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุน และนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งได้บางส่วน	ยังมีน้ำเย็นทิ้งเกิดขึ้นจำนวน 97 ลิตร
4	ไม่มีการสูญเสียอุณหภูมิของน้ำเย็นทิ้ง และนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งได้ทั้งหมด	มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างสูง

ตารางที่ 5.2 ผลการประเมินค่าใช้จ่ายในการลงทุนของแนวทางต่างๆ

แนวทางที่	สิ่งที่ต้องใช้ในการลงทุน	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาท)	ปริมาณน้ำเย็นทิ้งปัจจุบัน (ลิตร)	น้ำกลับมาใช้ในระบบ (ลิตร)	ปริมาณน้ำเย็นเหลือทิ้ง (ลิตร)	หมายเหตุ
1	ปั๊มน้ำ, ฉนวน, ท่อน้ำ	82,500	401	401	0	-
2	ฉนวน, ท่อน้ำสแตนเลส	30,000	401	0	401	ใช้น้ำเย็นทิ้งเป็นน้ำหล่อเย็น จึงมีน้ำเย็นเหลือทิ้งเกิดขึ้น
3	ไม่ต้องลงทุน	0	401	304	97	เป็นการปรับระดับลูกลอยจึงไม่สามารถลดน้ำเย็นทิ้งได้ทั้งหมด
4	ตะแกรงกรอง, ท่อน้ำ	38,500	401	401	0	-

จากการวิเคราะห์แนวทางต่างๆข้างต้น จึงพิจารณาคัดเลือกแนวทางต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบแนวทางที่ 1 กับแนวทางที่ 4 เนื่องจากเป็นแนวทางที่สามารถนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งได้ทั้งหมดเหมือนกันทั้ง 2 แนวทาง จะเห็นว่าแนวทางที่ 1 มีการสูญเสียอุณหภูมิของน้ำเย็นทิ้ง และมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงกว่าแนวทางที่ 4 ถึง 44,000 บาท คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สูงกว่าถึง 53% ดังนั้นหากเลือกทำแนวทางที่สามารถนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งได้ทั้งหมดจึงเลือกแนวทางที่ 4 ส่วนแนวทางที่ 1 จึงตัดออกจากการพิจารณา และหากพิจารณาความสามารถในการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งที่รองลงมาจะพบว่า แนวทางที่ 3 จะเป็นแนวทางที่สามารถนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งได้บางส่วน โดยสามารถนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งได้จำนวน 304 ลิตร/รอบการผลิต และยังมีปริมาณน้ำเย็นทิ้งเกิดขึ้นเท่ากับ 97 ลิตร/รอบการผลิต ทั้งยังไม่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนอีกด้วย ส่วนแนวทางที่ 2 นั้นจะเป็นการใช้น้ำเย็นเป็นน้ำหล่อเย็น จึงจะได้ประโยชน์จากน้ำเย็นทิ้งเพียงแค่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเข้าทำน้ำแข็งลดลงเท่านั้น ไม่มีการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็ง และเมื่อพิจารณาด้านค่าใช้จ่ายในการลงทุนพบว่าแนวทางที่ 2 นี้มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างสูง เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับแนวทางที่ 4 ที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนใกล้เคียงกัน จะเห็นว่าแนวทางที่ 2 มีผลประโยชน์ที่ได้น้อยกว่า แนวทางที่ 4 คือแนวทางที่ 4 สามารถนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งได้ทั้งหมด แต่แนวทางที่ 2 ไม่มีการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งแต่อย่างใด

ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลของการพิจารณาข้างต้นได้ว่า หากไม่ต้องการมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน แต่สามารถลดปริมาณน้ำเย็นทิ้งลงได้ ควรเลือกทำแนวทางที่ 3 แต่หากต้องการนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาทำน้ำแข็งทั้งหมด แต่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนไม่สูงนัก จึงควรเลือกแนวทางที่ 4 ซึ่งแนวทางที่ 4 นี้จะส่งผลดีในระยะยาวเนื่องจากไม่มีการสูญเสียจากน้ำเย็นทิ้งเกิดขึ้น ดังนั้นแนวทางที่สามารถนำมาใช้งานได้คือ แนวทางที่ 3 และ แนวทางที่4 ซึ่งการเลือกใช้แนวทางใดก็ขึ้นอยู่กับความต้องการของโรงงาน

สำหรับในงานวิจัยนี้จะนำแนวทางที่ 3 มาใช้งาน เนื่องจากไม่ต้องการมีค่าใช้จ่ายในการลงทุน และยังสามารถปรับปรุงปัญหาน้ำเย็นทิ้งที่เกิดขึ้นได้ จากการลดปริมาณน้ำเย็นทิ้งและนำน้ำเย็นทิ้งนั้นกลับไปทำน้ำแข็งต่อไป แต่หากต้องการให้ส่งผลดีในระยะยาวจึงควรเลือกทำแนวทางที่ 4 เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวให้หมดไป

จากการนำแนวทางที่ 3 มาใช้งาน โดยทำการปรับระดับลูกลอยลง 15 เซนติเมตร เพื่อลดปริมาณน้ำเย็นทิ้งลง ซึ่งจากการทดสอบการใช้งานจริงของแนวทางที่ 3 ณ สภาวะการปรับตั้งปัจจุบัน (เวลาทำน้ำแข็ง 35.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็ง 5.00 นาที) จะได้ผลดังภาคผนวก ง คือ เมื่อทำการผลิตน้ำแข็งในระยะยาว ไม่มีน้ำแข็งขุ่นเกิดขึ้น แต่ยังคงมีน้ำเย็นทิ้งเกิดขึ้น โดยมีปริมาณเท่ากับ 96.76 ลิตร/รอบการผลิต ซึ่งจากเดิมมีน้ำเย็นทิ้งปริมาณ 401 ลิตร/รอบการผลิต ทำให้

สามารถนำน้ำเย็นทิ้งปริมาณ 304.24 ลิตร/รอบการผลิต กลับมาทำน้ำแข็งหลอดได้ คิดเป็น 76% ของน้ำเย็นทิ้งทั้งหมด และมีการใช้พลังงานในการทำน้ำแข็ง 100.25 kwh โดยก่อนปรับระดับลูกลอยใช้พลังงานในการทำน้ำแข็ง 103.12 kwh จึงลดพลังงานลง 2.87 kwh/รอบการผลิต โดยผลที่ได้จากการปรับปรุงลดความสูญเสียของน้ำเย็นทิ้งสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 5.3 ผลการเลือกแนวทางในการปรับปรุงลดความสูญเสียของน้ำเย็นทิ้ง

แนวทางที่เลือก	แนวทางที่ 3
ผลที่ได้	ลดน้ำเย็นทิ้ง, ลดพลังงาน

5.1.4 คำนวณค่าใช้จ่าย

ภายหลังจากการปรับปรุงความสูญเสียจากการทิ้งน้ำเย็นนั้น ทำให้สามารถลดพลังงาน และประหยัดปริมาณน้ำลงได้ ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายที่สามารถลดลงได้ภายหลังการปรับปรุง โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือการคำนวณในด้านพลังงาน และการคำนวณในส่วนของน้ำ แสดงได้ดังนี้

1. คำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

จากการปรับปรุงความสูญเสีย โดยการนำแนวทางที่ 3 มาใช้งานจริงพบว่า สามารถลดพลังงานลงได้ 2.87 kwh/รอบการผลิต จึงทำการคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลงได้ โดยคำนวณจากสมการ (3.1) จึงได้ค่าใช้จ่ายที่ลดลงเนื่องจากการปรับปรุงความสูญเสียน้ำเย็นทิ้งเป็นดังนี้

ค่าไฟฟ้าฐาน = 2.87 (kwh) * 2.176 (บาท/kwh)

ค่าไฟฟ้าฐาน = 6.25 บาท

ดังนั้น จากการนำแนวทางในการปรับระดับลูกลอยมาใช้งานจริง พบว่า สามารถลดพลังงานลงได้ 2.87 kwh/รอบการผลิต และคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลงได้ 6.25 บาท/รอบการผลิต

2. คำนวณค่าใช้จ่ายของน้ำ

จากการปรับปรุงเพื่อลดความสูญเสียน้ำเย็นทิ้งลง โดยนำแนวทางในการปรับระดับลูกลอยมาใช้งานจริง ทำให้สามารถนำน้ำเย็นทิ้งปริมาณ 304.24 ลิตร/รอบการผลิต กลับมาทำน้ำแข็งหลอดได้ ซึ่งจากผลการปรับปรุงที่ได้นำมาคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายของน้ำที่ประหยัดลงได้ โดยทำการคำนวณจากสมการ (3.3) ได้ดังต่อไปนี้

ค่ากรดเกลือ = (3.22 ลิตร/ชั่วโมง) * (5.3 บาท/ลิตร)

= 17.07 บาท/ชั่วโมง

ค่าแอนตี้สเกล = (1.56 ลิตร/ชั่วโมง) * (237.54 บาท/ลิตร)

= 370.56 บาท/ชั่วโมง

ดังนั้น ค่าสารเคมี = ค่ากรดเกลือ + ค่าแอนตี้สเกล

= (17.07 บาท/ชั่วโมง) + (370.56 บาท/ชั่วโมง)

= 387.63 บาท/ชั่วโมง

ค่าแรงงาน = [(300 บาท/วัน/คน) / (8 ชั่วโมง/วัน/คน)]*(2 คน)

= 75 บาท/ชั่วโมง

ค่าไฟฟ้าฐาน = (38.45 kwh/ชั่วโมง) * (2.176 บาท/kwh)

= 83.67 บาท/ชั่วโมง

ค่าล้างตัวกรอง = 14.29 บาท/ชั่วโมง

ค่าเสื่อมของตัวกรอง = 64.29 บาท/ชั่วโมง

แทนค่าลงในสมการที่ (3.3) จะได้

ค่ากรองน้ำอาร์โอ = [(12,400 * 0.017) + 75 + 83.67 + 387.63 + 14.29 + 64.29] / 7,400

= 0.113 บาท/ลิตร

ค่าผลประหยัดน้ำเย็นทิ้ง = (ปริมาณน้ำเย็นทิ้งที่ลดลงจากการปรับปรุง * ค่ากรองน้ำอาร์โอ)

= 304.24 * 0.113

= 34.38 บาท/รอบการผลิต

จากการปรับปรุงในมาตรการที่ 1 ส่งผลทำให้สามารถลดปริมาณน้ำเย็นทิ้ง และพลังงานลงได้ ซึ่งผลภายหลังการปรับปรุง และการค่าใช้จ่ายที่ลดลง สามารถแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 5.4 ผลภายหลังการปรับปรุงในมาตรการที่ 1

	ผลหลังปรับปรุงในมาตรการที่ 1	
	ปริมาณน้ำเย็นทิ้ง (ล./รอบ)	**พลังงานที่ใช้ (kwh/รอบ)**
ก่อนการศึกษา	401 ± 2.20	103.12 ± 0.33
ปรับปรุงมาตรการที่ 1	96.76 ± 0.53	100.25 ± 1.06
ผลต่างหลังปรับปรุง	304.24	2.87
ผลประหยัด (บาท/รอบ)	34.38	6.25
รวมผลประหยัด (บาท/รอบ)	40.63	

จากตารางที่ 5.4 แสดงถึงผลภายหลังการปรับปรุงในมาตรการที่ 1 พบว่ามีปริมาณน้ำเย็นทิ้งที่ลดลงได้เท่ากับ 304.24 ลิตร/รอบการผลิต คิดเป็น 34.38 บาท/รอบการผลิต และมีพลังงานที่ใช้ลดลงเท่ากับ 2.87 kwh/รอบการผลิต คิดเป็น 6.25 บาท/รอบการผลิต รวมผลประหยัดทั้งหมดจากการปรับปรุงในมาตรการที่ 1 ได้เท่ากับ 40.63 บาท/รอบการผลิต

5.2 มาตรการที่ 2 : ผลการศึกษาปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น

5.2.1 ผลการกำหนดขนาดน้ำแข็งหลอดที่ต้องการ

จากปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น จึงเริ่มสอบถามทางโรงงานถึงเกณฑ์ขนาดน้ำแข็งหลอดที่โรงงานต้องการ จากนั้นจึงทำการสัมภาษณ์ลูกค้าเพื่อหาเกณฑ์ขนาดน้ำแข็งหลอดที่ตรงตามความต้องการของลูกค้า ทำการสัมภาษณ์ลูกค้าจำนวน 15 คน โดยขนาดน้ำแข็งหลอดที่ทำการสัมภาษณ์คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ทำได้โดยการนำน้ำแข็งหลอดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในต่ำที่สุดในเกณฑ์ที่โรงงานกำหนด นั่นก็คือ 10 มิลลิเมตร ให้ลูกค้าทำการพิจารณาว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ยอมรับได้หรือไม่ หากยอมรับไม่ได้จึงทำการเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งขึ้นอีก 0.25 มิลลิเมตร จนกระทั่งได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในต่ำที่สุดที่ลูกค้ายอมรับได้ จากนั้นจึงนำน้ำแข็งหลอดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในสูงที่สุดในเกณฑ์ที่โรงงานกำหนด นั่นก็คือ 9 มิลลิเมตร ให้ลูกค้าทำการพิจารณาว่ายอมรับได้หรือไม่ต่อไป หากยอมรับไม่ได้จึงทำการเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งขึ้นอีก 0.25 มิลลิเมตรเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งที่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จะเป็นการยากต่อการใช้สายตามองเพื่อแยกแยะความแตกต่างของขนาด

นั้นๆ อาจส่งผลทำให้เกิดความสับสนต่อการตัดสินใจก็เป็นได้ ส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งหลอดนั้น จะมีขนาดใกล้เคียงกัน เนื่องจากขนาดท่อคงที่ ดังนั้นจึงกำหนดให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของลูกค้ามีค่าเท่ากันกับเกณฑ์ของโรงงานที่กำหนดไว้คือ มากกว่าเท่ากับ 35 มิลลิเมตร

ทั้งนี้ผลจากการสัมภาษณ์ลูกค้าเพื่อหาขนาดของน้ำแข็งหลอดที่ลูกค้าต้องการ พบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งต่ำสุดคือ 10.25 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งสูงสุดคือ 9.25 มิลลิเมตร ส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกมีค่า มากกว่าเท่ากับ 35 มิลลิเมตร ซึ่งในปัจจุบันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งที่ผลิตได้คือ 8.65 มิลลิเมตร จึงเป็นปัญหาจากกระบวนการผลิตไม่ได้คุณภาพจึงทำให้น้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในไม่ตรงตามเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า

ผลจากการสัมภาษณ์ความต้องการของลูกค้าที่มีต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และภายนอกของน้ำแข็งหลอดแสดงได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 เส้นผ่าศูนย์กลางภายในและนอกที่กำหนดโดยลูกค้า และโรงงาน

คุณลักษณะที่กำหนดโดย	**เส้นผ่าศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)**	
	ภายใน	**ภายนอก**
ลูกค้า	9.25 - 10.25	≥ 35
โรงงาน	9 - 10	≥ 35

ผลจากตารางข้างต้น พบว่าผลจากการผลิตน้ำแข็งหลอดในปัจจุบันมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งต่ำกว่าเกณฑ์ที่โรงงานกำหนด และความต้องการของลูกค้า หรืออาจกล่าวได้ว่าน้ำแข็งหลอดมีความหนามากกว่าเกณฑ์ที่โรงงานกำหนด และความต้องการของลูกค้า ซึ่งจากการศึกษางานวิจัย (C. Tangthieng, 2011, J.D. Zhao et al., 2008, ภูวนาถ กาบคำ, 2547, นันทวัฒน์ ไพรัชเวทย์, 2548) พบว่า เวลาทำน้ำแข็งเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความหนาของน้ำแข็งเพิ่มขึ้น ดังนั้นการผลิตในปัจจุบันจึงสามารถลดเวลาทำน้ำแข็งลง เพื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งให้สูงขึ้น ส่งผลให้ประหยัดต้นทุนในการผลิตได้

5.2.2 ผลการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อขนาดน้ำแข็งหลอด

จากการปรับตั้งเวลาการผลิตทั้งหมด 5 การปรับตั้งคือ เวลาทำน้ำแข็ง , เวลาละลายน้ำแข็ง, เวลาเปิดปิดพัดลมคูลลิ่ง, เวลาจ่ายแอมโมเนีย และเวลาตัดน้ำแข็ง นำมาทำการคัดเลือกปัจจัยเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน, ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก, ปริมาณน้ำแข็ง, พลังงาน, อัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต ซึ่งในการคัดเลือกปัจจัย ทำได้โดยการใช้ความรู้และประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญในด้านกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดในการพิจารณาตัดสินใจ โดยผลการคัดเลือกปัจจัยที่ได้เป็นดังนี้

1. เวลาทำน้ำแข็ง

ช่วงเวลาทำน้ำแข็งเป็นช่วงเวลาที่ใช้แอมโมเนียเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่เข้าทำน้ำแข็ง ดังนั้นเมื่อเวลาทำน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้น น้ำกลายเป็นน้ำแข็งมากขึ้น เนื่องจากมีเวลาในการทำน้ำแข็งมาก ทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งเล็กลง, ความหนาของน้ำแข็งเพิ่มสูงขึ้น, ปริมาณน้ำแข็งมากขึ้น และพลังงานที่ใช้เพิ่มมากขึ้น

2. เวลาละลายน้ำแข็ง

ช่วงเวลาละลายน้ำแข็งเป็นช่วงเวลาที่ใช้แก๊สแอมโมเนียที่มีอุณหภูมิสูงเข้าไปละลายน้ำแข็งและมีการใส่น้ำเข้าไปในท่อทำน้ำแข็งในขณะละลายน้ำแข็ง เพื่อทำให้น้ำแข็งหลุดออกจากท่อได้ ดังนั้นเมื่อเวลาละลายน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลางภายในลดลง, เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกลดน้อยมาก, ปริมาณน้ำแข็งลดลง และพลังงานที่ใช้เพิ่มมากขึ้น

3. เวลาเปิดปิดพัดลมคูลลิ่ง

การเปิดปิดพัดลมคูลลิ่งจะเป็นการระบายความร้อนออกจากระบบ เนื่องจากพัดลมคูลลิ่งในคูลลิ่งทาวเวอร์จะทำหน้าที่ในการระบายความร้อนออกจากน้ำหล่อเย็นของคอนเดนเซอร์ โดยในตอนแรกเริ่มกระบวนการผลิตจะทำการเปิดพัดลมคูลลิ่งเพื่อระบายความร้อนออกจากระบบ และเมื่อดำเนินการผลิตไปจนเกือบเสร็จสิ้นกระบวนการผลิต จะทำการปิดพัดลมคูลลิ่งเพื่อให้ระบบมีความร้อนเพียงพอในการละลายน้ำแข็ง ดังนั้นเวลาเปิดปิดพัดลมคูลลิ่งจึงไม่ได้ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก แต่จะส่งผลต่อความร้อนของระบบเท่านั้น

4. เวลาจ่ายแอมโมเนีย

เวลาจ่ายแอมโมเนียเป็นการกำหนดช่วงเวลาในการจ่ายแอมโมเนีย เพื่อให้มีแอมโมเนียเพียงพอต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่เข้าทำน้ำแข็ง ซึ่งหากมีแอมโมเนียเข้าแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำมาก น้ำก็จะกลายเป็นน้ำแข็งมาก และหากมีแอมโมเนียเข้าแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ

น้อย น้ำก็จะกลายเป็นน้ำแข็งน้อยเช่นกัน แต่ทั้งนี้ ทางโรงงานที่เข้าทำงานวิจัยนี้ไม่สามารถให้ทำการปรับเปลี่ยนเวลาจ่ายแอมโมเนียได้ เนื่องจากการเปลี่ยนเวลาจ่ายแอมโมเนียจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อเครื่องจักร ซึ่งการปรับเปลี่ยนเวลาจ่ายแอมโมเนียโดยไม่มีความรู้ความชำนาญอาจส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของระบบการผลิตทั้งหมดได้

5. เวลาตัดน้ำแข็ง

เวลาตัดน้ำแข็งเป็นการตั้งช่วงเวลาให้ใบมีดคัตเตอร์เริ่มทำงาน เพื่อตัดน้ำแข็งที่หลุดออกมาจากท่อด้านบน ดังนั้นเวลาตัดน้ำแข็งจึงไม่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก แต่จะส่งผลในด้านความยาวของน้ำแข็ง หากความเร็วรอบต่อนาทีของใบมีดคัตเตอร์มาก ความยาวน้ำแข็งที่ได้จะสั้น และหากความเร็วรอบต่อนาทีของใบมีดคัตเตอร์น้อย ความยาวน้ำแข็งที่ได้จะยาว ซึ่งในกระบวนการผลิตของโรงงานตัวอย่างนี้มีความเร็วรอบต่อนาทีของใบมีดคัตเตอร์คงที่ ความยาวของน้ำแข็งที่ได้จึงใกล้เคียงกันมาก

ดังนั้น จึงสามารถสรุปผลการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน, ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก ได้ดังนี้

ตารางที่ 5.6 ผลการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อขนาดน้ำแข็งหลอด

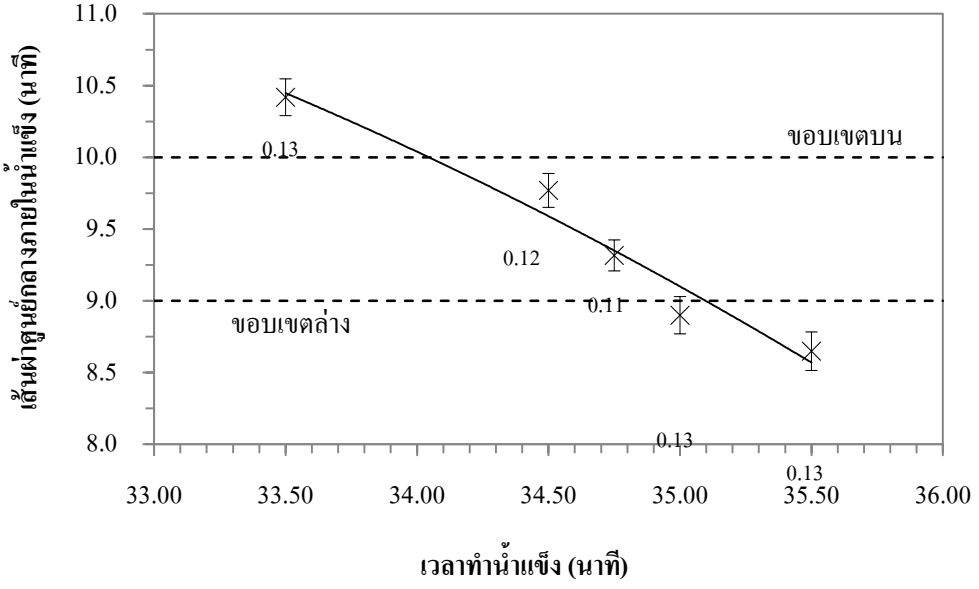
ปัจจัย	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก
เวลาทำน้ำแข็ง	มีผล	คงที่
เวลาละลายน้ำแข็ง	คงที่	มีผล
เวลาเปิดปิดพัดลมดูดลิ่ง	คงที่	คงที่
เวลาจ่ายแอมโมเนีย	คงที่	คงที่
เวลาตัดน้ำแข็ง	คงที่	คงที่

ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งหลอดคือ เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็ง จึงนำเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งมากำหนดระดับของเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็ง เพื่อใช้ในการทำการทดลองต่อไป

5.2.3 ผลการกำหนดระดับของปัจจัย

จากปัจจัยที่ถูกเลือกข้างต้นคือ เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็ง ได้นำมาทำการทดลองโดยศึกษาแต่ละระดับของปัจจัยนั้นๆ โดยกำหนดจากระยะขอบเขตของช่วงเวลาทำน้ำแข็งและเวลาละลายน้ำแข็ง ต่ำสุด-สูงสุดที่ทำให้สามารถจำหน่ายน้ำแข็งหลอดที่ผลิตจากการทดลองได้ โดยกำหนดจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ที่มีประสบการณ์ทางด้านกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดของโรงงานตัวอย่าง ดังนั้นเวลาทำน้ำแข็งต่ำสุดที่ผลิตได้คือ 33.50 นาที และเวลาทำน้ำแข็งสูงสุดนั้นจะใช้เวลาทำน้ำแข็งในปัจจุบันคือ 35.50 นาที เนื่องจากการผลิตในปัจจุบันทำให้ได้น้ำแข็งหลอดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเกินกว่าเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า ส่วนเวลาละลายน้ำแข็งต่ำสุดที่ผลิตได้คือ 4.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็งสูงสุดที่ผลิตได้คือ 5.50 นาที

ทั้งนี้การทดลองเริ่มจากการศึกษาเวลาทำน้ำแข็งที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในก่อน เพื่อศึกษาช่วงเวลาทำน้ำแข็งที่ทำให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในอยู่ในเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า ซึ่งทำให้สามารถกำหนดช่วงเวลาทำน้ำแข็งที่จะนำมาทำการทดลองต่อไปได้ โดยจากขอบเขตของเวลาทำน้ำแข็งจึงทำการศึกษาที่เวลาทำน้ำแข็งเท่ากับ 33.50, 34.50, 34.75, 35.00 และ 35.50 นาที และกำหนดให้เวลาละลายน้ำแข็งคงที่ที่ 5.00 นาที ผลที่ได้จากภาคผนวก ง แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5.6 เวลาในการผลิตน้ำแข็งทั้งหมดกับเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน

จากรูปที่ 5.6 แสดงถึงเวลาทำน้ำแข็งกับเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน พบว่าเมื่อเวลาทำน้ำแข็งเพิ่มขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งลดลง เนื่องจากเวลาทำน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น ทำให้น้ำมีเวลาเป็นน้ำแข็งมากขึ้น ความหนาของน้ำแข็งจึงเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในจึงลดลง ซึ่งจากการพิจารณาผลที่ได้พบว่า เวลาทำน้ำแข็งที่ส่งผลให้การผลิตน้ำแข็งหลอดได้ขนาดน้ำแข็งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งอยู่ในเกณฑ์ที่โรงงานกำหนดและตรงต่อความต้องการของลูกค้าคือ 34.50, 34.75 และ 35.00 นาที ดังนั้นจึงทำการกำหนดขอบเขตของระดับของเวลาทำน้ำแข็งได้ดังนี้ เวลาทำน้ำแข็งต่ำสุดเท่ากับ 34.50 และเวลาทำน้ำแข็งสูงสุดเท่ากับ 35.50 นาที เนื่องจากจะใช้เวลาการผลิตปัจจุบันในการทดลองด้วย จึงกำหนดให้เวลาทำน้ำแข็งสูงสุดที่ 35.50 นาที

ทั้งนี้ในการทดลองจะทำการทดลองที่ 3 ระดับ โดยมีปัจจัย 2 ปัจจัยคือ เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็ง ซึ่งสามารถกำหนดระดับของปัจจัยได้ดังนี้

ตารางที่ 5.7 ผลการกำหนดระดับของปัจจัย

ปัจจัย	**ระดับปัจจัย**		
	-1	**0**	**1**
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	34.50	35.00	35.50
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	4.50	5.00	5.50

5.2.4 ผลการออกแบบการทดลอง

จากการกำหนดระดับปัจจัยของทั้ง 2 ปัจจัยข้างต้น นำมาทำการออกแบบการทดลอง โดยในงานวิจัยนี้เลือกการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็ม (Full Factorial Design) โดยมีระดับปัจจัยเท่ากับ 3 ระดับ และมีจำนวนปัจจัยเท่ากับ 2 ปัจจัย ดังนั้นจำนวนการทดลองเท่ากับ 3^2 นั่นคือ 9 การทดลอง ทั้งนี้ในแต่ละการทดลองจะมีการทดลองซ้ำ โดยจากการหาจำนวนการทดลองซ้ำ จากภาคผนวก ข พบว่าในการทดลองทั้งหมดจะทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง โดยจำนวนการทดลองซ้ำหาได้จากวิธีการ Operation Characteristic Curves (Montgomery, 2005) และทำการหาการกระจายตัวแบบปกติ (Normality test) ของข้อมูล เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ทำการทดลองนั้น โดยแสดงได้ดังภาคผนวก ค

ดังนั้น จำนวนการทดลองทั้งหมดจะเท่ากับ 9x5 = 45 การทดลอง โดยเป็นการทดลองระหว่างเวลาทำน้ำแข็งกับเวลาละลายน้ำแข็ง ที่ระดับปัจจัยต่างกัน 3 ระดับ ซึ่งผลของตารางการออกแบบการทดลองจากการรันโปรแกรม Minitab 16 สามารถแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 5.8 ตารางการออกแบบการทดลอง

ลำดับที่การทดลองมาตรฐาน	ลำดับที่การทดลองตามการสุ่ม	ค่าระดับปัจจัย		
		เวลาทำน้ำแข็ง	เวลาละลายน้ำแข็ง	ผลของตัวแปรตอบสนอง
42	1	0	1	
20	2	-1	0	
26	3	1	0	
2	4	-1	0	
37	5	-1	-1	
11	6	-1	0	
27	7	1	1	
1	8	-1	-1	
12	9	-1	1	
35	10	1	0	
17	11	1	0	
36	12	1	1	
23	13	0	0	
15	14	0	1	
34	15	1	-1	
43	16	1	-1	
28	17	-1	-1	
16	18	1	-1	
39	19	-1	1	
30	20	-1	1	
10	21	-1	-1	
7	22	1	-1	
6	23	0	1	
13	24	0	-1	
22	25	0	-1	

ลำดับที่การทดลองมาตรฐาน	ลำดับที่การทดลองตามการสุ่ม	ค่าระดับปัจจัย		
		เวลาทำน้ำแข็ง	เวลาละลายน้ำแข็ง	ผลของตัวแปรตอบสนอง
40	26	0	-1	
19	27	-1	-1	
32	28	0	0	
3	29	-1	1	
4	30	0	-1	
14	31	0	0	
33	32	0	1	
41	33	0	0	
45	34	1	1	
24	35	0	1	
8	36	1	0	
5	37	0	0	
38	38	-1	0	
29	39	-1	0	
18	40	1	1	
9	41	1	1	
25	42	1	-1	
31	43	0	-1	
44	44	1	0	
21	45	-1	1	

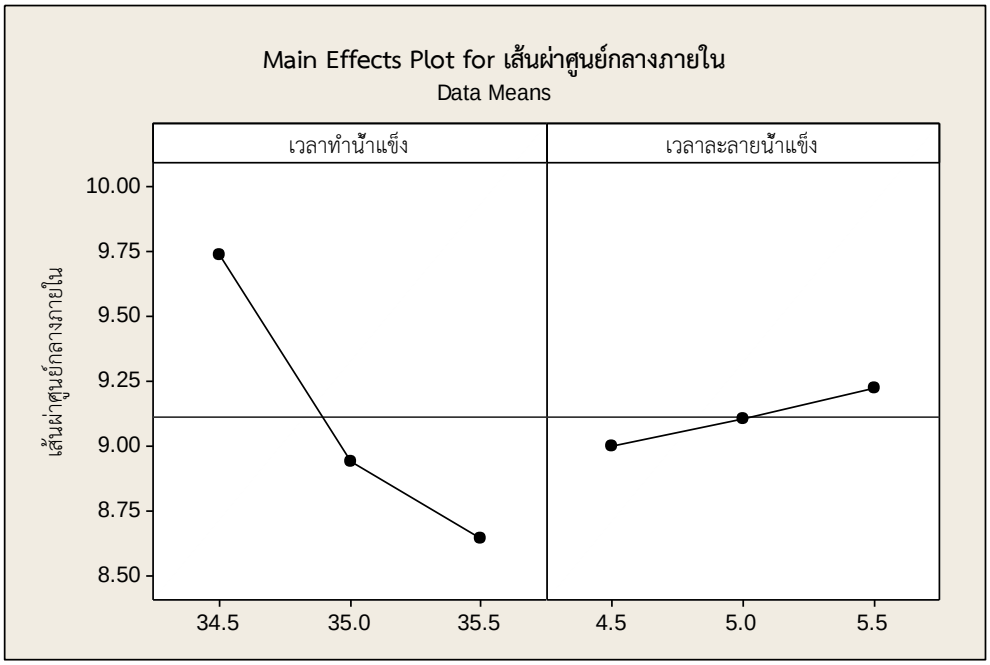
จากตารางการออกแบบการทดลองข้างต้น นำมาทำการทดลองตามลำดับที่การทดลองตามการสุ่ม ก็จะได้ผลของตัวแปรตอบสนอง โดยตัวแปรตอบสนองที่ทำการพิจารณามีดังนี้ เวลาทำน้ำแข็ง, เวลาละลายน้ำแข็ง, ปริมาณน้ำแข็ง, พลังงาน, อัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต

5.2.5 ผลการทดลอง

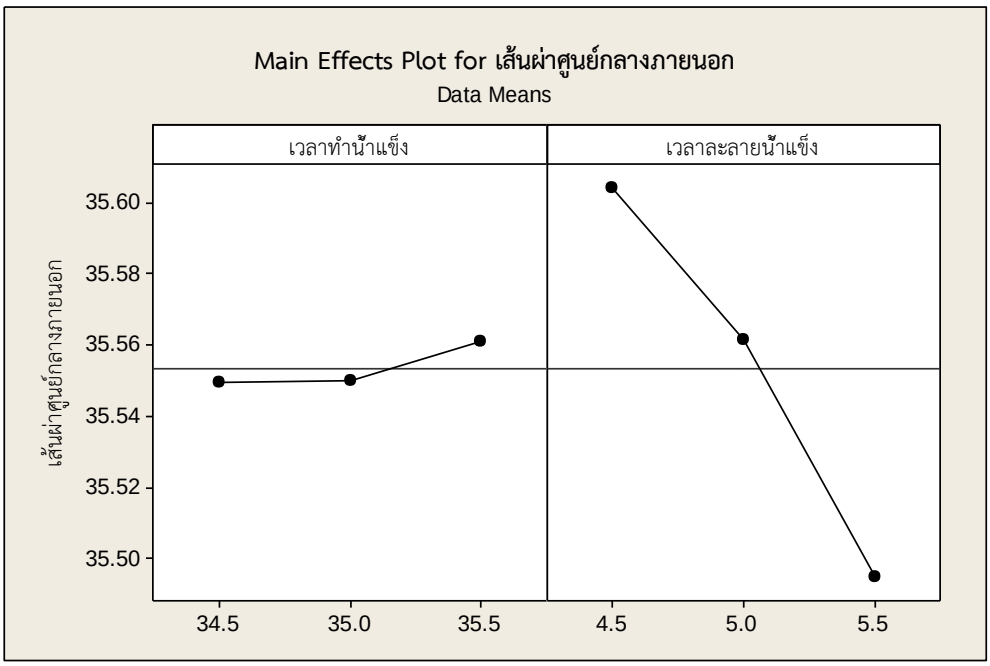
จากการเลือกปัจจัยการปรับตั้งที่มีผลต่อขนาดน้ำแข็งหลอด และกำหนดค่าระดับของปัจจัย จึงเป็นการศึกษาเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่มีต่อขนาดน้ำแข็งหลอด โดยทำการทดลองที่เวลาทำน้ำแข็งเท่ากับ 34.50, 35.00 และ 35.50 นาที ส่วนเวลาละลายน้ำแข็งเท่ากับ 4.50, 5.00 และ 5.50 นาที ซึ่งการทดลองจะทำตามตารางการออกแบบการทดลองข้างต้น เพื่อศึกษาผลของเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่มีต่อขนาดน้ำแข็งหลอด รวมทั้งศึกษาผลของเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่ออัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดไม่ตรงตามเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า และใช้ในการเลือกเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่เหมาะสม โดยจะใช้โปรแกรม Minitab 16 ในการรันข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง โดยจะพิจารณาผลในด้านปัจจัยหลัก (Main Effect) และด้านอันตรกิริยา (Interaction Effect) ผลจากการทดลองที่ได้จากภาคผนวก จ เมื่อรันด้วยโปรแกรม Minitab 16 สามารถแสดงได้ดังนี้

1. ผลของปัจจัยหลัก (Main Effect)

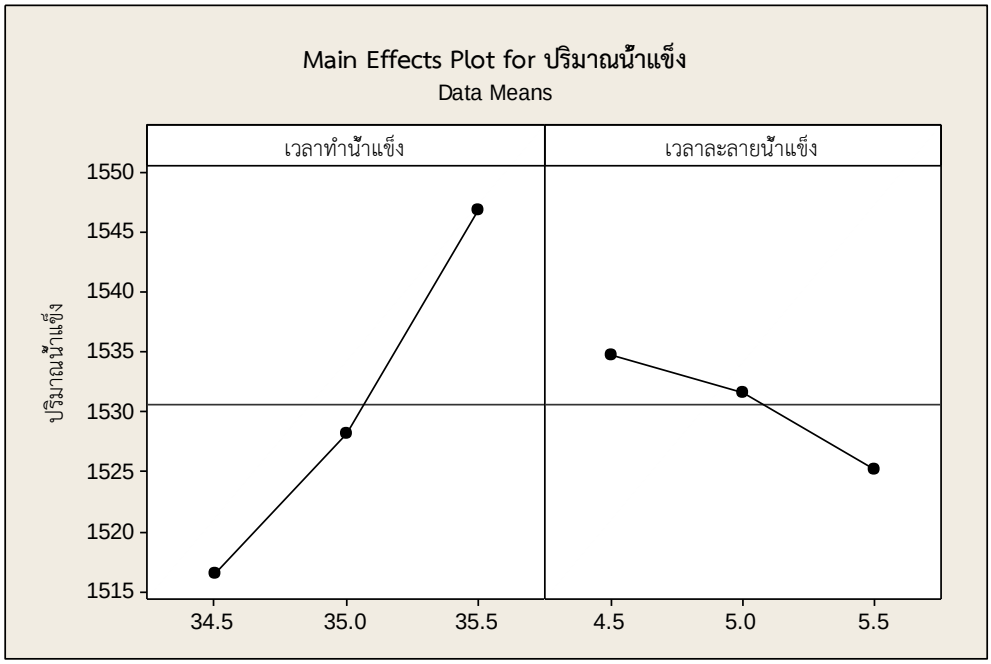
ผลที่ได้จากการทดลอง เมื่อรันด้วยโปรแกรม Minitab 16 จะได้ผลของเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็ง ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองดังนี้



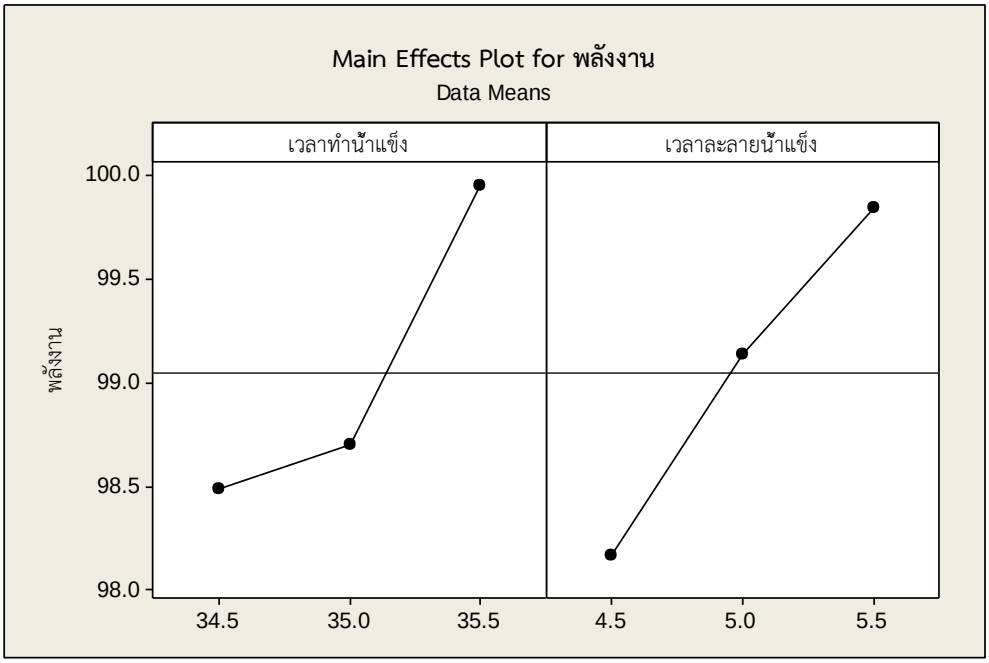
รูปที่ 5.7 เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน



รูปที่ 5.8 เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก



รูปที่ 5.9 เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำแข็ง



รูปที่ 5.10 เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อพลังงาน

จากรูปที่ 5.7 แสดงถึงเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน พบว่าเมื่อเวลาทำน้ำแข็งเพิ่มขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางภายในมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเวลาทำน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้น้ำมีเวลาเป็นน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้น ความหนาของน้ำแข็งจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเล็กลง

ส่วนเมื่อเวลาละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในมีแนวโน้มคงที่ โดยสามารถยืนยันผลได้จากการทดสอบ One-way ANOVA ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายในกับเวลาละลายน้ำแข็ง ได้ผลดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ผล One-way ANOVA ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายในกับเวลาละลายน้ำแข็ง

Source	DF	SS	MS	F	P
เวลาทำน้ำแข็ง	2	0.357	0.179	0.74	0.481
Error	42	10.083	0.24		
Total	44	10.44			

จากตารางที่ 5.9 แสดงถึงผลจากการทดสอบ One-way ANOVA ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายในกับเวลาละลายน้ำแข็ง พบว่าค่า P-value (0.481) มีค่ามากกว่า α (0.05) จึงสามารถสรุปผลได้ว่ายอมรับสมมติฐาน H_0 คือที่เวลาละลายน้ำแข็งแตกต่างกัน ส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลางภายในมีค่า

เท่ากัน ดังนั้นจากการพิจารณาผลของเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่มีต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในจะพบว่า เวลาทำน้ำแข็งมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในอย่างชัดเจน ส่วนเวลาละลายน้ำแข็งไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน

จากรูปที่ 5.8 แสดงถึงเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก พบว่าเวลาทำน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้นเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกมีแนวโน้มคงที่ โดยสามารถยืนยันผลได้จากการทดสอบ One-way ANOVA ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกกับเวลาทำน้ำแข็ง แสดงได้ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ผล One-way ANOVA ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกกับเวลาทำน้ำแข็ง

Source	DF	SS	MS	F	P
เวลาทำน้ำแข็ง	2	0.0013	0.0006	0.04	0.96
Error	42	0.6504	0.0155		
Total	44	0.6516			

จากตารางที่ 5.10 แสดงถึงผลจากการทดสอบ One-way ANOVA ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกกับเวลาทำน้ำแข็ง พบว่าค่า P-value (0.96) มีค่ามากกว่า α (0.05) จึงสามารถสรุปผลได้ว่ายอมรับสมมติฐาน H_0 คือที่เวลาทำน้ำแข็งแตกต่างกัน ส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกมีค่าเท่ากัน

และเมื่อพิจารณาเวลาละลายน้ำแข็ง พบว่าเมื่อเวลาละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกลดลง เนื่องจากการละลายน้ำแข็งใช้แก๊สแอมโมเนียที่มีอุณหภูมิสูง จึงส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกลดลงเล็กน้อย ดังนั้นจากการพิจารณาผลของเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่มีต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกพบว่า เวลาทำน้ำแข็งไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก ส่วนเวลาละลายน้ำแข็งจะส่งผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากรูปที่ 5.9 แสดงถึงเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำแข็ง พบว่า เมื่อเวลาทำน้ำแข็งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากน้ำมีเวลาเป็นน้ำแข็งมากขึ้น ความหนาของน้ำแข็งจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำแข็งที่ผลิตได้เพิ่มสูงขึ้น ส่วนเมื่อเวลาละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำแข็งลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการละลายน้ำแข็งใช้แก๊สแอมโมเนียที่มีอุณหภูมิสูง ส่งผลให้น้ำแข็งละลายออกไปบางส่วน ปริมาณน้ำแข็งจึงลดลงเล็กน้อย ดังนั้นจากการพิจารณาผลของเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่มีต่อปริมาณน้ำแข็งพบว่าเวลาทำน้ำแข็งมีผลต่อปริมาณน้ำแข็งอย่างชัดเจน ส่วนเวลาละลายน้ำแข็งจะส่งผลต่อปริมาณน้ำแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากรูปที่ 5.10 แสดงถึงเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อพลังงานพบว่า เมื่อเวลาทำน้ำแข็งเพิ่มขึ้นส่งผลให้พลังงานที่ใช้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเวลาละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พลังงานที่ใช้เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจากการพิจารณาผลของเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่มีต่อพลังงานพบว่า เวลาทำน้ำแข็งมีผลต่อพลังงานอย่างชัดเจน ส่วนเวลาละลายน้ำแข็งมีส่งผลต่อพลังงานอย่างชัดเจนเช่นกัน

จากผลการวิเคราะห์ถึงเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็ง (ปัจจัยหลัก) ที่มีผลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน, เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก, ปริมาณน้ำแข็ง และพลังงาน (ตัวแปรตอบสนอง) ข้างต้น จึงสามารถสรุปผลได้ดังนี้

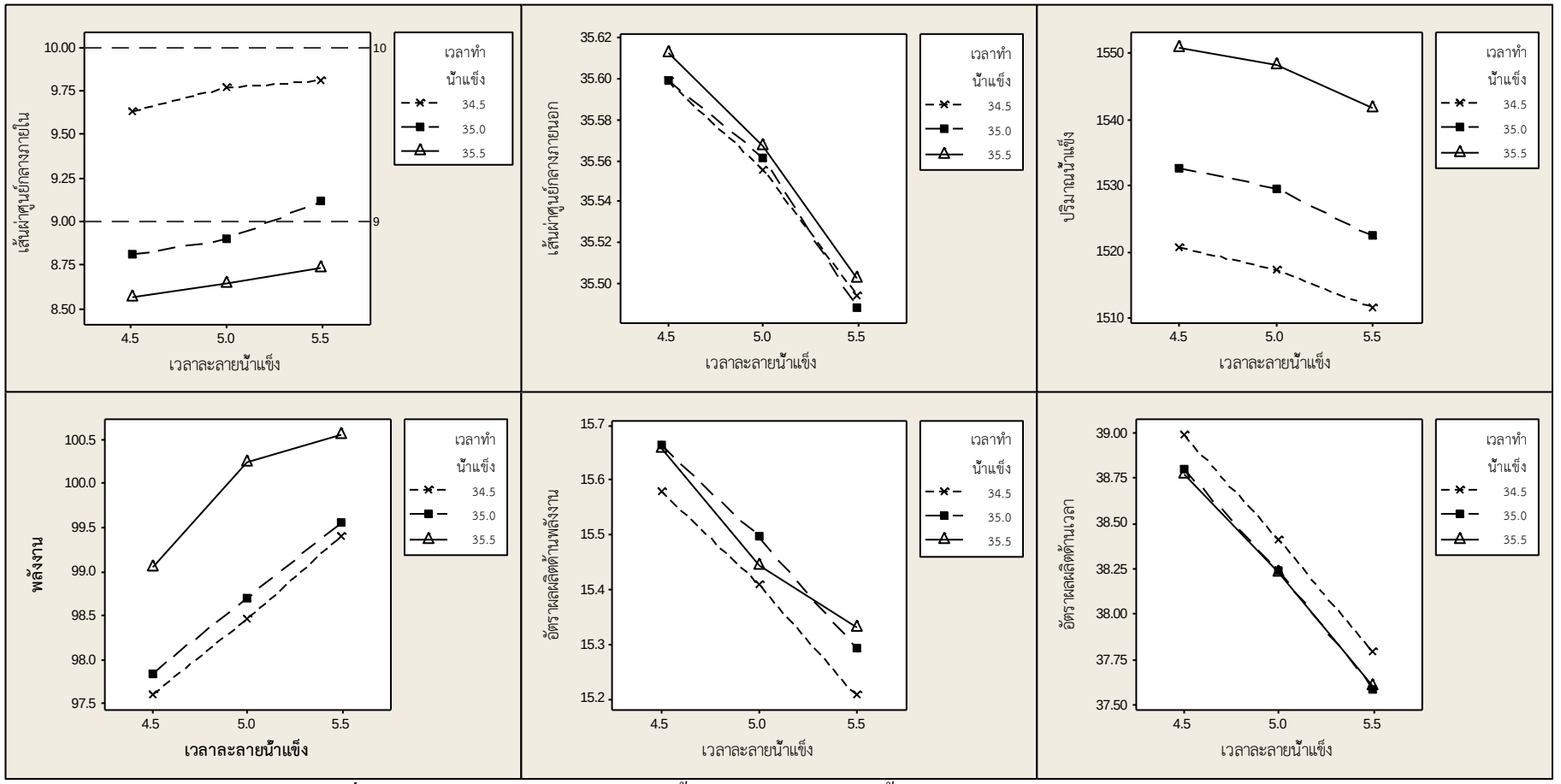
ตารางที่ 5.11 ผลวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง

		ปัจจัยหลัก			
		เวลาทำน้ำแข็ง		**เวลาละลายน้ำแข็ง**	
		เพิ่มขึ้น	**ลดลง**	**เพิ่มขึ้น**	**ลดลง**
ตัวแปรตอบสนอง	**เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน**	เพิ่มขึ้น	ลดลง	คงที่	คงที่
	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก	คงที่	คงที่	ลดลง	เพิ่มขึ้น
	ปริมาณน้ำแข็ง	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น
	พลังงาน	เพิ่มขึ้น	ลดลง	เพิ่มขึ้น	ลดลง

จากตารางที่ 5.11 แสดงผลวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง จะเห็นว่าเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็ง มีผลต่อขนาดน้ำแข็งหลอด โดยเวลาทำน้ำแข็งจะมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่านั้น ส่วนเวลาละลายน้ำแข็งจะมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่านั้น ส่วนปริมาณน้ำแข็งที่ผลิตได้จะแปรผันตรงกับเวลาทำน้ำแข็ง แต่แปรผกผันกับเวลาละลายน้ำแข็ง และพลังงานจะแปรผันตรงกับเวลาทำน้ำแข็ง แต่แปรผกผันกับเวลาละลายน้ำแข็งเช่นกัน จากผลของปัจจัยหลักจึงทำการวิเคราะห์ผลของอันตรกิริยาระหว่างเวลาทำน้ำแข็งกับเวลาละลายน้ำแข็งที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หาผลระหว่างเวลาทำน้ำแข็งกับเวลาละลายน้ำแข็งที่ดีที่สุด ที่ทำให้ได้ขนาดน้ำแข็งอยู่ในเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า รวมทั้งพิจารณาผลของตัวชี้วัด คืออัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตด้วย

2. ผลของอันตรกิริยา (InteractionEffect)

จากการทดลอง เมื่อรันด้วยโปรแกรม Minitab 16 ทำการวิเคราะห์ผลของอันตรกิริยาระหว่างเวลาทำน้ำแข็งกับเวลาละลายน้ำแข็ง ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองต่างๆ ผลที่ได้เป็นดังนี้



รูปที่ 5.11 อันตรกิริยาระหว่างเวลาทำน้ำแข็งกับเวลาละลายน้ำแข็งต่อตัวแปรตอบสนองต่างๆ

จากรูปที่ 5.11 แสดงถึงอันตรกิริยาระหว่างเวลาทำน้ำแข็งกับเวลาละลายน้ำแข็งต่อตัวแปรตอบสนองต่างๆ โดยตัวแปรตอบสนองคือเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน, เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก, ปริมาณน้ำแข็ง, พลังงาน, อัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเลาการผลิต พบว่าเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่ทำให้การผลิตมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอดอยู่ในเกณฑ์ทั้งของโรงงาน (9 - 10 มิลลิเมตร) และของลูกค้า (9.25 - 10.25 มิลลิเมตร) คือการผลิตน้ำแข็งหลอดที่เวลาทำน้ำแข็งเท่ากับ 34.50 นาที ณ เวลาละลายน้ำแข็งทั้ง 3 เวลา (4.50, 5.00 และ 5.50 นาที) ส่วนเวลาละลายน้ำแข็งที่ทำให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกสูงที่สุดคือ เวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที ณ เวลาทำน้ำแข็งทั้ง 3 เวลา (34.50, 35.00 และ 35.50 นาที) ทั้งนี้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งหลอดจะไม่ส่งผลในการวิเคราะห์มากนัก เนื่องจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่มีผลต่อเวลาละลายน้ำแข็งนั้นน้อยมาก โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยสายตา ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลด้านขนาดน้ำแข็งหลอด จึงทำการพิจารณาผลในด้านของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอดเป็นหลัก

เมื่อพิจารณาอัตราผลผลิตด้านพลังงาน พบว่าเวลาทำน้ำแข็งที่ 35.00 นาที ณ เวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที เป็นเวลาทำน้ำแข็งที่ทำให้ได้อัตราผลผลิตด้านพลังงานสูงที่สุด รองลงมาคือเวลาทำน้ำแข็งที่ 35.50 นาที ณ เวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที และเวลาทำน้ำแข็งที่ 34.50 นาที ณ เวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่เวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที ส่งผลให้ได้อัตราผลผลิตด้านพลังงานสูงที่สุด ณ เวลาทำน้ำแข็งทั้ง 3 เวลา (34.50, 35.00 และ 35.50 นาที) และเมื่อพิจารณาอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต พบว่าเวลาทำน้ำแข็งที่ 34.50 นาที ณ เวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที เป็นเวลาทำน้ำแข็งที่ทำให้ได้อัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตสูงที่สุด รองลงมาคือเวลาทำน้ำแข็งที่ 35.00 นาที ณ เวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที และเวลาทำน้ำแข็งที่ 35.50 นาที ณ เวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่เวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที ส่งผลให้ได้อัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตสูงที่สุด ณ เวลาทำน้ำแข็งทั้ง 3 เวลา (34.50, 35.00 และ 35.50 นาที)

จากผลที่ได้จึงสามารถทำการเลือกเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่เหมาะสมต่อขนาดน้ำแข็งหลอดได้ โดยเลือกจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งหลอดที่อยู่ในเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า รวมไปจนถึงอัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต ที่เหมาะสม ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ข้างต้น เมื่อทำการพิจารณาความเหมาะสมทั้งในด้านขนาดน้ำแข็งหลอด ไปจนถึงอัตราผลผลิตทั้งในด้านพลังงานและเวลาการผลิตพบว่า เวลาทำน้ำแข็ง 34.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที เป็นเวลาการผลิตน้ำแข็งหลอดที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการผลิตน้ำแข็งหลอด เนื่องจากทำให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอดอยู่ในเกณฑ์

ของโรงงานและลูกค้า ทั้งยังสามารถลดพลังงานจากการผลิตน้ำแข็งหลอดลงได้ และสามารถเพิ่มอัตราผลผลิตด้านพลังงานและอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตได้อีกด้วย ซึ่งผลของเวลาทำน้ำแข็งและเวลาละลายน้ำแข็งที่เหมาะสม แสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 5.12 ผลของเวลาการผลิตน้ำแข็งหลอดที่เหมาะสม

เวลาการผลิตน้ำแข็งหลอด	การผลิตปัจจุบัน	เวลาการผลิตน้ำแข็งหลอดที่เหมาะสม
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	35.50	34.50
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	5.00	4.50

ทั้งนี้เมื่อนำเวลาการผลิตน้ำแข็งหลอดที่เหมาะสม (เวลาทำน้ำแข็ง 34.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที)ข้างต้นมาใช้งาน จะได้ผลของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้ภายหลังการศึกษา จึงทำการเปรียบเทียบผลของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอดที่ได้ระหว่างเกณฑ์ของโรงงาน, เกณฑ์ของลูกค้า ก่อนการศึกษา และหลังการศึกษาได้ดังนี้

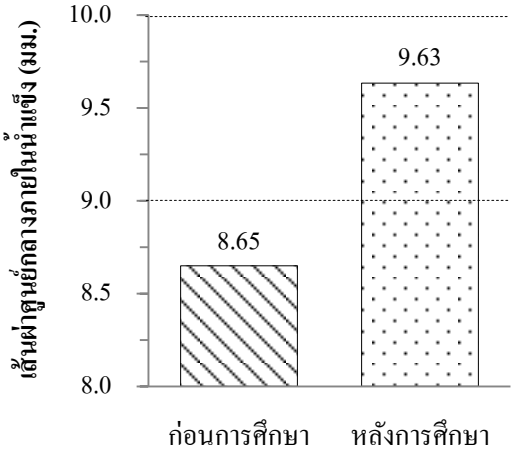
ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบผลของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในหลังการศึกษา

	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (มม.)
เกณฑ์ของโรงงาน	9.5 ± 0.5
เกณฑ์ของลูกค้า	9.75 ± 0.5
ก่อนการศึกษา	8.65 ± 0.13
หลังการศึกษา	9.63 ± 0.14

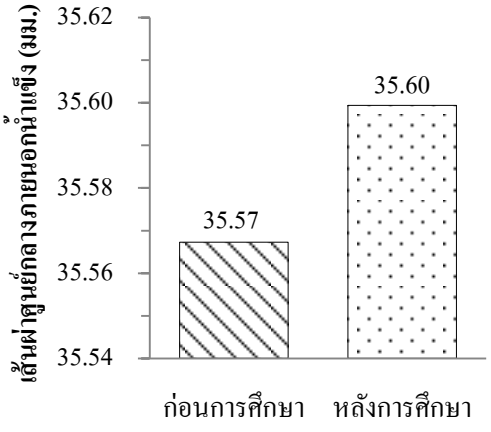
จากผลที่ได้ข้างต้นจะเห็นว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้ภายหลังการศึกษามีขนาดอยู่ในเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า จึงสามารถยอมรับว่าเวลาทำน้ำแข็ง 34.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที เป็นเวลาการผลิตที่เหมาะสม และสามารถนำมาใช้งานในการผลิตน้ำแข็งหลอดได้ จากสภาวะการผลิตดังกล่าว คือเวลาทำน้ำแข็ง 34.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็ง 4.50 นาที นำมาทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการปรับปรุงต่อไป

5.2.6 ผลการเปรียบเทียบภายหลังการศึกษา

จากการประเมินผลการทดลองที่ได้ พบว่าสามารถทำการปรับปรุงปัญหาน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในไม่ตรงตามเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้าได้โดยการปรับเวลาทำน้ำแข็งที่ 34.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็งที่ 4.50 นาที จะทำให้ได้ขนาดน้ำแข็งหลอดอยู่ในเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า ซึ่งจากผลที่ได้จากการปรับเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งดังกล่าว นำมาเปรียบเทียบกับผลก่อนการปรับปรุง นั่นคือการผลิตในปัจจุบัน โดยมีเวลาทำน้ำแข็งที่ 35.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็งที่ 5.00 นาที เพื่อให้เห็นผลของความแตกต่างที่ได้ภายหลังการศึกษา ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบในด้านเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของน้ำแข็งหลอด, เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของน้ำแข็งหลอด, อัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต โดยผลจากการเปรียบเทียบแสดงได้ดังนี้

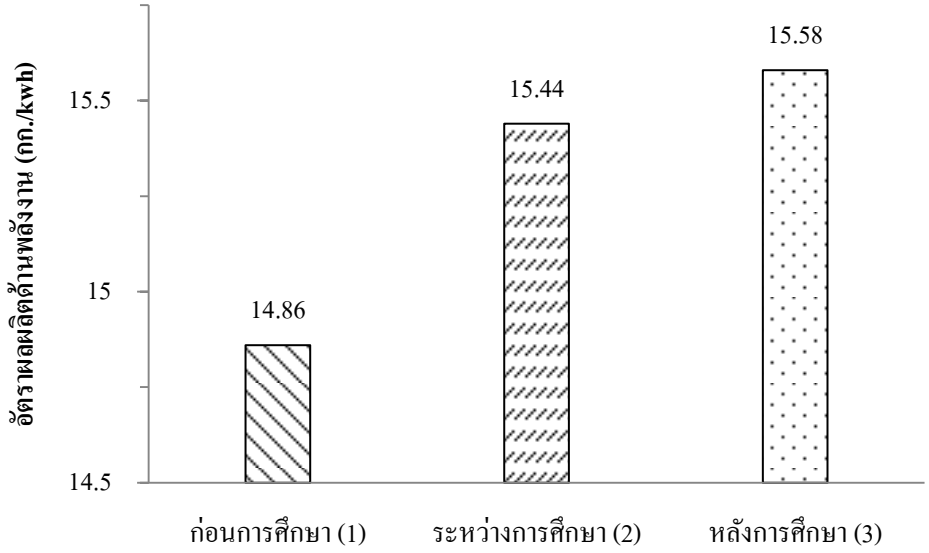


รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบผลเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งก่อนการศึกษา และหลังการศึกษา

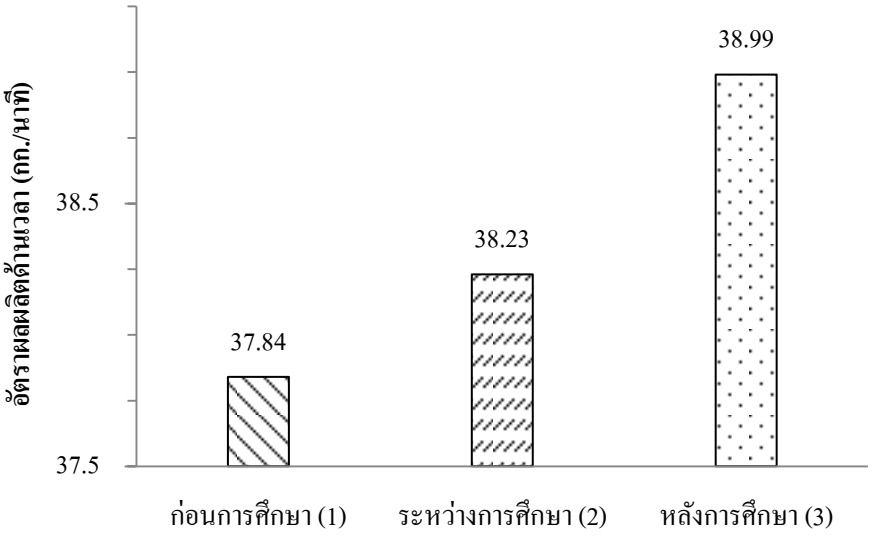


รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบผลเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกน้ำแข็งก่อนการศึกษา และหลังการศึกษา

จากรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 แสดงถึงผลการเปรียบเทียบเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอกน้ำแข็ง ก่อนและหลังการศึกษา พบว่าหลังการศึกษาเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้ำแข็งอยู่ในเกณฑ์ที่โรงงานกำหนด และตรงตามความต้องการของลูกค้า โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจากเดิม 8.65 เป็น 9.63 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบผลอัตราผลผลิตด้านพลังงานก่อนการศึกษา - หลังการศึกษา



รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบผลอัตราผลผลิตด้านเวลาก่อนการศึกษา - หลังการศึกษา

จากรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 แสดงถึงผลการเปรียบเทียบอัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลา ก่อนการศึกษา - หลังการศึกษา พบว่าผลจากการปรับปรุงในมาตรการที่ 1 คือการปรับปรุงปัญหาการสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง (ก่อนการศึกษาถึงระหว่างการศึกษา) ทำให้อัตราผลผลิตด้านพลังงานเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม 14.86 เป็น 15.44 กก./kwh คิดเป็นอัตราผลผลิตด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้น 0.58 กก./kwh เนื่องจากมีการนำน้ำเย็นทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำกลับมาใช้ทำน้ำแข็ง จึงเป็นการลดการใช้พลังงานในการทำน้ำแข็งลงได้บางส่วน ส่วนผลในมาตรการที่ 2 คือการปรับปรุงปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น (ระหว่างการศึกษาถึงหลังการศึกษา) ทำให้อัตราผลผลิตด้านพลังงานเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม 15.44 เป็น 15.58 กก./kwh คิดเป็นอัตราผลผลิตด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้น 0.14 กก./kwh เนื่องจากมีการปรับเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งลง จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการทำน้ำแข็งลดลง อัตราผลผลิตด้านพลังงานที่ได้จึงเพิ่มสูงขึ้น

ส่วนอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต พบว่าผลจากการปรับปรุงในมาตรการที่ 2 คือการปรับปรุงปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น (ก่อนการศึกษาถึงหลังการศึกษา) ทำให้อัตราผลผลิตด้านพลังงานเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม 37.84 เป็น 38.99 กก./นาที คิดเป็นอัตราผลผลิตด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้น 1.15 กก./นาที เนื่องจากมีการปรับเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งลง เวลาที่ใช้ในการผลิตจึงลดลง ส่งผลให้อัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตเพิ่มสูงขึ้น

ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบผลภายหลังการศึกษาทั้งหมดข้างต้น สามารถสรุปผลการเพิ่มอัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตได้ดังนี้

ตารางที่ 5.14 ผลการเพิ่มขึ้นของอัตราผลผลิตด้านพลังงาน และเวลาภายหลังการศึกษา

มาตรการที่	**การเพิ่มขึ้นของอัตราผลผลิต**	
	ด้านพลังงาน (กก./kwh)	**ด้านเวลาการผลิต (กก./นาที)**
1	0.58 (3.9 %)	-
2	0.14 (0.9 %)	1.15 (3 %)
รวม	0.72 (4.9 %)	1.15 (3 %)

จากตารางที่ 5.14 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของอัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตภายหลังการศึกษา พบว่าภายหลังการศึกษาทั้งหมด โดยการปรับปรุงแก้ไขปัญหาความสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง (มาตรการที่ 1) และปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น (มาตรการที่ 2) นั้น ส่งผลให้สามารถเพิ่มอัตราผลผลิตด้านพลังงาน และอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตขึ้นได้ ซึ่งผลรวมของอัตราผลผลิตด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้น ภายหลังการศึกษาทั้งหมดเท่ากับ 0.72 กก./kwh คิด

เป็น 4.85 % ส่วนอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้น ภายหลังการศึกษาทั้งหมดเท่ากับ 1.15 กก./นาที คิดเป็น 3.04 %

5.2.7 คำนวณค่าใช้จ่าย

จากการปรับปรุงปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดไม่ตรงตามเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า โดยทำการปรับเวลาทำน้ำแข็งที่ 34.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็งที่ 4.50 นาที หรือมีเวลาการผลิตน้ำแข็งทั้งหมด 39 นาที จะทำให้ได้ขนาดน้ำแข็งหลอดอยู่ในเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า ซึ่งจากการผลิตเดิมจะมีเวลาการผลิตน้ำแข็งทั้งหมด 40.50 นาที ทำให้ลดพลังงานลงจากเดิม 100.25 เป็น 97.6 kwh/รอบการผลิต จึงสามารถลดพลังงานลงได้ 2.65 kwh/รอบการผลิต และทำการคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลงได้ โดยคำนวณจากสมการ (3.1) จึงจะได้ค่าใช้จ่ายที่ลดลงเนื่องจากการปรับปรุงปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดไม่ตรงตามเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้าเป็นดังนี้

ค่าไฟฟ้าฐาน = (2.65 kwh) * (2.176 บาท/kwh)

ค่าไฟฟ้าฐาน = 5.77 บาท/รอบการผลิต

ดังนั้น จากการการปรับเวลาทำน้ำแข็งที่ 34.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็งที่ 4.50 นาที พบว่า สามารถลดพลังงานลงได้ 2.65 kwh/รอบการผลิต และคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลงได้ 5.77 บาท/รอบการผลิต

5.3 การประเมินผลประหยัด

จากการศึกษาวิจัยทั้งหมดข้างต้น พบว่าภายหลังการปรับปรุงปัญหาน้ำเย็นทิ้ง (มาตรการที่ 1) และปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น (มาตรการที่ 2)นั้น ส่งผลให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายทั้งทางด้านพลังงาน และน้ำลงได้ โดยค่าใช้จ่ายดังกล่าวหาได้จากการคำนวณค่าใช้จ่ายของพลังงาน และน้ำข้างต้น ซึ่งจากการปรับปรุงปัญหาทั้งหมดที่เกิดขึ้นทำให้สามารถประเมินผลประหยัดทั้งหมดที่ได้จากการปรับปรุงนั้นๆ ดังต่อไปนี้ ผลจากการแก้ไขปัญหาน้ำเย็นทิ้ง ทำให้ประหยัดปริมาณน้ำเย็นทิ้งที่มีอุณหภูมิ 1.76 องศาเซลเซียส ลงได้ 304.24 ลิตร คิดเป็นพลังงานที่ประหยัดได้เท่ากับ 2.87 kwh/รอบการผลิต คำนวณเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ลดลงได้เท่ากับ 6.25 บาท/รอบการผลิต และคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายของน้ำที่ลดลงได้เท่ากับ 34.38 บาท/รอบการผลิต และผลจากการแก้ไขปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น ส่งผลให้สามารถลดเวลาการผลิตน้ำแข็งทั้งหมดลงได้ โดยจากเดิมมีเวลาการผลิตน้ำแข็งทั้งหมด 40.50 นาที เป็น 39 นาที ทำให้ประหยัดพลังงานลงได้ 2.65 kwh/รอบการผลิต คำนวณเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ลดลงได้เท่ากับ 5.77 บาท/รอบการผลิต

ทั้งนี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่า จากผลการปรับปรุงทั้งหมดข้างต้น สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายทั้งด้านพลังงาน และน้ำ ทั้งหมดได้ดังนี้

ผลประหยัดรวม = ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน + ค่าใช้จ่ายของน้ำ

= (6.25 + 5.77) + 34.38

= 46.4 บาท/รอบ

ดังนั้น ภายหลังจากการปรับปรุงปัญหาน้ำเย็นทิ้ง และปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น ทำให้ผลประหยัดจากการปรับปรุงทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 46.4 บาท/รอบการผลิต โดยผลที่ได้จากการประหยัดทั้งหมดภายหลังจากการศึกษาสามารถแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 5.15 ผลประหยัดรวมภายหลังการศึกษา

มาตรการที่	**ค่าใช้จ่าย (บาท)**	
	พลังงาน	**น้ำ**
1	6.25	34.38
2	5.77	-
รวม	12.02	34.38
รวมผลประหยัดทั้งหมด	46.4	

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการลดพลังงานในโรงงานผลิตน้ำแข็งหลอด โดยทำการศึกษากระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดเพื่อศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งทำการแก้ไขปัญหานั้น ทั้งนี้จากการเข้าสำรวจและทำการเก็บข้อมูลภายในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดของโรงงานตัวอย่างพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ปัญหาน้ำเย็นทิ้ง และปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น โดยจากปัญหาน้ำเย็นทิ้งจะทำการศึกษาสมดุลระหว่างน้ำเข้าและน้ำออก วิเคราะห์หาสาเหตุของการสูญเสียน้ำเย็นทิ้งเพื่อจัดทำแนวทางในการลดความสูญเสียน้ำเย็นทิ้ง และทำการปรับปรุงเพื่อลดความสูญเสียนั้น และคำนวณค่าใช้จ่ายที่ได้ภายหลังการปรับปรุงความสูญเสียที่เกิดขึ้น

ส่วนปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น จะทำการศึกษาภายหลังการปรับปรุงปัญหาน้ำเย็นทิ้งไปแล้ว โดยจะเป็นการศึกษาเพื่อทำให้โรงงานสามารถผลิตน้ำแข็งหลอดได้ตามเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า การวิจัยนี้จึงเริ่มจากการกำหนดขนาดน้ำแข็งหลอดของลูกค้า ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดน้ำแข็งหลอดและเลือกปัจจัยที่มีผลต่อขนาดน้ำแข็งหลอด จากนั้นจึงกำหนดระดับของปัจจัยและออกแบบการทดลองเพื่อทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งที่นำมาทำการทดลองคือ เวลาทำน้ำแข็ง 34.50, 35.00 และ 35.50 นาที, เวลาละลายน้ำแข็ง 4.50, 5.00 และ 5.50 นาที ทั้งนี้ผลที่ได้จากการทดลองนั้นจะใช้อัตราผลผลิตด้านพลังงานและอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตเป็นตัวชี้วัด เพื่อเป็นตัวแปรที่นำมาใช้ในการตัดสินใจ แล้วทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง พร้อมทั้งคำนวณค่าใช้จ่ายภายหลังการปรับปรุง

ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการลดความสูญเสีย และเพิ่มคุณภาพของสินค้า โดยจะช่วยในด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นต้นทุนในการผลิตน้ำแข็งหลอด ทั้งนี้ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในมาตรการที่ 1 จากปัญหาการสูญเสียน้ำเย็นทิ้งที่เกิดขึ้น จึงนำน้ำเย็นทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ได้โดยการนำแนวทางที่ 3 มาใช้งานจริงนั่นคือ การปรับระดับลูกลอย ส่งผลทำให้ลดปริมาณน้ำเย็นทิ้งลงได้จากเดิม 401 ลิตร/รอบการผลิต เป็น 96.76 ลิตร/รอบการผลิต ปริมาณน้ำเย็นทิ้งที่ลดลงคิดเป็น 76% ของน้ำเย็นทิ้งทั้งหมด จากการปรับปรุงทำให้ลดพลังงานลงได้จากเดิม 103.12 kwh/รอบการผลิต เป็น 100.25 kwh/รอบการผลิต จึงประหยัดพลังงานลง 2.87 kwh/รอบการผลิต คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่ากับ 6.25 บาท/รอบการผลิต และค่าใช้จ่ายของน้ำเท่ากับ 34.38 บาท/รอบการผลิต

2. ในมาตรการที่ 2 จากปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดโตเกินจำเป็น จึงทำการทดลองได้ผลดังนี้ เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็ง ที่สามารถทำให้น้ำแข็งหลอดที่ผลิตได้อยู่ในเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า คือเวลาทำน้ำแข็งเท่ากับ 34.50 นาที และเวลาละลายน้ำแข็งเท่ากับ 4.50 นาที นั่นคือมีเวลาการผลิตน้ำแข็งทั้งหมด 39 นาที ซึ่งสามารถลดเวลาการผลิตน้ำแข็งทั้งหมดจากเดิม 40.50 นาที เป็น 39 นาที คิดเป็นเวลาการผลิตทั้งหมดที่ลดลงได้ 1.50 นาที โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่ได้คือ 9.63 มิลลิเมตร ทำให้ลดพลังงานลงจากเดิม 100.25 เป็น 97.6 kwh ซึ่งลดลงเท่ากับ 2.65 kwh คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่ากับ 5.77 บาท/รอบการผลิต
3. ผลจากการปรับเวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งเท่ากับ 34.50 และ 4.50 นาที ตามลำดับ ส่งผลให้ภายหลังการศึกษา (หลังการปรับปรุงทั้ง 2 มาตรการ) มีอัตราผลผลิตด้านพลังงานเพิ่มขึ้นจากเดิม 14.86 เป็น 15.58 กิโลกรัม/kwh นั่นคืออัตราผลผลิตด้านพลังงานเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.72 กิโลกรัม/kwh คิดเป็น 4.9% และมีอัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตเพิ่มขึ้นจากเดิม 37.84 เป็น 38.99 กิโลกรัม/นาที นั่นคืออัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิตเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.15 กิโลกรัม/นาที คิดเป็น 3%
4. ภายหลังจากการปรับปรุงปัญหาน้ำเย็นทิ้ง และปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดไม่ตรงตามเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า พบว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายทั้งด้านพลังงาน และน้ำรวมเท่ากับ 46.4 บาท/รอบการผลิต

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยควบคุมแปรผันคือ เวลาทำน้ำแข็ง และเวลาละลายน้ำแข็งเท่านั้น ซึ่งสามารถทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยอื่นคือ เวลาจ่ายแอมโมเนีย โดยอาจจะเป็นการศึกษาทางด้านผลกระทบของเวลาจ่ายแอมโมเนียที่มีผลต่อการเกิดน้ำแข็งหลอด และเวลาเปิดปิดพัดลมคูลลิ่ง และเวลาตัดน้ำแข็ง โดยอาจจะเป็นการศึกษาเพื่อหาเวลาเปิดปิดพัดลมคูลลิ่ง และเวลาตัดน้ำแข็งที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอด
2. เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดมีข้อจำกัดหลายด้านๆ ทำให้อาจจะมีความคาดเคลื่อนในการวัดเกิดขึ้นได้เล็กน้อย
3. งานวิจัยนี้มิได้ศึกษาผลของความหนาของน้ำแข็งโดยตรง เนื่องจากการวัดความหนาของน้ำแข็งโดยตรงจะได้ข้อมูลที่มีความเบี่ยงเบนสูง จึงอาจทำการศึกษาผลของความหนาน้ำแข็งควบคู่กันไป โดยใช้เครื่องมือในการวัดที่แม่นยำมากขึ้น

4. สามารถนำผลของอุณหภูมิ และความดันของแอมโมเนียภายในกระบวนการผลิตน้ำแข็งหลอดมาศึกษาเพิ่มเติม ซึ่งส่งผลให้สามารถทราบถึงผลของอุณหภูมิ และความดันของแอมโมเนียที่มีต่ออัตราการทำความเย็น และความหนาน้ำแข็งที่เกิดขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เซนเกล, ยูนัส เอ. เทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics). แปลโดย สมชัย อัครทิวา และ ขวัญจิต วงษ์ชารี. กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล, 2544.

วันชัย ริจิรวนิช, การเพิ่มผลผลิตในอุตสาหกรรม เทคนิคและกรณีศึกษา. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

นันทวัฒน์ ไพรัชเวทย์. การศึกษาเชิงเลขของผลกระทบของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ออัตราการผลิตน้ำแข็งหลอด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ภูวนาถ กาบคำ. การศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งหลอด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ภาษาอังกฤษ

A. E. Carte. Air bubbles in ice. Proc. Phys. Soc 77 (1960) : 757-768.

Tangthieng, C. Effect of tube diameter on the specific energy consumption of the ice making process. Applied Thermal Engineering 31 (2011) : 701-707.

J.D. Zhao, N. Liu, and Y.M. Kang. Optimization of ice making period for ice storage system with flake ice maker. Energy and Buildings 40 (2008) : 1623–1627.

Nobuhiko Azuma, Tutomu Miyakoshi, Syuhei Yokoyama and Morimasa Takata. Impeding effect of air bubbles on normal grain growth of ice. Journal of Structural Geology 42 (2012) : 184-193.

Montgomery, DC. Design and Analysis of Experiment. 6th ed. New York: Wiley, 2005.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการผลิตในปัจจุบัน

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการผลิตในปัจจุบัน

	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (มม.)	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (มม.)	kwh	ปริมาณน้ำแข็ง (กก./รอบ)	น้ำเข้า (ล.)	น้ำเย็นทิ้ง (ล.)
Lot 1	9.02 ± 0.14	35.58 ± 0.11	102.98	1,556.35	1,975.78	399.83
Lot 2	8.73 ± 0.10	35.62 ± 0.12	102.78	1,560.60	1,979.74	400.44
Lot 3	8.79 ± 0.11	35.56 ± 0.10	103.45	1,548.65	1,975.07	404.92
Lot 4	8.91 ± 0.13	35.53 ± 0.09	103.50	1,557.70	1,980.03	399.93
Lot 5	8.87 ± 0.12	35.59 ± 0.09	102.9	1,559.60	1,979.61	399.91
ค่าเฉลี่ย	8.86	35.58	103.12	1556.58	1,978.04	401.00
ค่าเบี่ยงเบน	0.12	0.10	0.33	4.73	2.41	2.20
C.V. (%)	1.35	0.29	0.32	0.30	0.12	0.55

ภาคผนวก ข
การหาจำนวนการทดลองซ้ำโดยวิธี Operation Characteristic Curves

ตารางที่ ข.1 การหาจำนวนการทดลองซ้ำที่เหมาะสมของการทดลอง

i	μ_i	$T_i = \mu_i - \bar{\mu}$	T_i^2
1	8.66	-0.030	0.00090
2	8.73	0.043	0.00188
3	8.71	0.020	0.00040
4	8.51	-0.183	0.03361
5	8.64	-0.050	0.00250
6	8.89	0.200	0.04000
$\bar{\mu}$	8.69	$\sum T_i^2 = 0.079$	

จากตารางที่ ข.1 แสดงถึงการหาจำนวนการทดลองซ้ำที่เหมาะสมต่อการทดลอง โดยจากการนำผลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในจากการทดลอง 6 ครั้ง มาหาจำนวนการทดลองซ้ำ เนื่องจากเป็นค่าที่ใช้ในการแก้ปัญหาขนาดน้ำแข็งหลอดไม่ตรงตามเกณฑ์ของโรงงานและลูกค้า ทั้งนี้จะหาได้จากวิธีการ Operation Characteristic Curves โดยในการคำนวณหาจำนวนการทดลองซ้ำ จะใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.13 และกำหนดให้ α มีค่าเท่ากับ 0.05 นั่นคือสามารถยอมรับความผิดพลาดได้ 5% ซึ่งสูตรที่ใช้ในการหาจำนวนการทดลองซ้ำแสดงได้ดังนี้

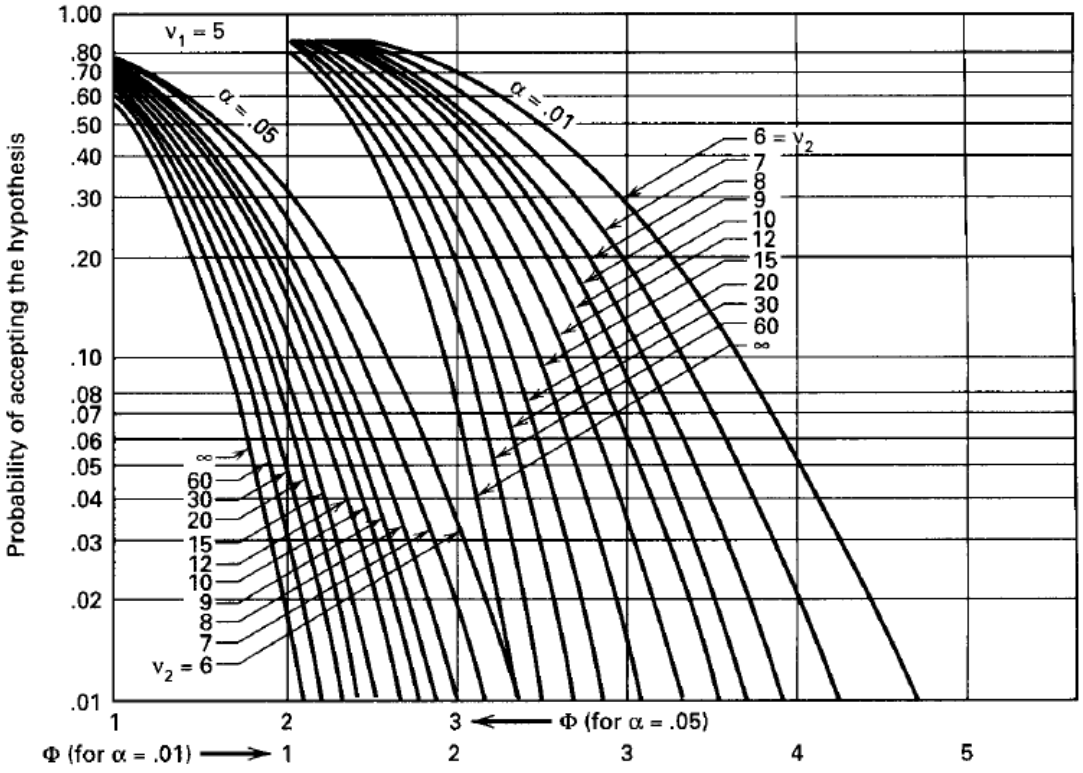
$$\Phi^2 = \frac{n\sum \tau_i^2}{a\sigma^2}$$

เมื่อแทนค่า $\sum T_i^2$, a และ σ^2 จะได้ค่าดังนี้

$$\Phi^2 = \frac{n(0.079)}{6(0.13)^2}$$

$$\Phi^2 = n(0.7819)$$

โดย $V_1 = a - 1 = 6 - 1 = 5$



รูปที่ ข.1 OC Curve เมื่อ $V_1 = 5$

ตารางที่ ข.2 ผลการหาจำนวนการทดลองซ้ำที่เหมาะสมของการทดลอง

n	Φ^2	Φ	$V_2 = a(n-1)$	β	Power
4	3.1278	1.7685	18	0.180	0.820
5	3.9097	1.9773	24	0.059	0.941
6	4.6917	2.1660	30	0.025	0.975

จากผลการคำนวณดังตารางที่ ข.2 แสดงให้เห็นว่าจำนวนการทดลองซ้ำที่เหมาะสมของการทดลองคือ ตั้งแต่ 5 การทดลองขึ้นไป เนื่องจากที่ n ตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีค่า Power มากกว่า 0.90

ภาคผนวก ค

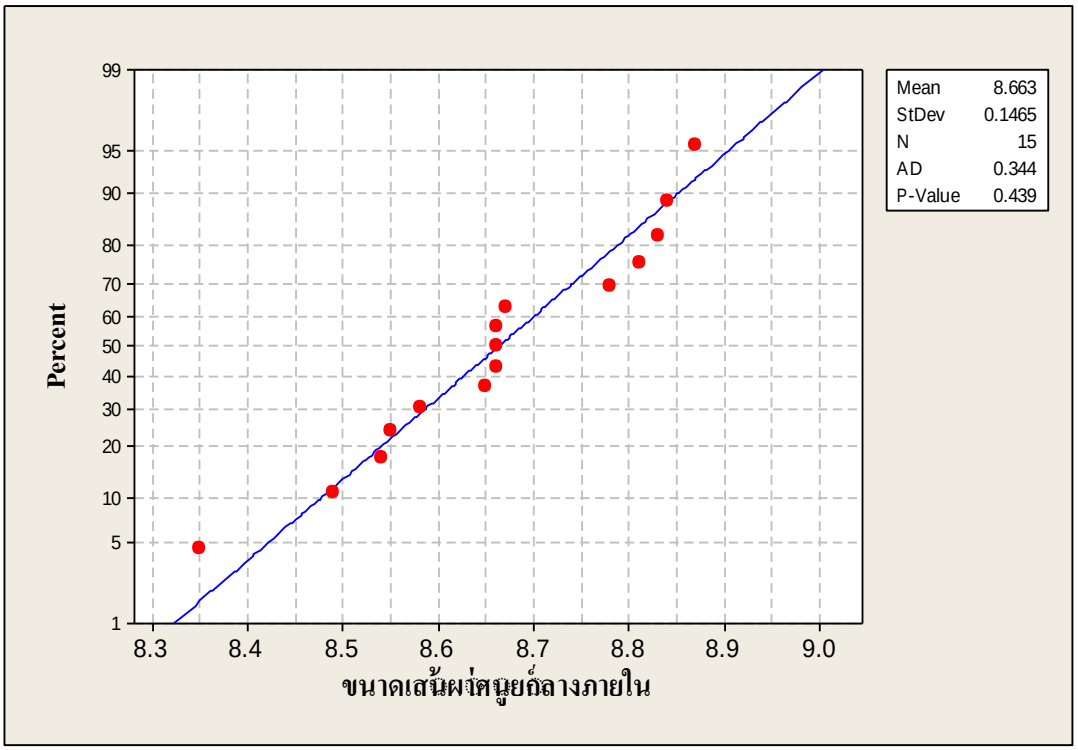
การทำ Normality Test

ในการทดสอบ Normality test จะเป็นการหาว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติหรือไม่ โดยเริ่มจากการตั้งสมมติฐาน ได้ดังนี้

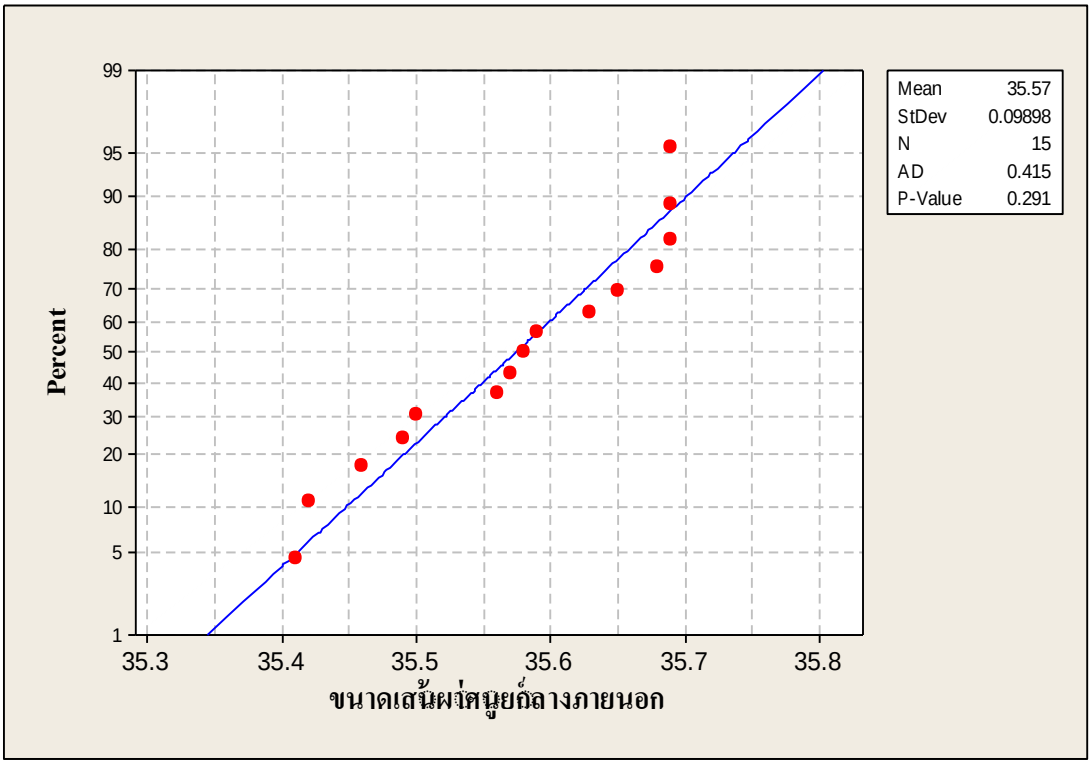
H_0 : ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

H_1 : ข้อมูลไม่มีการกระจายตัวแบบปกติ

กำหนดให้ α มีค่าเท่ากับ 0.05 แล้วทำการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก โดยการใช้โปรแกรม Minitab V.16 ในการวิเคราะห์ ทำให้ได้ผลดังนี้



รูปที่ ค.1 การทดสอบ Normality test ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน



รูปที่ ค.2 การทดสอบ Normality test ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก

จากการรันโปรแกรม Minitab ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก มีค่า P-value เท่ากับ 0.439 และ 0.291 ตามลำดับ ซึ่ง P-value ของทั้งสองมีค่ามากกว่า α (0.05) จึงยอมรับสมมติฐาน H_0 นั่นคือข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

ภาคผนวก ง
การเก็บข้อมูลของแต่ละปัจจัย เพื่อเลือกระดับปัจจัย

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่

	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (มม.)				
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**5.00**				
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**33.50**	**34.50**	**34.75**	**35.00**	**35.50**
Lot No.	(1,2,3,4,5)	(6,7,8,9,10)	(11,12,13,14,15)	(16,17,18,19,20)	(21,22,23,24,25)
ครั้งที่ 1	10.44 ± 0.12	9.85 ± 0.13	9.23 ± 0.11	8.58 ± 0.14	8.66 ± 0.15
ครั้งที่ 2	10.87 ± 0.11	9.79 ± 0.10	9.32 ± 0.10	9.05 ± 0.13	8.73 ± 0.14
ครั้งที่ 3	10.13 ± 0.15	9.77 ± 0.10	9.39 ± 0.11	8.98 ± 0.14	8.71 ± 0.12
ครั้งที่ 4	10.40 ± 0.14	9.87 ± 0.12	9.45 ± 0.12	9.00 ± 0.11	8.51 ± 0.11
ครั้งที่ 5	10.25 ± 0.12	9.57 ± 0.14	9.20 ± 0.10	8.89 ± 0.13	8.64 ± 0.15
ค่าเฉลี่ย	10.42	9.77	9.32	8.90	8.65
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.13	0.12	0.11	0.13	0.13
C.V. (%)	1.23	1.21	1.16	1.46	1.55

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่

	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (มม.)				
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**5.00**				
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**33.50**	**34.50**	**34.75**	**35.00**	**35.50**
Lot No.	(1,2,3,4,5)	(6,7,8,9,10)	(11,12,13,14,15)	(16,17,18,19,20)	(21,22,23,24,25)
ครั้งที่ 1	35.42 ± 0.12	35.61 ± 0.12	35.64 ± 0.12	35.46 ± 0.10	35.57 ± 0.09
ครั้งที่ 2	35.53 ± 0.10	35.49 ± 0.11	35.51 ± 0.14	35.65 ± 0.10	35.55 ± 0.10
ครั้งที่ 3	35.53 ± 0.12	35.49 ± 0.11	35.53 ± 0.13	35.48 ± 0.12	35.68 ± 0.10
ครั้งที่ 4	35.37 ± 0.13	35.61 ± 0.12	35.51 ± 0.15	35.67 ± 0.10	35.44 ± 0.11
ครั้งที่ 5	35.65 ± 0.10	35.58 ± 0.11	35.64 ± 0.11	35.55 ± 0.10	35.59 ± 0.09
ค่าเฉลี่ย	35.50	35.56	35.57	35.56	35.57
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.11	0.11	0.13	0.10	0.10
C.V. (%)	0.32	0.32	0.37	0.29	0.28

ตารางที่ ง.3 ข้อมูลพลังงาน ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่

	kwh				
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**5.00**				
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**33.50**	**34.50**	**34.75**	**35.00**	**35.50**
Lot No.	(1,2,3,4,5)	(6,7,8,9,10)	(11,12,13,14,15)	(16,17,18,19,20)	(21,22,23,24,25)
ครั้งที่ 1	95.89	98.39	99.16	98.53	100.86
ครั้งที่ 2	96.11	98.63	98.69	99.11	99.09
ครั้งที่ 3	97.51	98.61	98.72	98.62	99.64
ครั้งที่ 4	97.63	98.23	97.88	98.67	99.91
ครั้งที่ 5	96.78	98.41	98.00	98.59	101.77
ค่าเฉลี่ย	96.78	98.45	98.49	98.70	100.25
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.79	0.17	0.54	0.23	1.06
C.V. (%)	0.82	0.17	0.55	0.24	1.06

ตารางที่ ง.4 ข้อมูลปริมาณน้ำแข็ง ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่

	ปริมาณน้ำแข็ง (กก./รอบ)				
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**5.00**				
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**33.50**	**34.50**	**34.75**	**35.00**	**35.50**
Lot No.	(1,2,3,4,5)	(6,7,8,9,10)	(11,12,13,14,15)	(16,17,18,19,20)	(21,22,23,24,25)
ครั้งที่ 1	1481.1	1510.00	1493.60	1513.50	1550.90
ครั้งที่ 2	1469.20	1520.00	1499.30	1533.00	1535.00
ครั้งที่ 3	1463.10	1519.00	1513.4	1528.00	1544.10
ครั้งที่ 4	1431.60	1522.90	1527.70	1536.50	1535.70
ครั้งที่ 5	1443.20	1514.30	1520.90	1537.20	1575.60
ค่าเฉลี่ย	1457.64	1517.24	1510.98	1529.64	1548.26
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	20.00	5.09	14.34	9.73	16.62
C.V. (%)	1.37	0.34	0.95	0.64	1.07

ตารางที่ ง.5 ข้อมูลปริมาณน้ำเข้า ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่

	ปริมาณน้ำเข้า (ล.)				
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**5.00**				
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**33.50**	**34.50**	**34.75**	**35.00**	**35.50**
Lot No.	(1,2,3,4,5)	(6,7,8,9,10)	(11,12,13,14,15)	(16,17,18,19,20)	(21,22,23,24,25)
ครั้งที่ 1	1,602.20	1,633.20	1,615.40	1,634.80	1,672.30
ครั้งที่ 2	1,589.00	1,639.70	1,621.00	1,654.30	1,654.50
ครั้งที่ 3	1,583.30	1,640.60	1,634.20	1,647.10	1,662.90
ครั้งที่ 4	1,551.10	1,643.90	1,649.30	1,659.20	1,657.40
ครั้งที่ 5	1,562.20	1,637.90	1,640.50	1,659.60	1,698.70
ค่าเฉลี่ย	1,577.56	1,639.06	1,632.08	1,651.00	1,669.16
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	20.66	3.93	13.90	10.37	17.85
C.V. (%)	1.31	0.24	0.85	0.63	1.07

ตารางที่ ง.6 ข้อมูลน้ำเย็นทิ้ง ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่

	น้ำเย็นทิ้ง (ล.)				
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**5.00**				
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**33.50**	**34.50**	**34.75**	**35.00**	**35.50**
Lot No.	(1,2,3,4,5)	(6,7,8,9,10)	(11,12,13,14,15)	(16,17,18,19,20)	(21,22,23,24,25)
ครั้งที่ 1	96.9	97.6	99.4	96.9	96.2
ครั้งที่ 2	98.4	97.9	97.9	97.9	97.4
ครั้งที่ 3	97.3	98.4	98.7	95.3	96.3
ครั้งที่ 4	97.6	98.8	98.1	97.9	96.7
ครั้งที่ 5	97.4	98.5	97.6	98.25	97.2
ค่าเฉลี่ย	97.52	98.24	98.34	97.25	96.76
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.55	0.48	0.72	1.20	0.53
C.V. (%)	0.57	0.49	0.73	1.24	0.55

ตารางที่ ง.7 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านพลังงาน ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่

	อัตราผลผลิตด้านพลังงาน (กก./kwh)				
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**5.00**				
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**33.50**	**34.50**	**34.75**	**35.00**	**35.50**
Lot No.	(1,2,3,4,5)	(6,7,8,9,10)	(11,12,13,14,15)	(16,17,18,19,20)	(21,22,23,24,25)
ครั้งที่ 1	15.45	15.35	15.06	15.36	15.38
ครั้งที่ 2	15.29	15.41	15.19	15.47	15.49
ครั้งที่ 3	15.00	15.40	15.33	15.49	15.50
ครั้งที่ 4	14.66	15.50	15.61	15.57	15.37
ครั้งที่ 5	14.91	15.39	15.52	15.59	15.48
ค่าเฉลี่ย	15.06	15.41	15.34	15.50	15.44
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.31	0.06	0.23	0.09	0.06
C.V. (%)	2.05	0.37	1.47	0.60	0.41

ตารางที่ ง.8 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านเวลา ณ เวลาทำน้ำแข็งต่างๆ เวลาละลายน้ำแข็งคงที่

	อัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต (กก./นาที)				
เวลาละลายน้ำแข็ง min)	**5.00**				
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**33.50**	**34.50**	**34.75**	**35.00**	**35.50**
Lot No.	(1,2,3,4,5)	(6,7,8,9,10)	(11,12,13,14,15)	(16,17,18,19,20)	(21,22,23,24,25)
ครั้งที่ 1	38.47	38.23	37.57	37.84	38.29
ครั้งที่ 2	38.16	38.48	37.72	38.33	37.90
ครั้งที่ 3	38.00	38.46	38.07	38.20	38.13
ครั้งที่ 4	37.18	38.55	38.43	38.41	37.92
ครั้งที่ 5	37.49	38.34	38.26	38.43	38.90
ค่าเฉลี่ย	37.86	38.41	38.01	38.24	38.23
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.52	0.13	0.36	0.24	0.41
C.V. (%)	1.37	0.34	0.95	0.64	1.07

ภาคผนวก จ
ข้อมูลการทดสอบปัจจัย เพื่อใช้ในการรันโปรแกรม Minitab 16

ตารางที่ จ.1 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (มม.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**34.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(26,27,28,29,30)	(6,7,8,9,10)	(31,32,33,34,35)
ครั้งที่ 1	9.86 ± 0.10	9.85 ± 0.13	9.81 ± 0.11
ครั้งที่ 2	9.49 ± 0.14	9.79 ± 0.10	9.70 ± 0.11
ครั้งที่ 3	9.60 ± 0.12	9.77 ± 0.10	9.83 ± 0.10
ครั้งที่ 4	9.64 ± 0.18	9.87 ± 0.12	9.82 ± 0.09
ครั้งที่ 5	9.58 ± 0.11	9.57 ± 0.14	9.89 ± 0.12
ค่าเฉลี่ย	9.63	9.77	9.81
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.13	0.12	0.11
C.V. (%)	1.35	1.21	1.08

ตารางที่ จ.2 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (มม.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**34.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(26,27,28,29,30)	(6,7,8,9,10)	(31,32,33,34,35)
ครั้งที่ 1	35.58 ± 0.11	35.61 ± 0.12	35.80 ± 0.12
ครั้งที่ 2	35.61 ± 0.12	35.49 ± 0.11	35.38 ± 0.11
ครั้งที่ 3	35.81 ± 0.13	35.49 ± 0.11	35.43 ± 0.13
ครั้งที่ 4	35.55 ± 0.14	35.61 ± 0.12	35.45 ± 0.14
ครั้งที่ 5	35.45 ± 0.13	35.58 ± 0.11	35.41 ± 0.13
ค่าเฉลี่ย	35.60	35.56	35.49
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.13	0.11	0.13
C.V. (%)	0.35	0.32	0.35

ตารางที่ จ.3 ข้อมูลพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	kwh		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**34.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(26,27,28,29,30)	(6,7,8,9,10)	(31,32,33,34,35)
ครั้งที่ 1	97.84	98.39	99.36
ครั้งที่ 2	97.27	98.63	98.89
ครั้งที่ 3	97.53	98.61	99.56
ครั้งที่ 4	97.59	98.23	99.65
ครั้งที่ 5	97.78	98.41	99.57
ค่าเฉลี่ย	97.60	98.45	99.41
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.23	0.17	0.31
C.V. (%)	0.23	0.17	0.31

ตารางที่ จ.4 ข้อมูลปริมาณน้ำแข็งที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	ปริมาณน้ำแข็ง (กก./รอบ)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**34.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(26,27,28,29,30)	(6,7,8,9,10)	(31,32,33,34,35)
ครั้งที่ 1	1518.00	1510.00	1517
ครั้งที่ 2	1522.20	1520.00	1515.30
ครั้งที่ 3	1513.60	1519.00	1495.30
ครั้งที่ 4	1524.60	1522.90	1511.30
ครั้งที่ 5	1525.00	1514.30	1519.20
ค่าเฉลี่ย	1520.68	1517.24	1511.62
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.84	5.09	9.57
C.V. (%)	0.32	0.34	0.63

ตารางที่ จ.5 ข้อมูลปริมาณน้ำเข้าที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	ปริมาณน้ำเข้า (ล.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**34.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(26,27,28,29,30)	(6,7,8,9,10)	(31,32,33,34,35)
ครั้งที่ 1	1641	1633.2	1640.2
ครั้งที่ 2	1642.8	1639.7	1639.1
ครั้งที่ 3	1636.9	1640.6	1619.5
ครั้งที่ 4	1644.5	1643.9	1634.7
ครั้งที่ 5	1645.7	1637.9	1641.8
ค่าเฉลี่ย	1642.18	1639.06	1635.06
ค่าเบี่ยงเบน	3.44	3.93	9.09
C.V. (%)	0.21	0.24	0.56

ตารางที่ จ.6 ข้อมูลน้ำเย็นทิ้งที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	น้ำเย็นทิ้ง (ล.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**34.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(26,27,28,29,30)	(6,7,8,9,10)	(31,32,33,34,35)
ครั้งที่ 1	98.7	97.6	98.6
ครั้งที่ 2	98.1	97.9	98.4
ครั้งที่ 3	97.5	98.4	98.3
ครั้งที่ 4	97.8	98.8	98.7
ครั้งที่ 5	97.2	98.5	98.2
ค่าเฉลี่ย	97.86	98.24	98.44
ค่าเบี่ยงเบน	0.58	0.48	0.21
C.V. (%)	0.59	0.49	0.21

ตารางที่ จ.7 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	อัตราผลผลิตด้านพลังงาน (กก./kwh)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**34.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(26,27,28,29,30)	(6,7,8,9,10)	(31,32,33,34,35)
ครั้งที่ 1	15.51	15.35	15.27
ครั้งที่ 2	15.65	15.41	15.32
ครั้งที่ 3	15.52	15.40	15.02
ครั้งที่ 4	15.62	15.50	15.17
ครั้งที่ 5	15.60	15.39	15.26
ค่าเฉลี่ย	15.58	15.41	15.21
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.06	0.06	0.12
C.V. (%)	0.39	0.37	0.78

ตารางที่ จ.8 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านเวลาที่เวลาทำน้ำแข็ง 34.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	อัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต (กก./นาที)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**34.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(26,27,28,29,30)	(6,7,8,9,10)	(31,32,33,34,35)
ครั้งที่ 1	38.92	38.23	37.93
ครั้งที่ 2	39.03	38.48	37.88
ครั้งที่ 3	38.81	38.46	37.38
ครั้งที่ 4	39.09	38.55	37.78
ครั้งที่ 5	39.10	38.34	37.98
ค่าเฉลี่ย	38.99	38.41	37.79
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.12	0.13	0.24
C.V. (%)	0.32	0.34	0.63

ตารางที่ จ.9 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (มม.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.00**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(36,37,38,39,40)	(16,17,18,19,20)	(41,42,43,44,45)
ครั้งที่ 1	8.79 ± 0.13	8.58 ± 0.14	9.02 ± 0.14
ครั้งที่ 2	8.87 ± 0.12	9.05 ± 0.13	9.15 ± 0.10
ครั้งที่ 3	8.76 ± 0.13	8.98 ± 0.14	9.21 ± 0.11
ครั้งที่ 4	8.81 ± 0.16	9.00 ± 0.11	9.1 ± 0.13
ครั้งที่ 5	8.84 ± 0.11	8.89 ± 0.13	9.12 ± 0.10
ค่าเฉลี่ย	8.81	8.90	9.12
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.13	0.13	0.12
C.V. (%)	1.47	1.46	1.27

ตารางที่ จ.10 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (มม.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.00**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(36,37,38,39,40)	(16,17,18,19,20)	(41,42,43,44,45)
ครั้งที่ 1	35.65 ± 0.11	35.46 ± 0.10	35.56 ± 0.15
ครั้งที่ 2	35.56 ± 0.12	35.65 ± 0.10	35.49 ± 0.13
ครั้งที่ 3	35.55 ± 0.12	35.48 ± 0.12	35.52 ± 0.12
ครั้งที่ 4	35.59 ± 0.13	35.67 ± 0.10	35.42 ± 0.12
ครั้งที่ 5	35.65 ± 0.11	35.55 ± 0.10	35.45 ± 0.11
ค่าเฉลี่ย	35.60	35.56	35.49
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.12	0.10	0.13
C.V. (%)	0.33	0.29	0.36

ตารางที่ จ.11 ข้อมูลพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	kwh		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.00**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(36,37,38,39,40)	(16,17,18,19,20)	(41,42,43,44,45)
ครั้งที่ 1	97.90	98.53	99.25
ครั้งที่ 2	97.56	99.11	99.58
ครั้งที่ 3	97.98	98.62	99.61
ครั้งที่ 4	98.42	98.67	99.89
ครั้งที่ 5	97.36	98.59	99.46
ค่าเฉลี่ย	97.84	98.70	99.56
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.41	0.23	0.23
C.V. (%)	0.42	0.24	0.23

ตารางที่ จ.12 ข้อมูลปริมาณน้ำแข็งที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	ปริมาณน้ำแข็ง (กก./รอบ)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.00**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(36,37,38,39,40)	(16,17,18,19,20)	(41,42,43,44,45)
ครั้งที่ 1	1534.50	1513.50	1526.3
ครั้งที่ 2	1524.10	1533.00	1512.00
ครั้งที่ 3	1539.50	1528.00	1534.50
ครั้งที่ 4	1536.20	1536.50	1511.10
ครั้งที่ 5	1529.30	1537.20	1528.00
ค่าเฉลี่ย	1532.72	1529.64	1522.38
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.07	9.73	10.35
C.V. (%)	0.40	0.64	0.68

ตารางที่ จ.13 ข้อมูลปริมาณน้ำเข้าที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	ปริมาณน้ำเข้า (ล.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.00**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(36,37,38,39,40)	(16,17,18,19,20)	(41,42,43,44,45)
ครั้งที่ 1	1657.2	1634.8	1647.9
ครั้งที่ 2	1646.5	1654.3	1633.1
ครั้งที่ 3	1663.1	1647.1	1654.2
ครั้งที่ 4	1659.8	1659.2	1631.4
ครั้งที่ 5	1651.4	1659.6	1649.5
ค่าเฉลี่ย	1655.60	1651.00	1643.22
ค่าเบี่ยงเบน	6.65	10.37	10.30
C.V. (%)	0.40	0.63	0.63

ตารางที่ จ.14 ข้อมูลน้ำเย็นทิ้งที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	น้ำเย็นทิ้ง (ล.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.00**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(36,37,38,39,40)	(16,17,18,19,20)	(41,42,43,44,45)
ครั้งที่ 1	98.2	96.9	98.9
ครั้งที่ 2	98.6	97.9	97.2
ครั้งที่ 3	98.4	95.3	98.5
ครั้งที่ 4	97.9	97.9	98.6
ครั้งที่ 5	98.2	98.25	98.7
ค่าเฉลี่ย	98.26	97.25	98.38
ค่าเบี่ยงเบน	0.26	1.20	0.68
C.V. (%)	0.27	1.24	0.69

ตารางที่ จ.15 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	อัตราผลผลิตด้านพลังงาน (กก./kwh)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.00**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(36,37,38,39,40)	(16,17,18,19,20)	(41,42,43,44,45)
ครั้งที่ 1	15.67	15.36	15.38
ครั้งที่ 2	15.62	15.47	15.18
ครั้งที่ 3	15.71	15.49	15.41
ครั้งที่ 4	15.61	15.57	15.13
ครั้งที่ 5	15.71	15.59	15.36
ค่าเฉลี่ย	15.67	15.50	15.29
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.05	0.09	0.13
C.V. (%)	0.31	0.60	0.83

ตารางที่ จ.16 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านเวลาที่เวลาทำน้ำแข็ง 35 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	อัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต (กก./นาที)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.00**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(36,37,38,39,40)	(16,17,18,19,20)	(41,42,43,44,45)
ครั้งที่ 1	38.85	37.84	37.69
ครั้งที่ 2	38.58	38.33	37.33
ครั้งที่ 3	38.97	38.20	37.89
ครั้งที่ 4	38.89	38.41	37.31
ครั้งที่ 5	38.72	38.43	37.73
ค่าเฉลี่ย	38.80	38.24	37.59
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.15	0.24	0.26
C.V. (%)	0.40	0.64	0.68

ตารางที่ จ.17 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (มม.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(46,47,48,49,50)	(21,22,23,24,25)	(51,52,53,54,55)
ครั้งที่ 1	8.35 ± 0.11	8.66 ± 0.15	8.87 ± 0.11
ครั้งที่ 2	8.61 ± 0.11	8.73 ± 0.14	8.59 ± 0.12
ครั้งที่ 3	8.82 ± 0.12	8.71 ± 0.12	8.79 ± 0.13
ครั้งที่ 4	8.50 ± 0.10	8.51 ± 0.11	8.72 ± 0.10
ครั้งที่ 5	8.54 ± 0.09	8.64 ± 0.15	8.70 ± 0.10
ค่าเฉลี่ย	8.56	8.65	8.73
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.11	0.13	0.11
C.V. (%)	1.24	1.55	1.28

ตารางที่ จ.18 ข้อมูลเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (มม.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(46,47,48,49,50)	(21,22,23,24,25)	(51,52,53,54,55)
ครั้งที่ 1	35.58 ± 0.10	35.57 ± 0.09	35.79 ± 0.11
ครั้งที่ 2	35.53 ± 0.10	35.55 ± 0.10	35.51 ± 0.14
ครั้งที่ 3	35.96 ± 0.19	35.68 ± 0.10	35.40 ± 0.12
ครั้งที่ 4	35.51 ± 0.16	35.44 ± 0.11	35.41 ± 0.14
ครั้งที่ 5	35.49 ± 0.11	35.59 ± 0.09	35.40 ± 0.15
ค่าเฉลี่ย	35.61	35.57	35.50
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.13	0.10	0.13
C.V. (%)	0.37	0.28	0.37

ตารางที่ จ.19 ข้อมูลพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	kwh		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(46,47,48,49,50)	(21,22,23,24,25)	(51,52,53,54,55)
ครั้งที่ 1	98.88	100.86	101.25
ครั้งที่ 2	98.63	99.09	100.34
ครั้งที่ 3	99.17	99.64	100.04
ครั้งที่ 4	99.14	99.91	100.57
ครั้งที่ 5	99.43	101.77	100.59
ค่าเฉลี่ย	99.05	100.25	100.56
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.31	1.06	0.45
C.V. (%)	0.31	1.06	0.44

ตารางที่ จ.20 ข้อมูลปริมาณน้ำแข็งที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	ปริมาณน้ำแข็ง (กก./รอบ)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(46,47,48,49,50)	(21,22,23,24,25)	(51,52,53,54,55)
ครั้งที่ 1	1538.1	1550.90	1533.2
ครั้งที่ 2	1543.60	1535.00	1520.90
ครั้งที่ 3	1545.5	1544.10	1550.30
ครั้งที่ 4	1559.1	1535.70	1554.80
ครั้งที่ 5	1568.2	1575.60	1549.20
ค่าเฉลี่ย	1550.90	1548.26	1541.68
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	12.38	16.62	14.20
C.V. (%)	0.80	1.07	0.92

ตารางที่ จ.21 ข้อมูลปริมาณน้ำเข้าที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	ปริมาณน้ำเข้า (ล.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(46,47,48,49,50)	(21,22,23,24,25)	(51,52,53,54,55)
ครั้งที่ 1	1657.8	1672.3	1656.1
ครั้งที่ 2	1661.4	1654.5	1641.9
ครั้งที่ 3	1664.1	1662.9	1670.8
ครั้งที่ 4	1681.2	1657.4	1675.6
ครั้งที่ 5	1689.2	1698.7	1669.5
ค่าเฉลี่ย	1670.74	1669.16	1662.78
ค่าเบี่ยงเบน	13.68	17.85	13.73
C.V. (%)	0.82	1.07	0.83

ตารางที่ จ.22 ข้อมูลน้ำเย็นทิ้งที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	น้ำเย็นทิ้ง (ล.)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(46,47,48,49,50)	(21,22,23,24,25)	(51,52,53,54,55)
ครั้งที่ 1	98.2	96.2	98.6
ครั้งที่ 2	97.4	97.4	97.6
ครั้งที่ 3	96.9	96.3	98.5
ครั้งที่ 4	97.5	96.7	97.5
ครั้งที่ 5	97.8	97.2	97.9
ค่าเฉลี่ย	97.56	96.76	98.02
ค่าเบี่ยงเบน	0.48	0.53	0.51
C.V. (%)	0.49	0.55	0.52

ตารางที่ จ.23 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านพลังงานที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	อัตราผลผลิตด้านพลังงาน (กก./kwh)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(46,47,48,49,50)	(21,22,23,24,25)	(51,52,53,54,55)
ครั้งที่ 1	15.55	15.38	15.14
ครั้งที่ 2	15.65	15.49	15.16
ครั้งที่ 3	15.58	15.50	15.50
ครั้งที่ 4	15.73	15.37	15.46
ครั้งที่ 5	15.77	15.48	15.40
ค่าเฉลี่ย	15.66	15.44	15.33
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.09	0.06	0.17
C.V. (%)	0.59	0.41	1.11

ตารางที่ จ.24 ข้อมูลอัตราผลผลิตด้านเวลาที่เวลาทำน้ำแข็ง 35.5 นาที เวลาละลายน้ำแข็งต่างๆ

	อัตราผลผลิตด้านเวลาการผลิต (กก./นาที)		
เวลาทำน้ำแข็ง (นาที)	**35.50**		
เวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	**4.50**	**5.00**	**5.50**
Lot No.	(46,47,48,49,50)	(21,22,23,24,25)	(51,52,53,54,55)
ครั้งที่ 1	38.45	38.29	37.40
ครั้งที่ 2	38.59	37.90	37.10
ครั้งที่ 3	38.64	38.13	37.81
ครั้งที่ 4	38.98	37.92	37.92
ครั้งที่ 5	39.21	38.90	37.79
ค่าเฉลี่ย	38.77	38.23	37.60
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.31	0.41	0.35
C.V. (%)	0.80	1.07	0.92

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปุณยาพร เผ่าพหล เกิดวันที่ 2 กุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2531 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ในปีการศึกษา 2549 ได้เข้าศึกษาต่อและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตจาก ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553