อิทธิพลของอัตราการจ่ายอากาศในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

นายธวัชชัย ลิ้มมณฑล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN :974-53-2706-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 22470311

THE INFLUENCE OF AIR FLOW RATE ON THE BLOCK ICE MAKING PROCESS

Mr. Tawatchai Limmonthol

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

481633

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของอัตราการจ่ายอากาศในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง
โดย	นายธวัชชัย ลิ้มมณฑล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แตงเที่ยง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ฤชากร จิรกาลวสาน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แตงเที่ยง)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรัญญากรณ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ไพบูลย์ ศรีภคากร)

ธวัชชัย ลิ้มมณฑล : อิทธิพลของอัตราการจ่ายอากาศในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง. (THE INFLUENCE OF AIR FLOW RATE ON THE BLOCK ICE MAKING PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แตงเที่ยง 135 หน้า ISBN :974-53-2706-9

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองน้ำแข็งในกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง โดยทำการทดลองจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองเพื่อหาแนวโน้มของการลดอัตราการจ่ายอากาศที่มีผลต่อความขุ่นและเวลาที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็ง และประยุกต์ใช้กับโรงงานผลิตน้ำแข็ง

การวัดและบันทึกข้อมูลจากการทดลองและโรงงานผลิตน้ำแข็ง เพื่อหาช่วงของอัตราการไหลที่พอเหมาะในการผลิตโดยน้ำแข็งที่ได้มีลักษณะใส ซึ่งเป็นที่ต้องการในเชิงพาณิชย์ จากนั้นจึงพิจารณาเรื่อง การลดลงของอัตราการจ่ายมีผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งมากน้อยเพียงใด จึงนำแนวโน้มไปใช้พิจารณาการผลิตในโรงงานที่ใช้ซองน้ำแข็งและท่อจ่ายที่ขนาดมาตรฐาน อัตราการจ่ายอากาศเฉลี่ยต่อซองน้ำแข็ง คือ 16.98 ลิตรต่อนาที ส่วนที่อัตราการจ่ายอากาศลงซองน้ำแข็ง 13.95 ลิตรต่อนาที เป็นอัตราการไหลที่สามารถลดลง โดยไม่ทำให้น้ำแข็งที่ได้มีลักษณะขุ่น ผลสรุปที่ได้ทั้งจากแบบจำลองและโรงงานผลิตน้ำแข็ง ในส่วนอากาศที่จ่ายลงในซองน้ำแข็งต่อเวลาที่ใช้ในการผลิต สรุปว่ามีผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งน้อยมากเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น

การลดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายออกจากเครื่องอัดอากาศ ช่วยให้สามารถคำนวณขนาดของเครื่องอัดอากาศที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็ง ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของพลังงานและลดขนาดของเครื่องอัดอากาศให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งจะเป็นการออกแบบระบบจ่ายอากาศเฉพาะของแต่ละโรงงาน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา2548.....

4670329721 :MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: BLOCK ICE/AIR FLOW RATE/TURBIDITY

TAWATCHAI LIMMONTHOL : THE INFLUENCE OF AIR FLOW RATE ON THE BLOCK ICE MAKING PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.CHITTIN TANGTHIENG ,Ph.D. 129 pp. ISBN:974-53-2706-9

This research concerns a study of the influence of air flow rate on the block ice in the making process by doing an experiment from block ice making model to find the tendency of turbidity in block ice and freezing time and finally to apply this data to practical process.

The study includes the measurement and the record of data from both block ice making model and ice factory to find a range of air flow rate that makes transparent ice in standard can. The next consideration is how reduction of air flow rate affected freezing time.The measurement found that an average air flow rate statistically is 16.98 liter per minute per can and the minimum flow rate case that yield transparent ice is 13.95 liter per minute per can.The conclusion is that the reduction of air flow rate affected freezing time too little compared with other factors.

The reduction of air flow rate launched from air compressor to block ice helps calculate the size of the air compressor which can produce pressure and release air in appropriate amount for producing ice.This helps reduce the energy expense and the size of the air compressor which is too big for general demand.This is the specific design of the air distributing system of each factory.

Department...MECHANICAL ENGINEERING... Student's signature.....Tawatchai Limmonthol.....

Field of study..MECHANICAL ENGINEERING.Advisor's signaure.....Chittin Tangthieng.....

Academic year....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือสนับสนุนอย่างดียิ่งของบุคคลหลายท่านผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แตงเที่ยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความอุปการะช่วยเหลือและชี้แนะให้เห็นถึงข้อคิดเห็นในแง่มุมต่างๆ ตลอดจนแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคณะกรรมการทุกท่าน คือ ท่านรองศาสตราจารย์ ฤชากร จิรกาลวสาน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรัญญากรณ์ และท่านอาจารย์ ดร.ไพบูลย์ ศรีภคากร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ร่วมให้คำแนะนำและแนวความคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคุณเสรี สุจริตศรีชัยกุล เจ้าของกิจการโรงงานน้ำแข็ง บริษัทโรงน้ำแข็งธวัชชัยน้ำแข็งหลอด จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ให้ผู้วิจัยได้เข้าไปทำการวิจัยและศึกษาหาความรู้ ตลอดจนช่างผู้ชำนาญการที่ได้อำนวยความสะดวกให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทำวิจัยและถ่ายทอดความรู้ประสบการณ์ที่มีค่าสำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้กำลังใจ ถามไถ่สารทุกข์สุขดิบ ให้คำแนะนำข้อคิด ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และสายสัมพันธ์อันดี ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา อันเป็นที่รักยิ่งของผู้วิจัย ที่ให้ทุกสิ่งทุกอย่าง คอยเป็นที่ปรึกษา เป็นกำลังใจตลอดมา อนึ่งประโยชน์ที่จะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขออุทิศแด่ท่านผู้ให้กำเนิด ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฏ
สารบัญรูปภาพ.....ฐ
รายการสัญลักษณ์.....ด

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....4

2.1 งานวิจัยที่ศึกษาปัญหาการเปลี่ยนสถานะของน้ำ.....4
2.2 งานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติของน้ำแข็ง.....6

บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน.....8

3.1 ระบบการจำลองก้อนความจุความร้อน (Lumped Heat-capacity System)..... 8
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการเปลี่ยนสถานะ.....11
3.2.1 สมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการเปลี่ยนสถานะ...11
3.2.2 กรณีศึกษาปัญหาการเปลี่ยนแปลงสถานะในสองมิติ.....13
3.3 ลักษณะของการไหลในท่อ (Characteristic Of Pipe Flow).....16
3.4 ระบบการผลิตน้ำแข็งซอง.....23

3.4.1วัฏจักรการทำความเย็นของระบบการผลิตน้ำแข็งซอง.....23
3.4.1.1 เครื่องอัดไอ (Compressor).....24
3.4.1.2 ถังแยกน้ำมันออกจากไอแอมโมเนีย (Oil Separator Tank).....26
3.4.1.3 เครื่องควบแน่น (Condenser)..... 27
3.4.1.4 ถังเก็บแอมโมเนียเหลว (Ammonia Liquid Storage Tank).....30
3.4.1.5 วาล์วลดความดัน (Expansion Valve).....31
3.4.1.6 ถังแยกไอแอมโมเนียและแอมโมเนียเหลว (Accumulator).....32
3.4.1.7 เครื่องระเหย (Evaporator) 33
3.4.2 ระบบจ่ายอากาศลงสู่ซองน้ำแข็ง.....34
3.5 คุณสมบัติของน้ำ.....36
3.5.1 สมบัติทางความร้อนของน้ำและน้ำแข็ง.....36
3.5.2 ความขุ่นของน้ำแข็ง (Turbidity).....38

บทที่ 4 แบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง.....40

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้จำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง..... 40
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทำความเย็น.....40
4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการจ่ายอากาศ..... 43
4.2 อุปกรณ์ในการวัดและบันทึกผลการทดลอง.....43
4.2.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิ้ล(Thermocouple)..... 44
4.2.2 อุปกรณ์วัดความหนาของน้ำแข็ง.....44
4.2.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซอง.....45
4.2.4 อุปกรณ์บันทึกภาพ.....45
4.3 วิธีการวัดและบันทึกข้อมูลจากการทดลอง.....46
4.3.1 วิธีการวัดค่าอุณหภูมิในบ่อน้ำเกลือ.....46
4.3.2 วิธีการวัดค่าความหนาของน้ำแข็ง.....47
4.3.3 วิธีการวัดอัตราการไหลของอากาศ.....47
4.4 ขั้นตอนของการทดลอง..... 50
4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 50

4.6 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง..... 51
4.6.1 ผลการวิเคราะห์ผลจากการวัดค่าอุณหภูมิในบ่อน้ำเกลือ..... 51
4.6.2 ความขุ่นของน้ำแข็งซอง..... 51
4.6.3 อัตราการเพิ่มของความหนาของน้ำแข็งและเวลาที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็ง 52
4.7 สรุปผลการทดลอง..... 52

บทที่ 5 ข้อมูลจากโรงงานผลิตน้ำแข็งซอง..... 53

5.1 ขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงาน..... 53
5.1.1 เครื่องอัดไอแอมโมเนีย..... 56
5.1.2 เครื่องอัดอากาศ..... 56
5.2 อุปกรณ์ในการวัดและบันทึกผลการทดลอง..... 57
5.2.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบเคลื่อนที่ (Portable Thermocouple)..... 57
5.2.2 อุปกรณ์วัดความหนาของน้ำแข็ง..... 57
5.2.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซอง..... 58
5.2.4 อุปกรณ์บันทึกภาพ..... 58
5.3 วิธีการวัดและบันทึกข้อมูลจากการทดลอง..... 58
5.3.1 วิธีการวัดค่าอุณหภูมิในบ่อน้ำเกลือ..... 59
5.3.2 วิธีการวัดค่าความหนาของน้ำแข็ง..... 60
5.3.3 วิธีการวัดอัตราการไหลของอากาศ..... 60
5.4 ผลการวัดข้อมูลจากโรงงานผลิตน้ำแข็งซอง..... 61
5.4.1 ผลการวัดอุณหภูมิในบ่อน้ำเกลือ..... 61
5.4.2 ผลการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซอง..... 61
5.4.3 ความขุ่นของน้ำแข็งซอง..... 62
5.4.4 อัตราการเพิ่มของความหนาของน้ำแข็ง..... 63
5.5 สรุปผลการวัดข้อมูลจากโรงงานผลิตน้ำแข็งซอง..... 63

บทที่ 6 การอภิปรายเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับการผลิตน้ำแข็งในโรงงาน..... 64

6.1 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับการผลิตน้ำแข็งในโรงงาน..... 64
6.2 การวิเคราะห์การประหยัดพลังงานสำหรับการจ่ายอากาศ..... 75

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย..... 78

7.1 สรุปผลการวิจัย.....78
7.2 การปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง..... 79
7.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ..... 79

รายการอ้างอิง.....81

ภาคผนวก. 83

ภาคผนวก ก กราฟและตารางผลการทดลอง..... 84

ภาคผนวก ข ภาคการคำนวณ..... 108

ภาคผนวก ค สมบัติของน้ำ อากาศ และน้ำเกลือโซเดียมคลอดไรด์..... 115

ภาคผนวก ง ลักษณะการไหลของน้ำในซองน้ำแข็ง..... 122

ภาคผนวก จ มาตรฐานของน้ำที่ใช้ในโรงงานผลิตน้ำแข็งซอง..... 124

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 129

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ค่า equivalent roughness สำหรับท่อ....21
3.2 แสดงค่า K และ Le/D สำหรับวาล์วและข้อต่อชนิดต่างๆ....22
6.1 สรุปผลการวัดจากแบบจำลอง.... 65
6.2 สรุปผลการวัดจากโรงงานน้ำแข็ง.... 70
ก.1 แสดงความหนาของน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองที่อัตราการจ่ายอากาศต่างกัน ที่เวลาต่างๆ.... 92
ก.2 แสดงอุณหภูมิของน้ำเกลือรอบซองน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองที่อัตราการจ่ายอากาศต่างกัน ที่เวลาต่างๆ....93
ก.3 แสดงความหนาของน้ำแข็งในซองน้ำแข็งจากการวัดในโรงงานผลิตน้ำแข็งที่อัตราการจ่ายอากาศต่างกัน ที่เวลาต่างๆ....94
ก.4 แสดงอุณหภูมิของน้ำเกลือรอบซองน้ำแข็งจากการวัดในโรงงานผลิตน้ำแข็งที่อัตราการจ่ายอากาศต่างกัน ที่เวลาต่างๆ....95
ก.5 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซองในกรณี 1 ลิตรต่อนาที.... 97
ก.6 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซองในกรณี 1.5 ลิตรต่อนาที....98
ก.7 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซองในกรณี 2 ลิตรต่อนาที.... 99
ก.8 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซองในกรณี 2.5 ลิตรต่อนาที....100
ก.9 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซองในกรณี 3 ลิตรต่อนาที.... 101
ก.10 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซองในกรณี 3.5 ลิตรต่อนาที....102
ก.11 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซองในโรงงานในกรณี 10.81 ลิตรต่อนาที103
ก.11 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซองในโรงงานในกรณี 13.95 ลิตรต่อนาที104
ก.11 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซองในโรงงานในกรณี 15.72 ลิตรต่อนาที105
ก.11 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซองในโรงงานในกรณี 18.23 ลิตรต่อนาที106
ก.15 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซองในโรงงานในกรณี 19.46 ลิตรต่อนาที107

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ข.1 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการทำความเย็นของน้ำแข็งเฉลี่ยต่อซอง.....111
ข.2 แสดงค่าคงที่ C_1 และ C_2 สำหรับสภาพเงื่อนไขต่างกัน 112
ค.1 คุณสมบัติของน้ำ ที่ความดันบรรยากาศ.....116
ค.2 คุณสมบัติของอากาศ ที่ความดันบรรยากาศ..... 117

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

3.1 แสดงการนำก้อนวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงถูกนำลงในของเหลวเพื่อลดอุณหภูมิ..... 8
3.2 แสดงความใกล้เคียงกับพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรต้านทานไฟฟ้า.....10
3.3 แสดงแบบจำลองของปัญหาการเปลี่ยนสถานะในหนึ่งมิติ.....11
3.4 การเปลี่ยนสถานะในสองมิติ กรณีศึกษา (ก) รูปร่างหนึ่งในสี่ส่วนของปัญหา
เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต (ข) ตัวอย่างการแบ่งกริดขนาด 26 x 13 cells.....13
3.5 การกระจายของอุณหภูมิตามตำแหน่ง x = y สำหรับปัญหาการเปลี่ยนสถานะใน
สองมิติขนาดจำกัดที่มี T_i=30 °C และ T_C=-10 °C 14
3.6 แสดงเส้นความชันของอุณหภูมิ สำหรับปัญหาการเปลี่ยนสถานะในสองมิติ
ขนาดจำกัดที่มี T_i=30 °C และ T_C=-10 °C (ก) t = 1 h (ข) t = 5 h..... 15
3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาที่ตำแหน่ง A..... 16
3.8 แสดง Moody chart สำหรับการไหลภายในท่อ.....20
3.9 แสดงลักษณะของวัฏจักรการทำงานของโรงน้ำแข็ง.....24
3.10 แสดงรูปแบบการทำงานของเครื่องอัดไอแบบสูบชัก (ก) ปริมาตรและความดัน
ในกระบอกสูบของเครื่องอัดไอ (ข) ลักษณะรูปร่างของเครื่องอัดไอ.....25
3.11 แสดงลักษณะของถังแยกน้ำมันออกจากไอแอมโมเนีย (oil separator tank).....27
3.12 แสดงลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนใน Evaporative Condenser (ก) แสดงพฤติกรรม
ที่เกิดขึ้นจริง(ข) แสดงพฤติกรรมโดยประมาณที่ใช้ในการประมาณค่า.....28
3.13 แสดงการทำงานของเครื่องควบแน่นชนิดที่ใช้ในโรงน้ำแข็ง..... 29
3.14 แสดง (ก) ลักษณะของถังเก็บแอมโมเนียเหลว (ข) ขนาดของถังเก็บแอมโมเนียเหลว.....30
3.15 แสดงรูปร่างของวาล์วลดความดันที่ใช้ในโรงงาน.....31
3.16 แสดงลักษณะของถัง accumulator.....32
3.17 ถัง accumulator และ evaporator.....33
3.18 แสดงการจ่ายอากาศตามท่อลงไปในซองน้ำแข็ง (ก) ซองน้ำแข็งในโรงงานน้ำแข็ง
(ข) ขนาดและระยะห่างของท่อจ่ายอากาศในโรงงาน.....34
3.19 รูปแบบการจ่ายอากาศผ่านท่อหลัก ท่อสาขา และท่อที่จ่ายลงซองน้ำแข็ง.....35
3.20 แสดงลักษณะของเครื่องอัดอากาศที่ใช้ในโรงงาน.....35

3.21 (ก) แสดงแผนภาพการเปลี่ยนสถานะของน้ำ (ข) แสดงความหนาแน่นของน้ำขณะเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง....37
3.22 แสดงแผนภูมิเฟสของน้ำและแสดงรูปการกักตัวของฟองน้ำ....39
4.1 แสดงแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง....41
4.2 แสดงอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของบริษัท Elewell....41
4.3 แสดงตำแหน่งการวัดค่าในการทดลอง....42
4.4 แสดงการต่อเครื่องควบคุมอุณหภูมิกับเครื่องอัดไอ....43
4.5 แสดงลักษณะของเครื่องวัดอุณหภูมิ Digicon Precision IS-7....44
4.6แสดงลักษณะของอุปกรณ์วัดความหนาของน้ำแข็ง....44
4.7 แสดงลักษณะของอุปกรณ์การวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซอง....45
4.8 แสดงลักษณะของกล้องดิจิตอลของบริษัท Canon รุ่นIXUS....45
4.9 แสดงการวัดอุณหภูมิในบ่อน้ำเกลือ....46
4.10 (ก)-(ข) แสดงวิธีการวัดความหนาของน้ำแข็ง....47
4.11 (ก)-(ง) แสดงขั้นตอนการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงซอง....49
5.1 (ก)-(ง) แสดงกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงาน....54
5.2 แสดงแผนผังการจัดวางอุปกรณ์สำคัญในโรงงานน้ำแข็ง....55
5.3 แสดงเครื่องอัดไอแอมโมเนียที่ใช้ในโรงงาน....56
5.4 แสดงเครื่องอัดอากาศที่ใช้ในโรงงาน....56
5.5 แสดงลักษณะของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบเคลื่อนที่....57
5.6 แสดงลักษณะของอุปกรณ์วัดความหนาของน้ำแข็ง....57
5.7 (ก) แสดงลักษณะการวัดอุณหภูมิในบ่อน้ำเกลือ
(ข) แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของบ่อน้ำเกลือ....59
5.8 แสดงจำนวนซองน้ำแข็งที่มีอัตราการไหลของอากาศต่างๆ จากการสำรวจ....62
6.1 (ก) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง
ในกรณีที่ไม่มีการจ่ายอากาศลงซองน้ำแข็ง....66
6.1 (ข) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง
ที่อัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองที่อัตรา 1 ลิตรต่อนาที....66
6.1 (ค) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง
ที่อัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองที่อัตรา 1.5 ลิตรต่อนาที....67
6.1 (ง) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง
ที่อัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองที่อัตรา 2 ลิตรต่อนาที....67

6.1 (จ) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง
ที่อัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองที่อัตรา 2.5 ลิตรต่อนาที....68
6.1 (ฉ) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง
ที่อัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองที่อัตรา 3 ลิตรต่อนาที....68
6.1 (ช) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง
ที่อัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองที่อัตรา 3.5 ลิตรต่อนาที....69
6.2 (ก) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงาน
ในกรณี ที่ไม่มีการจ่ายอากาศลงซองน้ำแข็ง....71
6.2 (ข) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงาน
ที่อัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองที่อัตรา 10.81 ลิตรต่อนาที....71
6.2 (ค) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงาน
ที่อัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองที่อัตรา 13.95 ลิตรต่อนาที....72
6.2 (ง) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงาน
ที่อัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองที่อัตรา 15.72 ลิตรต่อนาที....72
6.2 (จ) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงาน
ที่อัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองที่อัตรา 18.23 ลิตรต่อนาที....73
6.2 (ฉ) แสดงภาพถ่ายของน้ำแข็งจากกระบวนการผลิตน้ำแข็งซองในโรงงาน
ที่อัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในซองที่อัตรา 19.46 ลิตรต่อนาที....73
6.3 แสดงประสิทธิภาพการอัดอากาศแบบ isentropic....75
6.4 อัตราการใช้พลังงานในการอัดอากาศทางทฤษฎีเทียบกับอัตราการไหลเฉลี่ยปกติ....77
ก.1 แสดงค่าอุณหภูมิในบ่อน้ำเกลือขณะที่ดำเนินการทดลองในแต่ละกรณี
ของการทดลองจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง....85
ก.2 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรวมในบ่อน้ำเกลือขณะที่ดำเนินการทดลอง
จากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง....86
ก.3อัตราการเติบโตของความหนาของน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง..... 87
ก.4 แสดงค่าอุณหภูมิในบ่อน้ำเกลือขณะที่ดำเนินการวัดในแต่ละซองน้ำแข็งที่มีอัตรา
การจ่ายอากาศลงซองต่างกัน..... 88
ก.5 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรวมในบ่อน้ำเกลือขณะที่ดำเนินการวัดในแต่ละซองน้ำแข็ง
ที่มีอัตราการจ่ายอากาศลงซองต่างกัน....89
ก.6 รูปแสดงความหนาของน้ำแข็งที่เกิดในช่วงเวลาการผลิตในแต่ละกรณีของอัตราการไหล ...90
ก.7 แสดงแผนผังของโรงงานน้ำแข็งที่ได้เข้าไปทำการวัดและบันทึกค่า..... 91

ข.1 แสดงปริมาตรควบคุมของซองน้ำแข็ง..... 109
ข.2 แสดงระยะห่างและการวางของซองน้ำแข็งในโรงงาน.....110
ข.3 แสดงรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเร็วของการไหลผ่านช่องขนานของน้ำเกลือ111
ข.4 แสดงกราฟผลการคำนวณเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำจาก 30 องศาเซลเซียส
เป็น 0 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการวัดจริง.....113
ค.1 แสดงค่าความหนืดของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์..... 118
ค.2 แสดงค่า specific gravity ของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์.....119
ค.3 แสดงค่า specific heat ของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์.....120
ค.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์..... 121
ง.1 รูปแบบการไหลวนของน้ำในซองกรณีที่อัตราการจ่ายน้อย..... 123
ง.2 รูปแบบการไหลวนของน้ำในซองกรณีที่อัตราการจ่ายมาก.....123

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์		หน่วย
A	พื้นที่การถ่ายเทความร้อน	m^2
Bi	ค่า Biot number	-
c_p	ค่าความร้อนจำเพาะ	kJ /kg °C
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
D_H	เส้นผ่านศูนย์กลาง Hydraulic	m
f	ค่าตัวประกอบความเสียดทาน	-
g	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
h	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2.K$
h_L	ค่าหัวน้ำสูญเสียหลัก	m
h_{Lm}	ค่าหัวน้ำสูญเสียรอง	m
h_{LT}	ค่าหัวน้ำสูญเสียรวม	m
H	ความสูงของซองน้ำแข็ง	m
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	W.m/K
k_L	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของเหลว	W.m/K
k_S	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของแข็ง	W.m/K
L	ความยาวของซองน้ำแข็ง	m
Le	ความยาวสมมูล	m
m	มวล	kg
$\dot{m}$	อัตราการไหลของมวล	kg/s
Nu	ค่าตัวเลข Nusselt	-
P	ความดัน	N/m^2
Q	ค่าความร้อน	J
$\dot{Q}$	อัตราการถ่ายเทความร้อน	W
Q_L	ค่าความร้อนแฝง (Latent heat)	J
Q_S	ค่าความร้อนสัมผัส (Sensible heat)	J
r_p	ค่าอัตราส่วนการอัด	-
Ra	ค่าตัวเลข Rayleigh	-
Re	ค่าตัวเลข Reynolds	-

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์		หน่วย
s	ระยะห่างระหว่างซอง	m
t	เวลา	s
t_0	เวลาเริ่มต้น	s
T	อุณหภูมิ	℃หรือK
T_C	อุณหภูมิเงื่อนไขขอบเขต	℃หรือK
T_i	อุณหภูมิเริ่มต้น	℃หรือK
T_m	อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะของสาร	℃หรือK
T_∞	อุณหภูมิของของไหล	℃หรือK
V	ปริมาตร	m^3
$\overline{V}$	อัตราเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ	m/s
$\dot{V}$	อัตราการไหลเชิงปริมาตร	m^3/s
W	ความกว้างของซองน้ำแข็ง	m
α	ค่า coefficient of expansion	1/K
β	ค่า thermal diffusivity	m^2/s
γ	ค่า specific heat capacity ratio	-
ε	ความขรุขระ	mm
μ	ค่าdynamic viscosity	Pa/s
ν	ค่า kinematic viscosity	m^2/s