

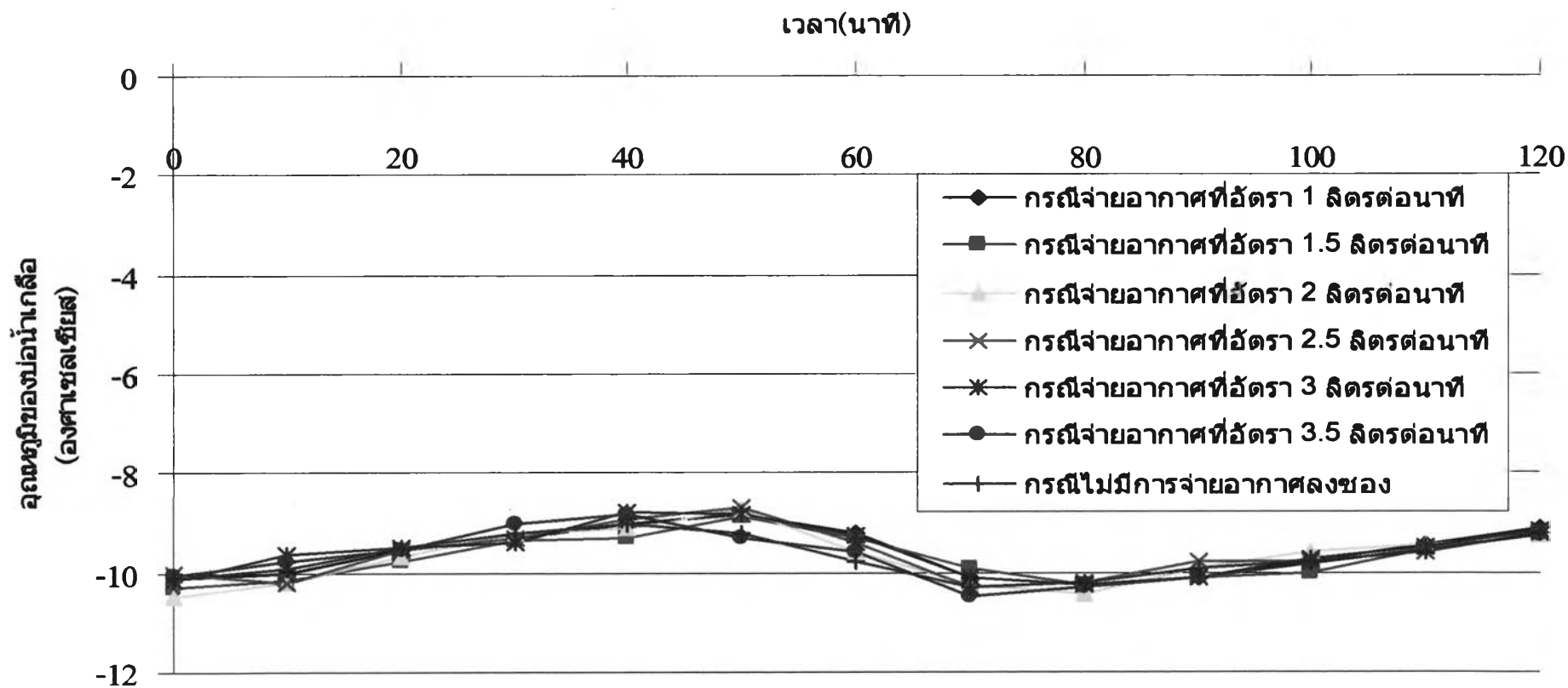
### รายการอ้างอิง

1. กระทรวงสาธารณสุข.2543.ปัญหาและแนวทางการแก้ไขการผลิตน้ำแข็งเพื่อให้ปฏิบัติตามหลักเกณฑ์วิธีการที่ดีในการผลิตอาหาร(จี.เอ็ม.พี) ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข:สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข
2. กระทรวงสาธารณสุข.2547.สถานการณ์คุณภาพน้ำบริโภคและผลกระทบต่อสุขภาพ. กรุงเทพมหานคร :กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.
3. รจนา ประไพพ และ กุณฑินี มณีรัตน์ .2547. การจำลองแบบการขึ้นรูปของน้ำแข็งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม . ว.สงขลานครินทร์ วทท. 28(1) : 55-70.
4. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.1962. ASHRAE guide and data book Applications. pp 701-710.
5. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.1961. ASHRAE guide and data book Fundamental and equipment. pp 343-349.
6. Bianchi , Marcus V. A. and Viskanta,R. 1999. The effect of air bubbles on the diffusion controlled solidification of water and aqueous solutions of ammonium chloride .International Journal of Heat and Mass Transfer 45: 1097-1110.
7. Dossat ,Roy J. 1997 . Principles of Refrigeration.4<sup>th</sup> edition . New Jersey . U.S.A. : Prentice-Hall International , Inc.
8. Giangi,M., Stella,F. and Kowalewski, T.A . 1999.Phase change problems with free convection: fixed grid numerical simulation. Computing and Visualization in Science 2: 123-130.
9. Hagen K.D.1999.Heat Transfer with applications.2<sup>nd</sup> edition.New Jersey . U.S.A. : Prentice-Hall International , Inc.

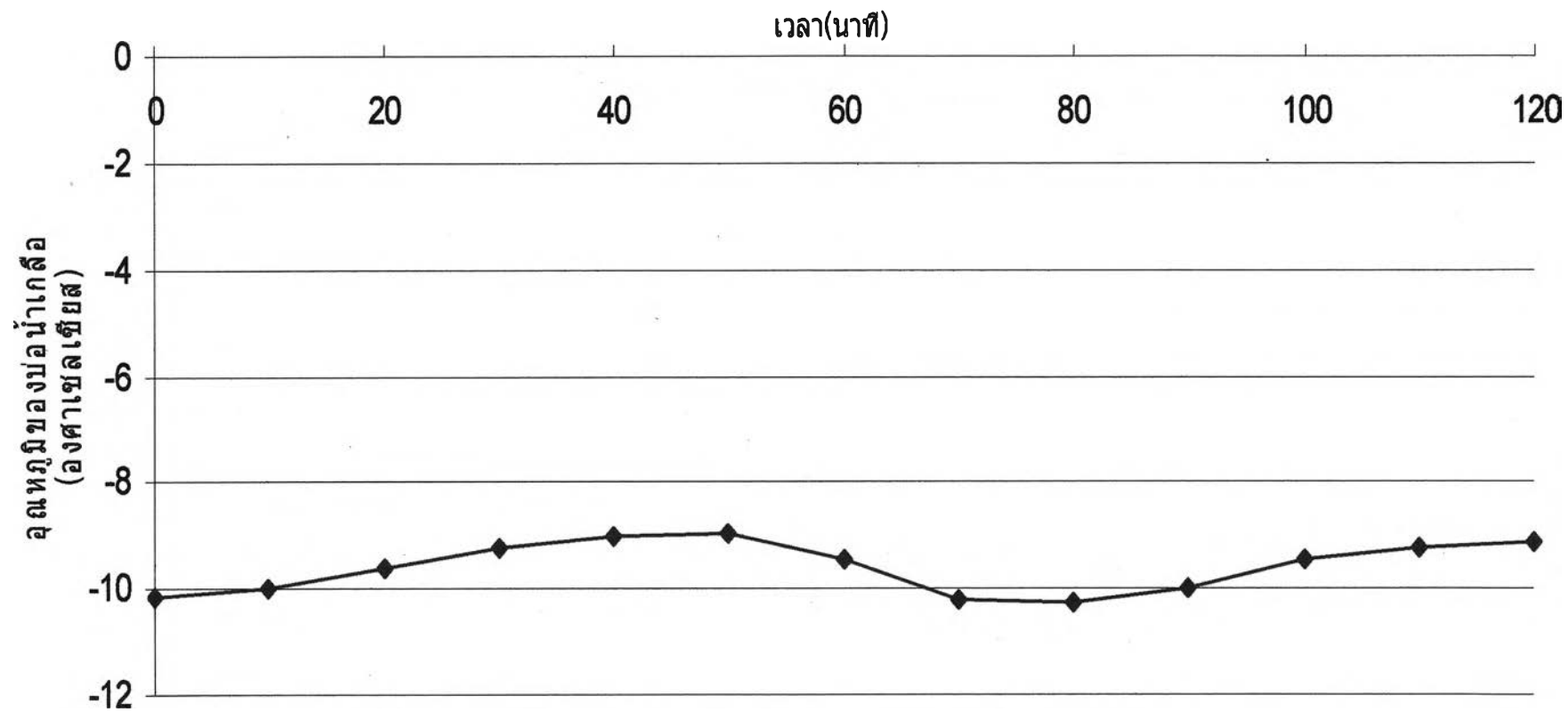
10. Hagen K.D.1999.Heat Transfer with applications.2<sup>nd</sup> edition.New Jersey . U.S.A. : Prentice-Hall International , Inc.
11. Holman ,J.P. 1997 . Heat Transfer. 8<sup>th</sup> edition.New York.U.S.A. : Mc Graw Hill.
12. Incropera ,Frank P. and DeWitt David P.1996.Introduction to Heat Transfer.3<sup>rd</sup> edition . New York . U.S.A. : Wiley.
13. Ismail,K.A.R. and Antonio, B.de J. 2001. Parametric study of solidification of PCM around a cylinder for ice-bank applications.International Journal of Refrigeration 24: 809-822.
14. Leong, K.C. and Tan ,F.L. 1997 .Experimental study of freezing in a rectangular enclosure. Journal of Materials Processing Technology 70:129-136.
15. öziŞik, M.Necati .1993.HeatConduction.2<sup>nd</sup> edition. New York .U.S.A. : WileyInter . Science .
- 16 .Stoecker , Wilbert F.1998.Industrial Refrigeration Handbook . New York.U.S.A.:Mc Graw Hill.
17. Vargas, J.V.C. and Bejan .A.1995.Fundamentals of ice making by convection followed by contact melting .International Journal of Heat and MassTransfer 38 : 2833-2841.
18. Wei ,P.S. , HUANG, C.C. and LEE , K.W. 2003. Nucleation of Bubbles on a Solidification Front Experiment and Analysis . Metallurgical and Materials Transcation B Volume34B : 321-332.
19. Wei ,P.S. , Kuo ,Y.K. , Chiu ,S.H. and Ho, C.Y. 2000 .Shape of a pore trapped in solid during solidification. International Journal of Heat and Mass Transfer 43 : 263-280.
20. Yamada, M. , Fukusako ,S. and Sayed ,M. Eman-Bellah .1996 .Free convection heat transfer around a horizontal ice cylinder formed through melting within an immiscible liquid. Heat and Mass Transfer 31: 419-426.

ภาคผนวก

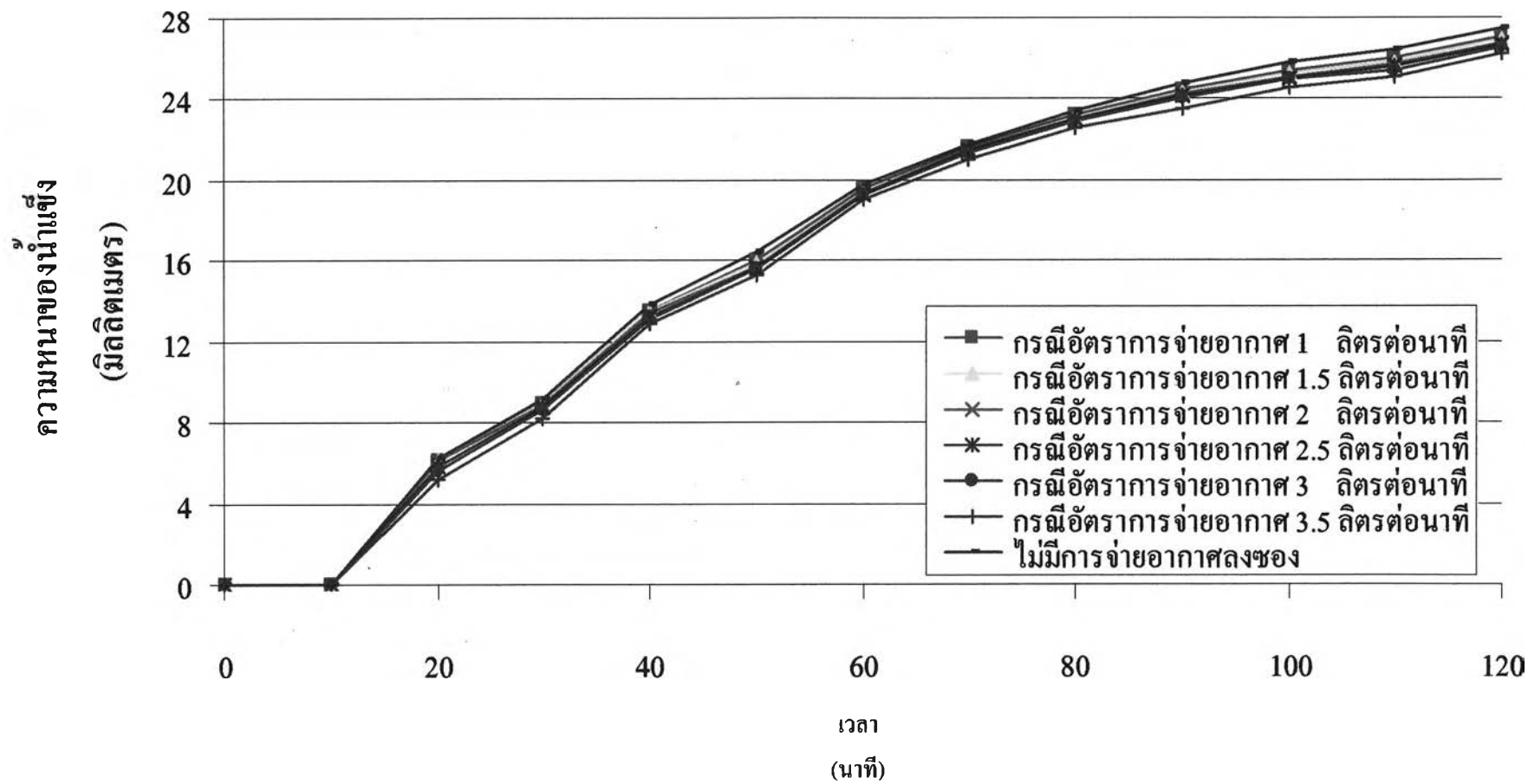
ภาคผนวก ก  
กราฟและตารางผลการทดลอง



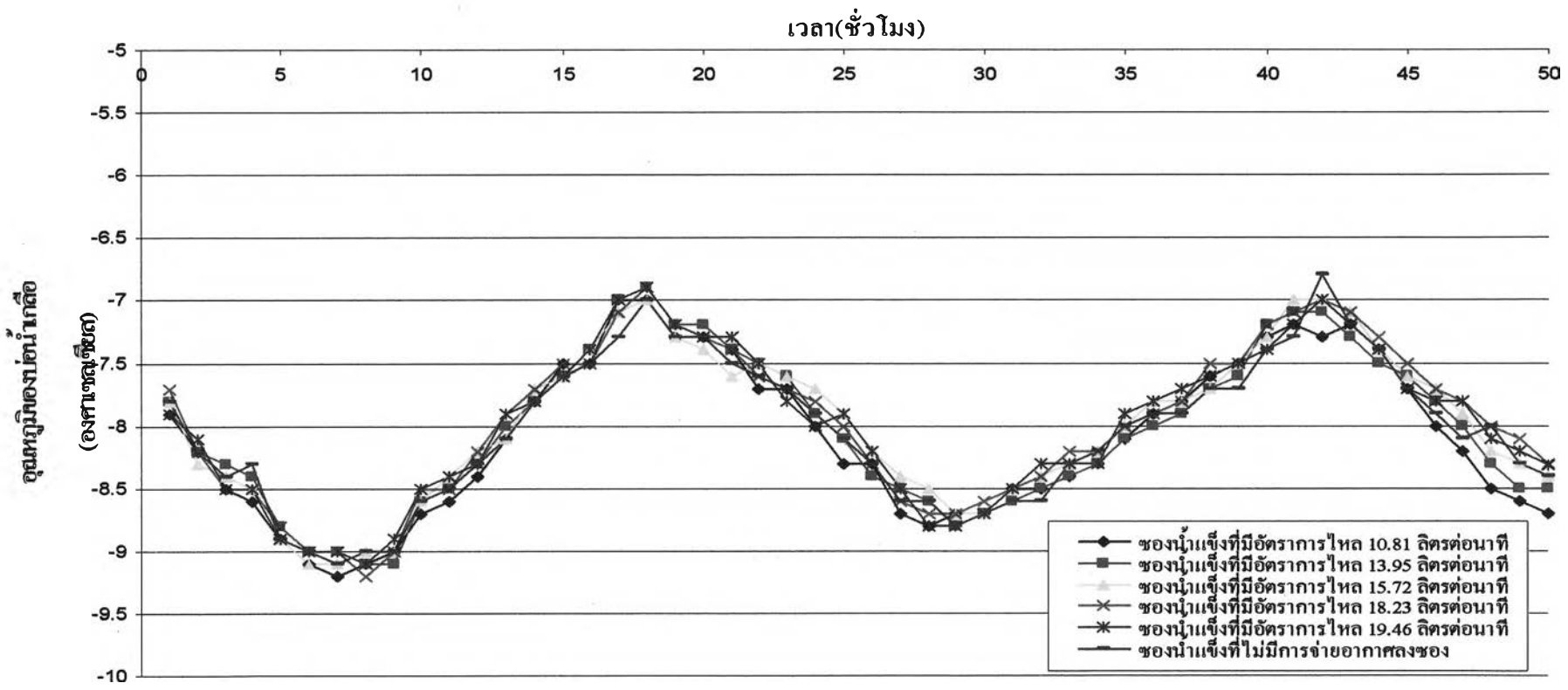
รูปที่ ก.1 แสดงค่าอุณหภูมิในบ่อน้ำเกลือขณะที่ดำเนินการทดลองในแต่ละกรณีของการทดลองจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ



รูปที่ ก.2 แสดงค่าผลรวมข้อผิดพลาดรวมในบ่อน้ำเกลือขณะทำการทดลองจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง

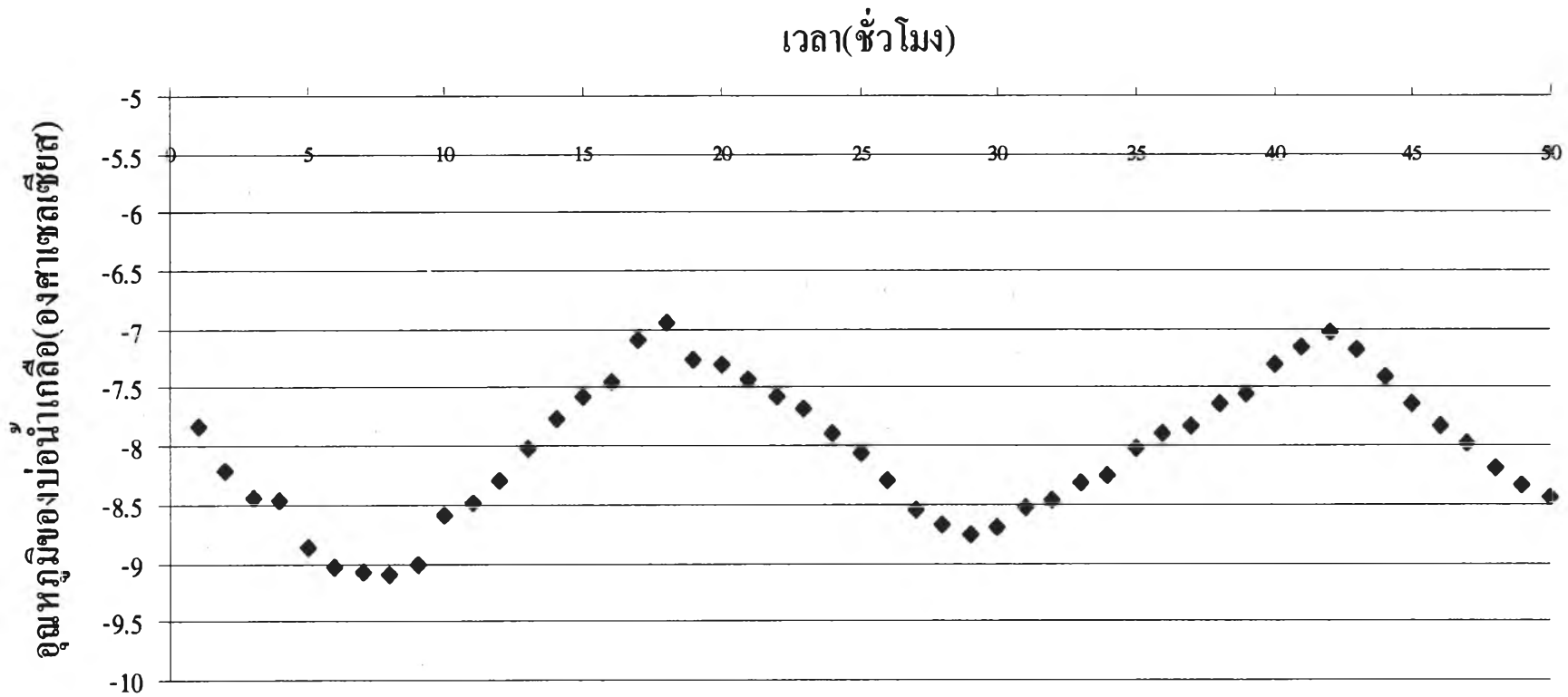


รูปที่ ก.3 แสดงอัตราการเติบโตของความหนาน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็ง

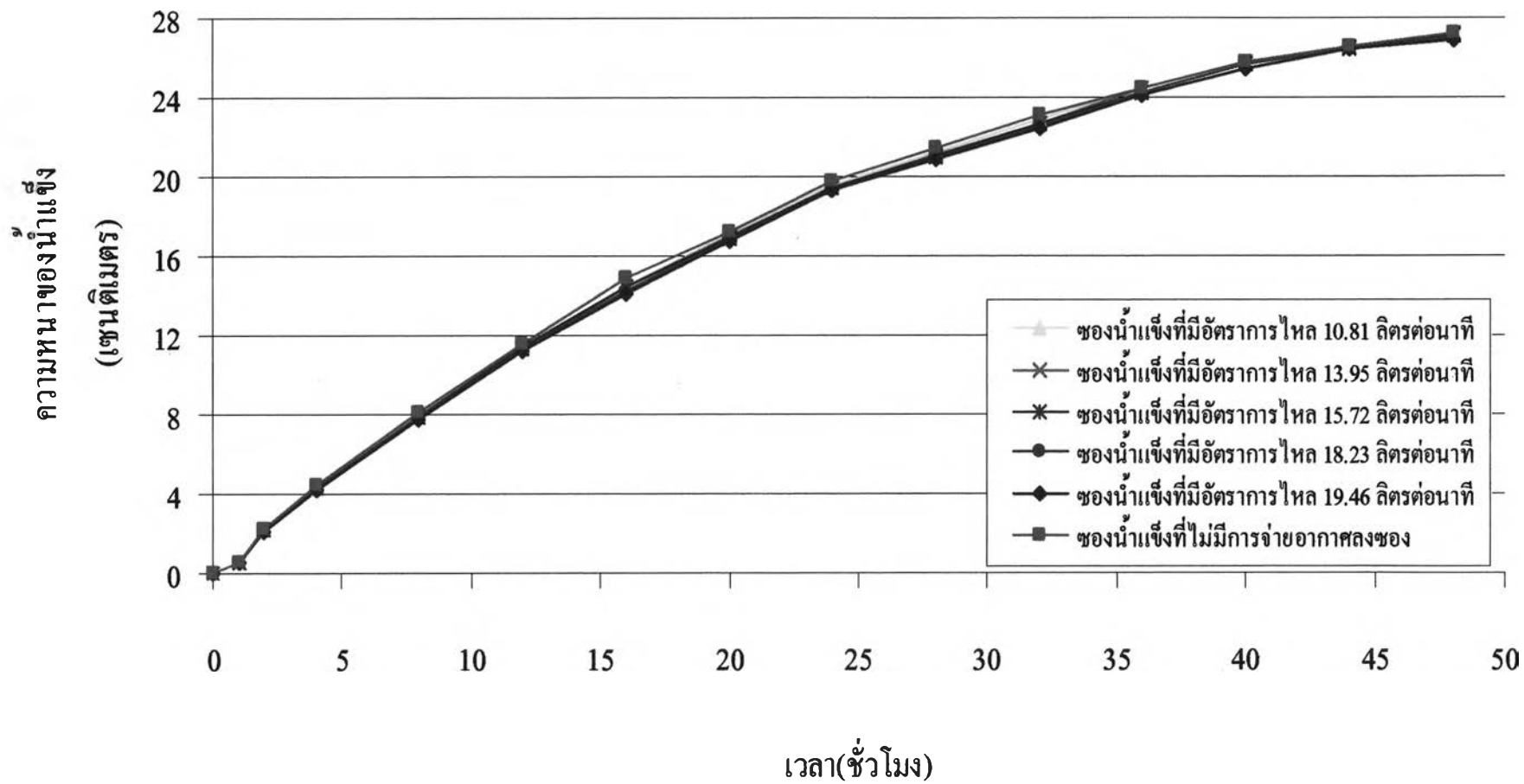


รูปที่ ก.4 แสดงค่าอุณหภูมิในบ่อน้ำเกลือขณะที่ดำเนินการวัดในแต่ละชองน้ำแข็งที่มีอัตราการจ่ายอากาศลงชองต่างกัน

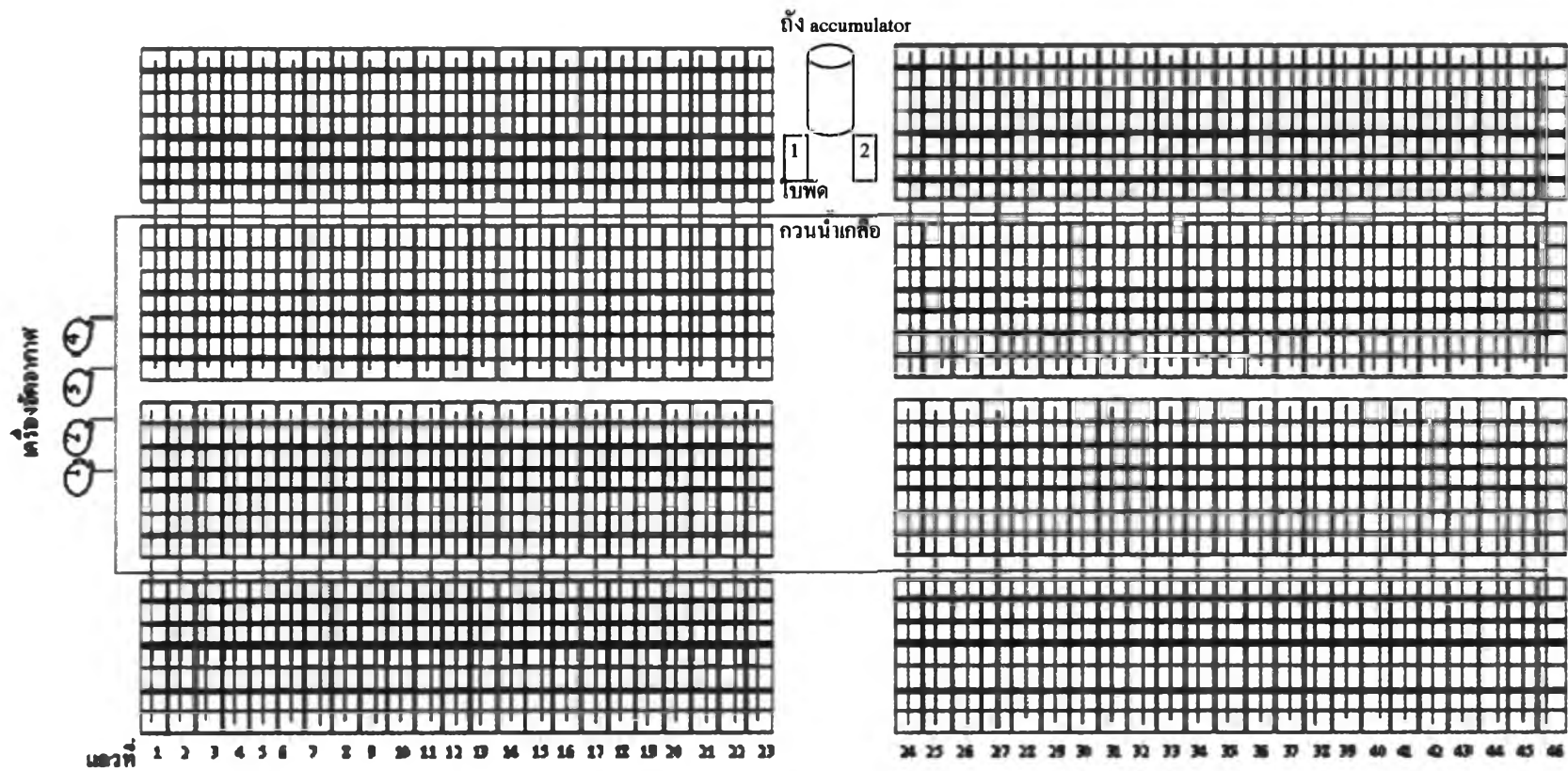




รูปที่ ก.5 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรวมในบ่อน้ำเกลือขณะที่ดำเนินการวัดในแต่ละของน้ำแข็งที่มีอัตราการจ่ายอากาศลงของต่างกัน



รูปที่ ก.6 รูปแสดงความหนาของน้ำแข็งที่เกิดในช่วงเวลาการผลิตในแต่ละกรณีของอัตราการไหล



รูปที่ ก.7 แสดงแผนผังของโรงงานน้ำแข็งที่ได้เข้าไปทำการวัดและบันทึกค่า

ตาราง ก.1 แสดงความหนาของน้ำแข็งในช่องน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งของที่  
อัตราการจ่ายอากาศต่างกัน ที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาที)	ความหนาของน้ำแข็งในช่องน้ำแข็งในกรณีที่มีอัตราการจ่ายต่างกัน (มิลลิเมตร)						
	1 ลิตรต่อ นาที	1.5 ลิตรต่อ นาที	2 ลิตรต่อ นาที	2.5 ลิตรต่อ นาที	3 ลิตรต่อ นาที	3.5 ลิตรต่อ นาที	ไม่มีการ จ่าย อากาศ
0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0
20	6.1	6.1	6.1	5.8	5.6	5.2	6.2
30	9	8.9	8.8	8.7	8.6	8.2	9.2
40	13.5	13.5	13.4	13.2	13.1	12.9	13.8
50	16	15.9	15.7	15.6	15.6	15.3	16.4
60	19.6	19.4	19.4	19.3	19.3	19	19.8
70	21.6	21.5	21.5	21.4	21.3	21	21.8
80	23.2	23.1	23	23	22.9	22.6	23.4
90	24.5	24.4	24.3	24.1	24	23.5	24.8
100	25.4	25.3	25.1	25	25	24.6	25.8
110	26	25.8	25.7	25.6	25.4	25.1	26.4
120	27.1	27	26.8	26.6	26.5	26.2	27.5

ตาราง ก.2 แสดงอุณหภูมิของน้ำเกลือรอบของน้ำแข็งจากแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ  
ที่อัตราการจ่ายอากาศต่างกัน ที่เวลาต่างๆ

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิของน้ำเกลือรอบของน้ำแข็งในกรณีที่มีอัตราการจ่ายต่างกัน (องศาเซลเซียส)						
	1 ลิตรต่อ นาทีก	1.5 ลิตรต่อ นาทีก	2 ลิตรต่อ นาทีก	2.5 ลิตรต่อ นาทีก	3 ลิตรต่อ นาทีก	3.5 ลิตรต่อ นาทีก	ไม่มีการ จ่าย อากาศ
0	-10.1	-10.3	-10.5	-10	-10.15	-10.05	-10.1
10	-10	-10.15	-10.2	-10.2	-9.65	-9.8	-9.9
20	-9.55	-9.8	-9.7	-9.55	-9.5	-9.55	-9.5
30	-9.3	-9.35	-9.2	-9.3	-9.4	-9	-9.2
40	-9	-9.3	-9.1	-8.95	-8.8	-8.85	-9
50	-8.85	-8.9	-8.75	-8.7	-8.85	-9.3	-9.2
60	-9.2	-9.3	-9.6	-9.4	-9.25	-9.6	-9.8
70	-10.1	-9.9	-10.25	-10.3	-10.1	-10.5	-10.3
80	-10.25	-10.25	-10.45	-10.2	-10.25	-10.3	-10.2
90	-10.1	-10.1	-9.9	-9.8	-10.1	-10.1	-9.9
100	-9.8	-10	-9.6	-9.8	-9.75	-9.85	-9.8
110	-9.45	-9.55	-9.45	-9.6	-9.5	-9.55	-9.6
120	-9.1	-9.2	-9.25	-9.2	-9.15	-9.25	-9.2

ตาราง ก.3 แสดงความหนาของน้ำแข็งในช่องน้ำแข็งจากการวัดใน โรงงานผลิตน้ำแข็งที่อัตราการ  
 จ่ายอากาศต่างกัน ที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ความหนาของน้ำแข็งในช่องน้ำแข็งในกรณีที่มีอัตราการจ่ายต่างกัน (เซนติเมตร)					
	10.81 ลิตรต่อนาที	13.95 ลิตร ต่อนาที	15.72 ลิตร ต่อนาที	18.23 ลิตร ต่อนาที	19.46 ลิตร ต่อนาที	ไม่มีการ จ่ายอากาศ
0	0	0	0	0	0	0
1	0.6	0.58	0.57	0.55	0.55	0.6
2	2.18	2.17	2.17	2.15	2.1	2.2
4	4.36	4.35	4.35	4.3	4.2	4.5
8	7.96	7.92	7.92	7.9	7.8	8.1
12	11.45	11.42	11.32	11.3	11.2	11.6
16	14.5	14.4	14.4	14.2	14.1	14.9
20	17.1	17.0	16.9	16.9	16.8	17.2
24	19.6	19.4	19.4	19.3	19.3	19.8
28	21.2	21.1	21	20.95	20.89	21.4
32	22.9	22.7	22.7	22.6	22.5	23.1
36	24.4	24.4	24.2	24.2	24.1	24.5
40	25.8	25.8	25.7	25.7	25.5	25.8
44	26.6	26.55	26.5	26.45	26.45	26.6
48	27.2	27.2	27.1	27	26.9	27.2

ตาราง ก.4 แสดงอุณหภูมิของน้ำเกลือรอบของน้ำแข็งจากการวัดในโรงงานผลิตน้ำแข็งที่อัตราการ  
จ่ายอากาศต่างกัน ที่เวลาต่างๆ

ครั้งที่	อุณหภูมิของน้ำเกลือรอบของน้ำแข็งในกรณีที่มีอัตราการจ่ายต่างกัน (องศาเซลเซียส)					
	10.81 ลิตรต่อนาที	13.95 ลิตร ต่อนาที	15.72 ลิตร ต่อนาที	18.23 ลิตร ต่อนาที	19.46 ลิตร ต่อนาที	ไม่มีการ จ่ายอากาศ
1	-7.9	-7.8	-7.8	-7.7	-7.9	-7.8
2	-8.2	-8.2	-8.3	-8.2	-8.1	-8.2
3	-8.5	-8.3	-8.4	-8.5	-8.5	-8.4
4	-8.6	-8.4	-8.5	-8.5	-8.5	-8.3
5	-8.9	-8.8	-8.9	-8.8	-8.9	-8.9
6	-9.1	-9	-9.1	-9	-9	-9
7	-9.2	-9	-9.1	-9	-9	-9.1
8	-9.1	-9.1	-9	-9.2	-9.1	-9
9	-9	-9.1	-9	-9	-8.9	-9
10	-8.7	-8.6	-8.6	-8.5	-8.5	-8.6
11	-8.6	-8.5	-8.4	-8.5	-8.4	-8.5
12	-8.4	-8.3	-8.2	-8.2	-8.3	-8.3
13	-8.1	-8	-8.1	-7.9	-7.9	-8.1
14	-7.8	-7.8	-7.7	-7.7	-7.8	-7.8
15	-7.5	-7.6	-7.6	-7.5	-7.6	-7.6
16	-7.5	-7.4	-7.4	-7.5	-7.4	-7.5
17	-7	-7	-7.1	-7.1	-7	-7.3
18	-7	-6.9	-7	-6.9	-6.9	-7
19	-7.3	-7.2	-7.3	-7.2	-7.2	-7.3
20	-7.3	-7.2	-7.4	-7.3	-7.3	-7.3
21	-7.4	-7.4	-7.6	-7.4	-7.3	-7.5
22	-7.7	-7.5	-7.5	-7.6	-7.5	-7.6
23	-7.7	-7.6	-7.6	-7.7	-7.8	-7.7
24	-8	-7.9	-7.7	-7.8	-8	-7.9
25	-8.3	-8.1	-7.9	-8	-7.9	-8.1

ตาราง ก.4 แสดงอุณหภูมิของน้ำเกลือรอบช่องน้ำแข็งจากการวัดในโรงงานผลิตน้ำแข็งที่อัตราการ  
จ่ายอากาศต่างกันที่เวลาต่างๆ (ต่อ)

ครั้งที่	อุณหภูมิของน้ำเกลือรอบช่องน้ำแข็งในกรณีที่มีอัตราการจ่ายต่างกัน (องศาเซลเซียส)					
	10.81 ลิตรต่อนาที	13.95 ลิตร ต่อนาที	15.72 ลิตร ต่อนาที	18.23 ลิตร ต่อนาที	19.46 ลิตร ต่อนาที	ไม่มีการ จ่ายอากาศ
26	-8.3	-8.4	-8.2	-8.3	-8.2	-8.3
27	-8.7	-8.5	-8.4	-8.6	-8.5	-8.6
28	-8.8	-8.6	-8.5	-8.7	-8.8	-8.6
29	-8.7	-8.8	-8.7	-8.7	-8.8	-8.8
30	-8.7	-8.7	-8.7	-8.6	-8.7	-8.7
31	-8.5	-8.6	-8.5	-8.5	-8.5	-8.6
32	-8.5	-8.5	-8.4	-8.4	-8.3	-8.6
33	-8.4	-8.4	-8.3	-8.2	-8.3	-8.3
34	-8.3	-8.3	-8.2	-8.2	-8.3	-8.2
35	-8.1	-8.1	-8	-8	-7.9	-8
36	-7.9	-8	-7.8	-7.9	-7.8	-7.9
37	-7.8	-7.9	-7.8	-7.8	-7.7	-7.9
38	-7.6	-7.7	-7.7	-7.5	-7.6	-7.7
39	-7.5	-7.6	-7.5	-7.5	-7.5	-7.7
40	-7.3	-7.2	-7.3	-7.2	-7.4	-7.4
41	-7.2	-7.1	-7	-7.1	-7.2	-7.3
42	-7.3	-7.1	-7	-7	-7	-6.8
43	-7.2	-7.3	-7.1	-7.1	-7.2	-7.2
44	-7.4	-7.5	-7.4	-7.3	-7.4	-7.4
45	-7.7	-7.6	-7.6	-7.5	-7.7	-7.7
46	-8	-7.8	-7.7	-7.7	-7.8	-7.9
47	-8.2	-8	-7.9	-7.8	-7.8	-8.1
48	-8.5	-8.3	-8.2	-8	-8.1	-8
49	-8.6	-8.5	-8.3	-8.1	-8.2	-8.3
50	-8.7	-8.5	-8.4	-8.3	-8.32	-8.4



ตาราง ก.5 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงช่องในกรณี 1 ลิตรต่อนาที

รอบ	v (mL)	t (sec)	$\pm v$ (mL)	$\pm t$ (sec)	Q (mL/sec)
1	285	17.5	-8	-0.3	16.28571
2	290	17.6	-3	-0.2	16.47727
3	295	17.7	2	-0.1	16.66667
4	295	17.7	2	-0.1	16.66667
5	285	17.6	-8	-0.2	16.19318
6	290	17.7	-3	-0.1	16.38418
7	290	17.8	-3	0	16.29213
8	295	17.9	2	0.1	16.48045
9	300	18.2	7	0.4	16.48352
10	305	18.3	12	0.5	16.66667
รวม	2930	178		Q(mL/sec)	16.46067
เฉลี่ย	293	17.8		Q(L/min)	0.98764

$$\begin{aligned}
 \text{ความคลาดเคลื่อนของการวัด} \quad d\dot{V} &= \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} dV \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} dt \right| \\
 &= 0.027743 + 0.040449 \quad \text{ลิตรต่อนาที} \\
 &= 0.068192 \quad \text{ลิตรต่อนาที} \\
 &= 6.9 \%
 \end{aligned}$$

ตาราง ก.6 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงช่องในกรณี 1.5 ลิตรต่อนาที

รอบ	v (mL)	t (sec)	±v (mL)	±t (sec)	Q (mL/sec)
1	295	11.5	4	-0.19	25.65217
2	290	11.6	-1	-0.09	25
3	290	11.6	-1	-0.09	25
4	295	11.5	4	-0.19	25.65217
5	285	11.5	-6	-0.19	24.78261
6	285	11.8	-6	0.11	24.15254
7	295	11.6	4	-0.09	25.43103
8	290	11.9	-1	0.21	24.36975
9	295	11.9	4	0.21	24.78992
10	290	12	-1	0.31	24.16667
รวม	2910	116.9		Q(mL/sec)	24.89307
เฉลี่ย	291	11.69		Q(L/min)	1.493584

ความคลาดเคลื่อนของการวัด  $d\dot{V} = \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} dV \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} dt \right|$

$$= 0.039607 + 0.0030796 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$= 0.070403 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$= 4.7 \%$$

ตาราง ก.7 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงช่องในกรณี 2 ลิตรต่อนาที

รอบ	v (mL)	t (sec)	±v (mL)	±t (sec)	Q (mL/sec)
1	240	7.1	-0.5	0.09	33.80282
2	245	7.2	4.5	0.19	34.02778
3	240	7	-0.5	-0.01	34.28571
4	240	6.9	-0.5	-0.11	34.78261
5	235	6.9	-5.5	-0.11	34.05797
6	240	6.8	-0.5	-0.21	35.29412
7	240	7	-0.5	-0.01	34.28571
8	245	7.1	4.5	0.09	34.50704
9	240	7.1	-0.5	0.09	33.80282
10	240	7	-0.5	-0.01	34.28571
รวม	2405	70.1		Q(mL/sec)	34.30813
เฉลี่ย	240.5	7.01		Q(L/min)	2.058488

ความคลาดเคลื่อนของการวัด  $d\dot{V} = \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} dV \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} dt \right|$

$$= 0.0061667 + 0.047076 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$= 0.108742 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$= 5.3 \%$$

ตาราง ก.8 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงช่องในกรณี 2.5 ลิตรต่อนาที

รอบ	v (mL)	t (sec)	±v (mL)	±t (sec)	Q (mL/sec)
1	215	5.2	-4.5	-0.04	41.34615
2	220	5.3	0.5	0.06	41.50943
3	225	5.5	5.5	0.26	40.90909
4	225	5.3	5.5	0.06	42.45283
5	220	5.2	0.5	-0.04	42.30769
6	220	5.2	0.5	-0.04	42.30769
7	215	5.1	-4.5	-0.14	42.15686
8	220	5.3	0.5	0.06	41.50943
9	215	5	-4.5	-0.24	43
10	220	5.3	0.5	0.06	41.50943
รวม	2195	52.4		Q(mL/sec)	41.88931
เฉลี่ย	219.5	5.24		Q(L/min)	2.513359

ความคลาดเคลื่อนของการวัด  $d\dot{V} = \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} dV \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} dt \right|$

$$= 0.124709 + 0.062977 \quad \text{ลิตรต่อนาที}$$

$$= 0.187686 \quad \text{ลิตรต่อนาที}$$

$$= 7.4 \%$$

ตาราง ก.9 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงของในกรณี 3 ลิตรต่อนาที

รอบ	v (mL)	t (sec)	±v (mL)	±t (sec)	Q (mL/sec)
1	220	4.2	9	0.11	52.38095
2	210	4.1	-1	0.01	51.21951
3	205	4	-6	-0.09	51.25
4	205	4.1	-6	0.01	50
5	215	4.2	4	0.11	51.19048
6	210	4	-1	-0.09	52.5
7	215	4.1	4	0.01	52.43902
8	210	4.1	-1	0.01	51.21951
9	205	4	-6	-0.09	51.25
10	215	4.1	4	0.01	52.43902
รวม	2110	40.9		Q(mL/sec)	51.58924
เฉลี่ย	211	4.09		Q(L/min)	3.095355

ความคลาดเคลื่อนของการวัด  $d\dot{V} = \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} dV \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} dt \right|$

$$= 0.083249 + 0.132029 \quad \text{ลิตรต่อนาที}$$

$$= 0.215278 \quad \text{ลิตรต่อนาที}$$

$$= 6.9 \%$$

ตาราง ก.10 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงของในกรณี 3.5 ลิตรต่อนาที

รอบ	v (mL)	t (sec)	±v (mL)	±t (sec)	Q (mL/sec)
1	195	3.3	0.5	0.03	59.09091
2	200	3.2	5.5	-0.07	62.5
3	195	3.3	0.5	0.03	59.09091
4	190	3.2	-4.5	-0.07	59.375
5	200	3.3	5.5	0.03	60.60606
6	190	3.3	-4.5	0.03	57.57576
7	195	3.2	0.5	-0.07	60.9375
8	195	3.3	0.5	0.03	59.09091
9	190	3.2	-4.5	-0.07	59.375
10	195	3.4	0.5	0.13	57.35294
รวม	1945	32.7		Q(mL/sec)	59.48012
เฉลี่ย	194.5	3.27		Q(L/min)	3.568807

$$\begin{aligned}
 \text{ความคลาดเคลื่อนของการวัด} \quad d\dot{V} &= \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} dV \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} dt \right| \\
 &= 0.141879 + 0.100917 \quad \text{ลิตรต่อนาที} \\
 &= 0.242797 \quad \text{ลิตรต่อนาที} \\
 &= 6.8 \%
 \end{aligned}$$

ตาราง ก.11 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงช่องในโรงงาน  
ในกรณี 10.81 ลิตรต่อนาที

รอบ	v (mL)	t (sec)	±v (mL)	±t (sec)	Q (mL/sec)
1	255	1.4	1	-0.01	182.1429
2	250	1.3	-4	-0.11	192.3077
3	255	1.5	1	0.09	170
4	250	1.5	-4	0.09	166.6667
5	260	1.4	6	-0.01	185.7143
6	255	1.4	1	-0.01	182.1429
7	250	1.3	-4	-0.11	192.3077
8	260	1.5	6	0.09	173.3333
9	255	1.3	1	-0.11	196.1538
10	250	1.5	-4	0.09	166.6667
รวม	2540	14.1		Q(mL/sec)	180.1418
เฉลี่ย	254	1.41		Q(L/min)	10.80851

$$\begin{aligned}
 \text{ความคลาดเคลื่อนของการวัด} \quad d\dot{V} &= \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial v} dv \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} dt \right| \\
 &= 0.843217 + 0.255319 \quad \text{ลิตรต่อนาที} \\
 &= 1.098536 \quad \text{ลิตรต่อนาที} \\
 &= 10.16 \%
 \end{aligned}$$

ตาราง ก.12 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงช่องในโรงงาน  
ในกรณี 13.95 ลิตรต่อนาที

รอบ	v (mL)	t (sec)	±v (mL)	±t (sec)	Q (mL/sec)
1	340	1.5	-8.5	0	226.6667
2	345	1.5	-3.5	0	230
3	350	1.5	1.5	0	233.3333
4	345	1.4	-3.5	-0.1	246.4286
5	350	1.5	1.5	0	233.3333
6	350	1.4	1.5	-0.1	250
7	350	1.5	1.5	0	233.3333
8	350	1.6	1.5	0.1	218.75
9	355	1.6	6.5	0.1	221.875
10	350	1.5	1.5	0	233.3333
รวม	3485	15		Q(mL/sec)	232.3333
เฉลี่ย	348.5	1.5		Q(L/min)	13.95

$$\begin{aligned}
 \text{ความคลาดเคลื่อนของการวัด} \quad d\dot{V} &= \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} dV \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} dt \right| \\
 &= 0.929333 + 0.34 \quad \text{ลิตรต่อนาที} \\
 &= 1.26933 \quad \text{ลิตรต่อนาที} \\
 &= 9.1 \%
 \end{aligned}$$



ตาราง ก.13 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงช่องในโรงงาน  
ในกรณี 15.73 ลิตรต่อนาที

รอบ	v (mL)	t (sec)	±v (mL)	±t (sec)	Q (mL/sec)
1	372	1.4	2.4	-0.01	265.7143
2	368	1.3	-1.6	-0.11	283.0769
3	370	1.5	0.4	0.09	246.6667
4	366	1.5	-3.6	0.09	244
5	366	1.4	-3.6	-0.01	261.4286
6	370	1.4	0.4	-0.01	264.2857
7	367	1.3	-2.6	-0.11	282.3077
8	372	1.5	2.4	0.09	248
9	370	1.3	0.4	-0.11	284.6154
10	375	1.5	5.4	0.09	250
รวม	3696	14.1		Q(mL/sec)	262.1277
เฉลี่ย	369.6	1.41		Q(L/min)	15.72766

$$\begin{aligned}
 \text{ความคลาดเคลื่อนของการวัด} \quad d\dot{V} &= \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} dV \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} dt \right| \\
 &= 1.226981 + 0.229787 \quad \text{ลิตรต่อนาที} \\
 &= 1.456768 \quad \text{ลิตรต่อนาที} \\
 &= 9.26 \%
 \end{aligned}$$

ตาราง ก.14 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงของในโรงงาน  
ในกรณี 18.21 ลิตรต่อนาที

รอบ	v (mL)	t (sec)	±v (mL)	±t (sec)	Q (mL/sec)
1	391	1.2	-3.45	-0.1	325.8333
2	394	1.3	-0.45	0	303.0769
3	395.5	1.3	1.05	0	304.2308
4	397.5	1.4	3.05	0.1	283.9286
5	394	1.3	-0.45	0	303.0769
6	391	1.2	-3.45	-0.1	325.8333
7	396	1.3	1.55	0	304.6154
8	397.5	1.4	3.05	0.1	283.9286
9	395	1.3	0.55	0	303.8462
10	393	1.3	-1.45	0	302.3077
รวม	3944.5	13		Q(mL/sec)	303.4231
เฉลี่ย	394.45	1.3		Q(L/min)	18.20538

ความคลาดเคลื่อนของการวัด  $d\dot{V} = \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} dV \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} dt \right|$

$$= 1.400414 + 0.159231 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$= 1.559645 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$= 4.2 \%$$

ตาราง ก.15 แสดงการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายลงในโรงงาน

ในกรณี 19.46 ลิตรต่อนาที

รอบ	v (mL)	t (sec)	±v (mL)	±t (sec)	Q (mL/sec)
1	425	1.3	3.2	0	326.9231
2	420	1.3	-1.8	0	323.0769
3	422	1.2	0.2	-0.1	351.6667
4	425	1.3	3.2	0	326.9231
5	418	1.3	-3.8	0	321.5385
6	420.5	1.3	-1.3	0	323.4615
7	425	1.4	3.2	0.1	303.5714
8	422.5	1.4	0.7	0.1	301.7857
9	421	1.3	-0.8	0	323.8462
10	419	1.2	-2.8	-0.1	349.1667
รวม	4218	13		Q(mL/sec)	324.4615
เฉลี่ย	421.8	1.3		Q(L/min)	19.46769

ความคลาดเคลื่อนของการวัด  $d\dot{V} = \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} dV \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} dt \right|$

$$= 1.497515 + 0.175385 \quad \text{ลิตรต่อนาที}$$

$$= 1.672899 \quad \text{ลิตรต่อนาที}$$

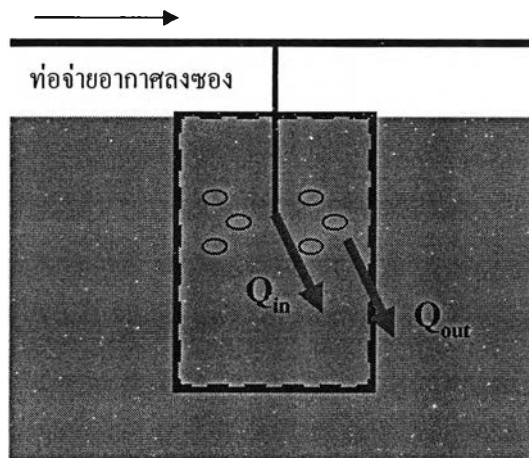
$$= 4.18 \%$$

ภาคผนวก ข

ภาคการคำนวณ

## ภาคผนวก ข การคำนวณเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศเปรียบเทียบกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำกับน้ำเกลือ

การพิจารณาเริ่มจากปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ ข.1 เพื่อหาอิทธิพลของความร้อนจากอากาศที่ถ่ายลงของ โดยวิธีการวิเคราะห์จะพิจารณาในส่วนของอัตราการความร้อนที่ออกจากปริมาตรควบคุม คือ อัตราการทำความเย็นของน้ำเกลือในบ่อต่อของน้ำแข็งและในส่วนของอัตราการความร้อนที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม คือ อัตราความร้อนที่ถ่ายเทจากอากาศเข้าสู่ น้ำ การวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

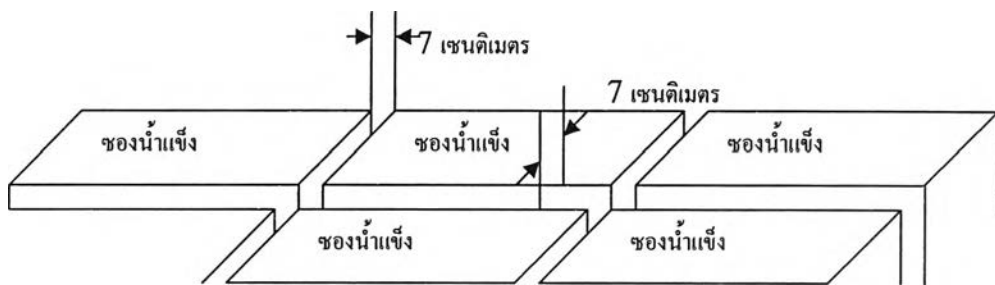


รูปที่ ข.1 แสดงปริมาตรควบคุมของของน้ำแข็ง

### การคำนวณค่าอัตราการทำความเย็นของน้ำแข็งเฉลี่ยต่อของ

อัตราการทำความเย็นของน้ำแข็งเฉลี่ยต่อของ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำในช่องน้ำแข็งไปสู่ น้ำเกลือซึ่งทำหน้าที่เป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงไว้ในรูปที่ ข.2 พิจารณาจากการวางระยะห่างของช่องน้ำแข็งทั่วไปในโรงงาน ซึ่งมีขนาดของช่อง 0.28 x 0.56 x 1.5 เมตร แต่ละช่องเว้นระยะห่างไว้ประมาณ 7 เซนติเมตร การถ่ายเทความร้อนจากน้ำในช่องสู่ น้ำเกลือถือได้ว่าเป็นการถ่ายพาความร้อนแบบอิสระระหว่างช่องขนาน (free convection between parallel plate) ซึ่งน้ำเกลือที่ไหลระหว่างช่องว่างระหว่างช่องไหลด้วยอัตราเร็วต่ำ น้ำเกลือที่ไหลอยู่ในโรงงานมีความเข้มข้นประมาณ 25 % และมีอุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของผิวของน้ำแข็งมีค่า 0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำในช่อง 30 องศาเซลเซียส การคำนวณมีข้อสมมติฐานดังนี้

1. ด้านทุกด้าน ของช่องน้ำแข็งมีระยะห่างจากช่องข้างเคียงเท่ากัน
2. ความหนาของช่องน้ำแข็งไม่มากจึงสมมติให้ค่าความต้านทานความร้อนของช่องต่ำ
3. น้ำเกลือมีลักษณะการไหลระหว่างด้านทั้ง 4 ของช่องน้ำแข็งเช่นเดียวกัน
4. อุณหภูมิของน้ำเกลือในบ่อน้ำเกลือมีค่าเท่ากันทั่วบริเวณและคงที่ตลอดกระบวนการผลิต
5. อุณหภูมิของผิวช่องในบ่อน้ำเกลือมีค่าเท่ากันทั่วบริเวณและคงที่ตลอดกระบวนการผลิต
6. อุณหภูมิของน้ำในช่องมีค่าเท่ากันเพื่อไม่คิดการนำความร้อนระหว่างน้ำภายในช่อง



รูปที่ ข.2 แสดงระยะห่างและการวางของช่องน้ำแข็งในโรงงาน

สมบัติต่างๆของน้ำเกลือพิจารณาที่อุณหภูมิกะเปาะ(bulb temperature) โดยจะทำการคำนวณค่าตัวเลข Rayleigh, Ra ของการพาความร้อนแบบอิสระระหว่างช่องขนาน โดยหาจากความสัมพัทธ์

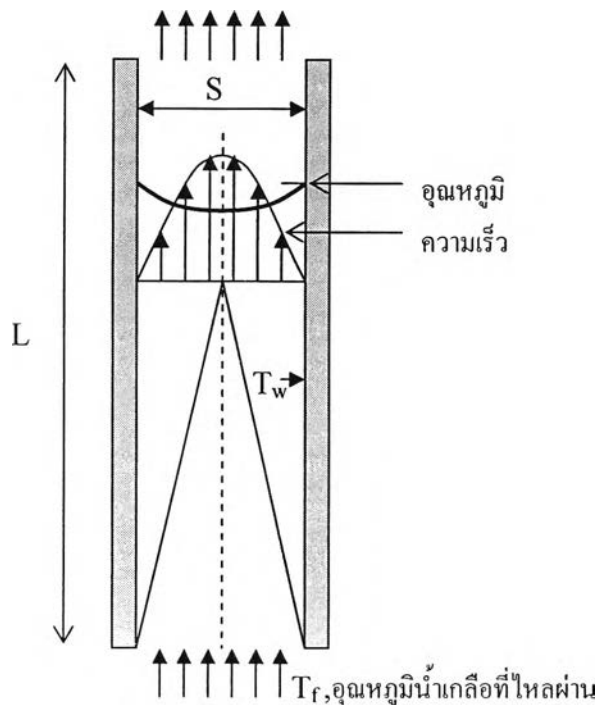
$$Ra = \frac{(T_f - T_w)g \ s^3 \ \beta}{\nu \ \alpha} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ	$T_w$	=	อุณหภูมิผิวของช่องน้ำแข็ง (K)
	$T_f$	=	อุณหภูมิของน้ำเกลือ (K)
	$g$	=	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ )
	$s$	=	ระยะห่างระหว่างช่อง (m)
	$\beta$	=	ค่า thermal diffusivity ( $m^2/s$ )
	$\nu$	=	ค่า kinematic viscosity ( $m^2/s$ )
	$\alpha$	=	ค่า coefficient of expansion ( $1/K$ ) = $\frac{1}{T}$

ตารางที่ ข.1 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการทำความเย็นของน้ำแข็งเจือต่อช่อง

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ขนาดของช่องน้ำแข็ง	0.28 x 0.56 x 1.5	m
ระยะห่างระหว่างช่อง	0.07	m
พื้นที่ผิว	2.52	m <sup>2</sup>
ปริมาตรของน้ำ	0.352	m <sup>3</sup>
อุณหภูมิผิวของน้ำแข็ง	0	°C
อุณหภูมิน้ำเกลือ	-10	°C
อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ	30	°C

รูปแบบของการพาความร้อนแบบอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่างของแผ่นคู่ขนาน ดังแสดงในรูปที่ ข.3 ปลายของช่องว่างทั้งสองด้านเปิดและมีของไหลอุณหภูมิ  $T_f$  ภายในโดยจะมีการเคลื่อนที่จากแรงลอยตัว บริเวณทางเข้าของช่องขนานจะเกิดชั้นขอบเขตชั้นบริเวณผิวหน้าของด้านทั้งสอง โดย  $s$  คือ ระยะห่างระหว่างช่อง และ  $L$  คือ ความยาวของช่อง หากอัตราส่วนของ  $s/L$  มีค่ามาก ชั้นขอบเขตจะเกิดขึ้น โดยไม่เกี่ยวข้องกัน หากอัตราส่วนของ  $s/L$  มีค่าน้อย การไหลจะเป็นการไหลผ่านท่อแคบและเป็นการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (fully develop flow)



รูปที่ ข.3 แสดงรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเร็วของการไหลผ่านช่องขนานของน้ำเกลือ

ค่าตัวเลข Nusselt ในกรณี Isothermal Surface สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\overline{Nu}_S = \left[ \frac{C_1}{(Ra_{GS}/L)^2} + \frac{C_2}{(Ra_{GS}/L)^{1/2}} \right]^{-1/2} \quad (\text{ข.2})$$

ตาราง ข.2 แสดงค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  สำหรับสภาพเงื่อนไขต่างกัน

สภาพเงื่อนไข	$C_1$	$C_2$
Isothermal Plates ( $T_{w,1} = T_{w,2}$ )	576	2.873
Uniform Heat Flux Plates ( $q_{w,1} = q_{w,2}$ )	12	1.88
Isothermal/Adiabatic Plates ( $T_{w,1}, q_{w,2} = 0$ )	144	2.873
Uniform Heat Flux/Adiabatic Plates ( $q_{w,1}, q_{w,2} = 0$ )	6	1.88

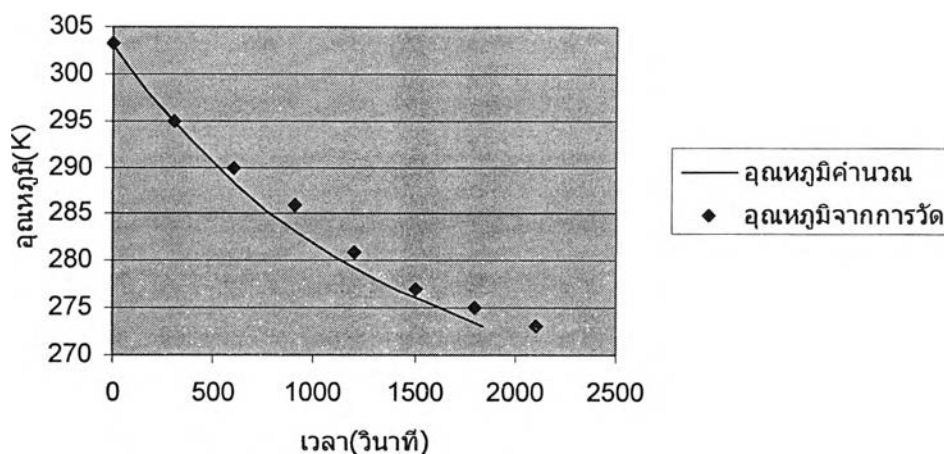
จากการคำนวณค่าตัวเลข Rayleigh จากสมการที่ ข.1 ได้ค่า  $2.97 \times 10^8$  และเมื่อนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ ข.2 เพื่อหาตัวเลข Nusselt ในกรณีการพาความร้อนแบบอิสระระหว่างช่องขนาน และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h$  ได้ค่า 35.98 และ 293.55 ตามลำดับ และเมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง lump heat-capacity system ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 เพื่อนำมาคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 0 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.3) พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 0 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 1837 วินาทีหรือประมาณ 30 นาที ซึ่งเมื่อเทียบกับการวัดจริง ซึ่งใช้เวลาประมาณ 36 นาที โดยแสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและการวัดไว้ในรูปที่ ข.4

$$\frac{(T - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)} = \exp \left[ - \left( \frac{hA}{\rho c_p V} \right) t \right] \quad (\text{จากสมการที่ 3.3})$$

$$t = \left( \ln \frac{(273 - 263)}{(303 - 263)} \right) * \left( \frac{(997.55) (4180)(0.235)}{(293.55)(2.52)} \right)$$

$$= 1837 \quad \text{s}$$





รูปที่ ข.4 แสดงกราฟผลการคำนวณเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 0 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการวัดจริง

เมื่อทราบเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของน้ำจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 0 องศาเซลเซียส ทำให้เราสามารถคำนวณค่าอัตราการทำความเย็นต่อชองน้ำแข็งได้ โดยคิดจากความร้อนสัมผัส (sensible heat) ของน้ำ ที่มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$Q_s = mc_p \Delta T \quad (\text{ข.3})$$

เมื่อ  $Q_s$  = ความร้อนสัมผัส (kJ)  
 $m$  = มวลของน้ำ (kg)  
 $c_p$  = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg · °C)  
 $\Delta T$  = ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำ (°C)

จากสมการที่ ข.3 สามารถคำนวณค่าความร้อนสัมผัสของน้ำที่เปลี่ยนอุณหภูมิจาก 30 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิจาก 0 องศาเซลเซียส ได้

$$Q_s = 2.94 \times 10^5 \quad \text{kJ}$$

เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 30 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิจาก 0 องศาเซลเซียส

$$t = 1,837 \quad \text{s}$$

ดังนั้นอัตราการทำความเย็นเฉลี่ยของน้ำแข็งต่อชอง

$$\dot{Q} = 16 \quad \text{kW}$$

อัตราการทำความเย็นเฉลี่ยของน้ำแข็งต่อชองนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับอัตราการร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ชองน้ำแข็งจากอากาศที่จ่ายลงชอง

### การคำนวณค่าอัตราความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ของน้ำแข็งจากอากาศที่จ่ายลงของ

การคำนวณค่าอัตราความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ของน้ำแข็งจากอากาศ ที่จ่ายลงของ โดยจะพิจารณาในกรณีอัตราการไหลที่มากที่สุดที่พบในโรงงาน คือ 20.25 ลิตรต่อนาที และตั้งข้อสมมติฐานเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณ ดังนี้

1. การไหลของอากาศเป็นการไหลแบบคงตัว (steady flow)
2. สมบัติของอากาศมีค่าคงที่
3. ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของอากาศคิดในกรณีที่เกิดการถ่ายเทความร้อนสัมผัสของอากาศสู่น้ำในช่องทั้งหมด

โดยการคำนวณค่าอัตราความร้อนสัมผัสมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ ข.4

$$\dot{Q}_S = m c_p \Delta T \quad (\text{ข.4})$$

เมื่อ	$\dot{Q}_S$	=	อัตราความร้อนสัมผัส (kW)
	$m$	=	อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
	$c_p$	=	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg · °C)
	$\Delta T$	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศ (°C)

เมื่อแทนค่าเข้าไปในสมการ ข.4

$$\begin{aligned} \dot{Q}_S &= \left[ (20.25 \frac{\text{L}}{\text{min}}) \left( \frac{1}{1000} \frac{\text{m}^3}{\text{L}} \right) (1.293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \left( \frac{1}{60} \frac{\text{min}}{\text{s}} \right) \right] (1.005)(30) && \text{kW} \\ &= 1.3 \times 10^{-2} && \text{kW} \end{aligned}$$

อัตราความร้อนของอากาศที่ถ่ายเทสู่น้ำที่ผลิตน้ำแข็ง เมื่อนำไปเทียบกับอัตราการทำความเย็นต่อของน้ำแข็งที่กล่าวถึงในส่วนก่อนหน้านี้ พบว่าอัตราทำความเย็นเฉลี่ยต่อของน้ำแข็งมีค่ามากกว่าอัตราความร้อนที่เป็นผลจากอากาศที่จ่ายลงของอยู่ประมาณ 1000 เท่า จึงสรุปได้ว่า อัตราความร้อนที่เป็นผลจากอากาศที่จ่ายลงของในระบบการผลิตน้ำแข็งของมีผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งน้อยมาก สอดคล้องกับผลการบันทึกเวลาที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งจากในโรงงาน



ภาคผนวก ค

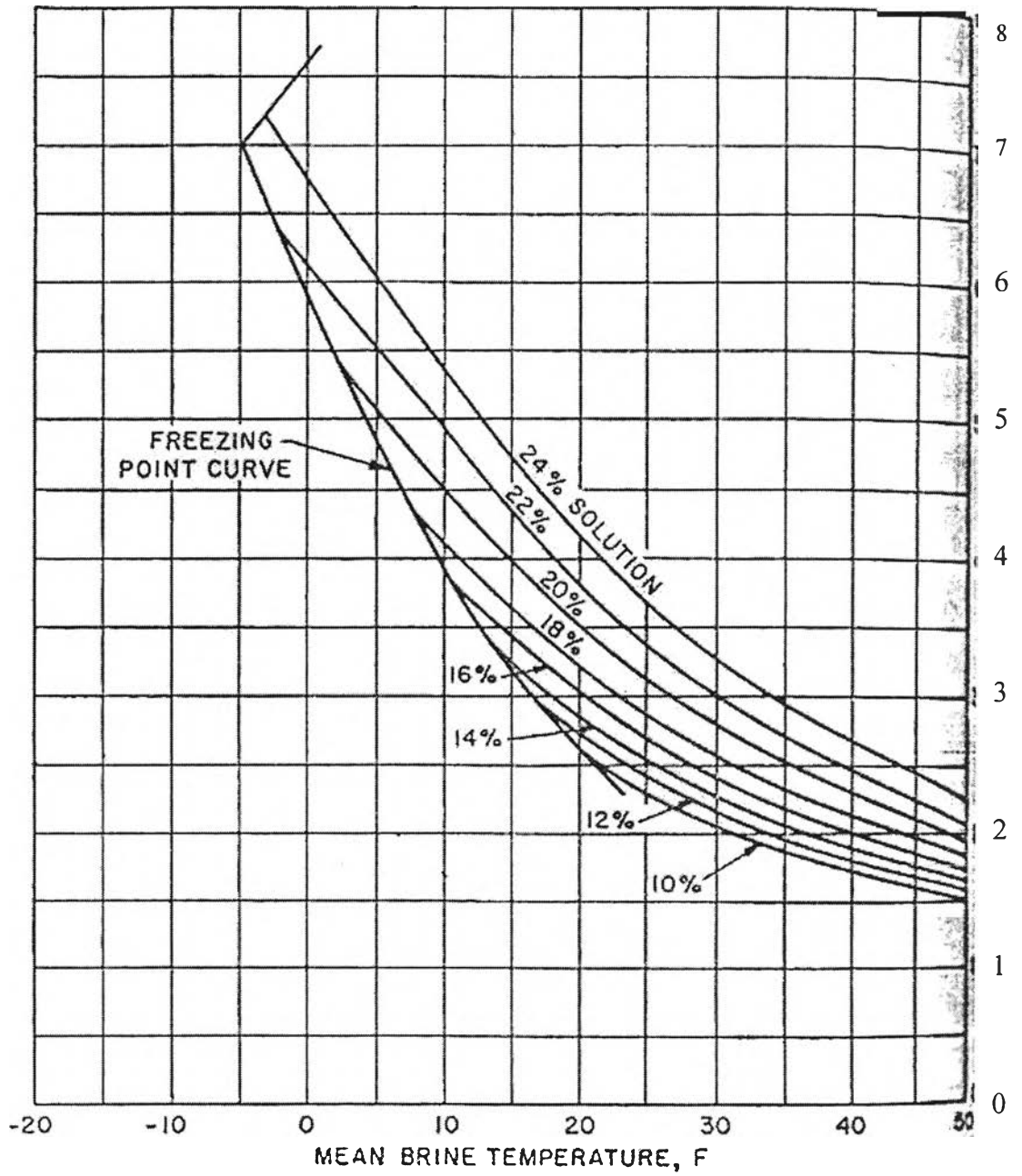
สมบัติของน้ำ อากาศ และน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์

ตารางที่ ค.1 คุณสมบัติของน้ำ ที่ความดันบรรยากาศ

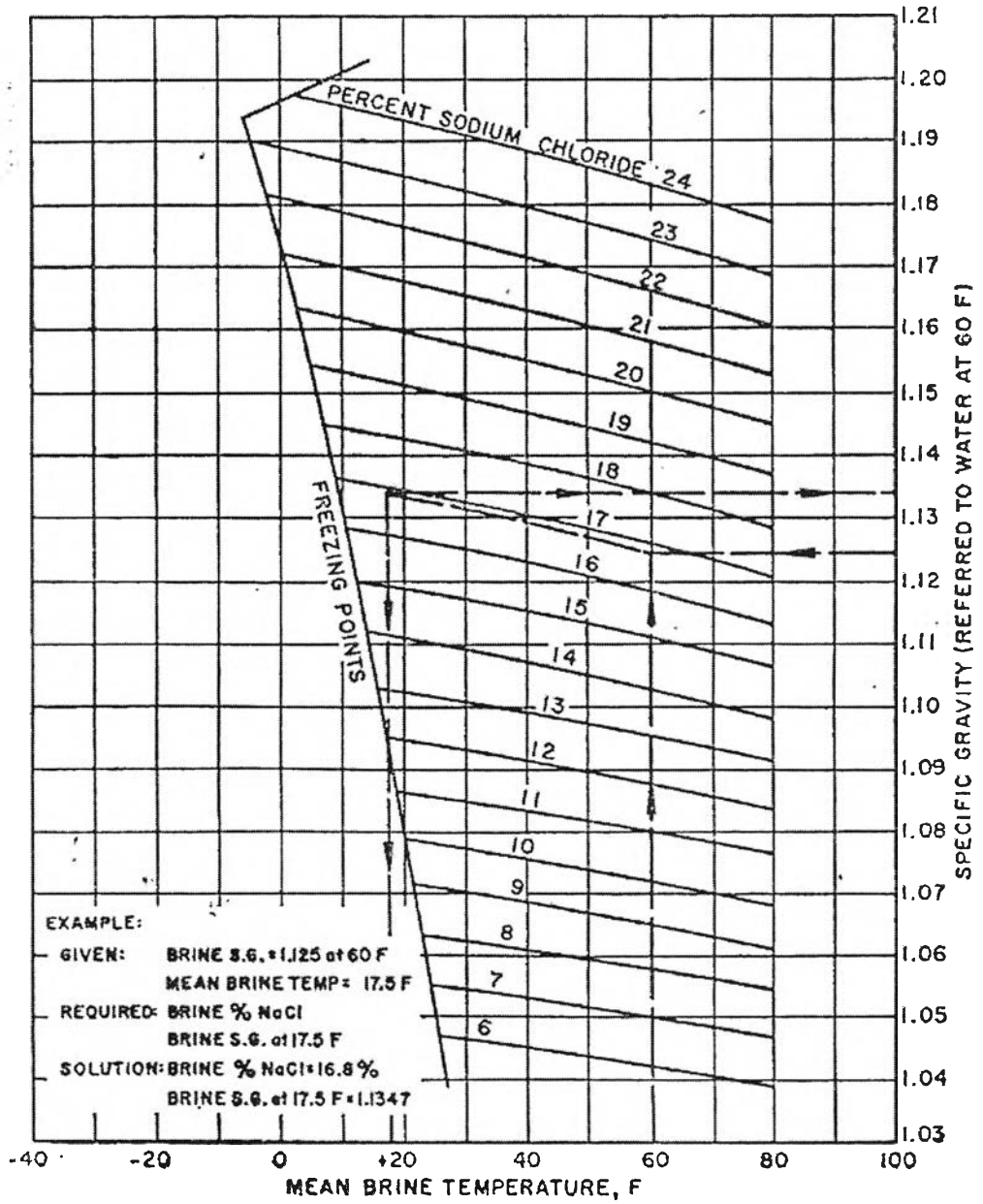
อุณหภูมิ (°C)	$\rho,$ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c_p,$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}}$	$\nu,$ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 10^6$	$k,$ $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	$\alpha$ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Pr	$\beta, \text{K}^{-1}$ $\times 10^3$
0	1002.28	4.2178	1.788	0.552	1.308	13.6	0.18
20	1000.52	4.1818	1.006	0.597	1.430	7.02	
40	994.59	4.1784	0.658	0.628	1.512	4.34	
60	985.46	4.1843	0.478	0.651	1.554	3.02	
80	974.08	4.1964	0.364	0.668	1.636	2.22	
100	960.63	4.2161	0.294	0.680	1.680	1.74	
120	945.25	4.250	0.247	0.685	1.708	1.446	
140	928.27	4.283	0.214	0.684	1.724	1.241	
160	909.69	4.342	0.190	0.680	1.729	1.099	
180	889.03	4.417	0.173	0.675	1.724	1.004	
200	866.76	4.505	0.160	0.665	1.706	0.937	
220	842.41	4.610	0.150	0.652	1.680	0.891	
240	815.66	4.756	0.143	0.635	1.639	0.871	
260	785.87	4.949	0.137	0.611	1.577	0.874	
280	752.55	5.208	0.135	0.580	1.481	0.910	
300	714.26	5.728	0.135	0.540	1.324	1.019	

ตารางที่ ค.2 คุณสมบัติของอากาศ ที่ความดันบรรยากาศ

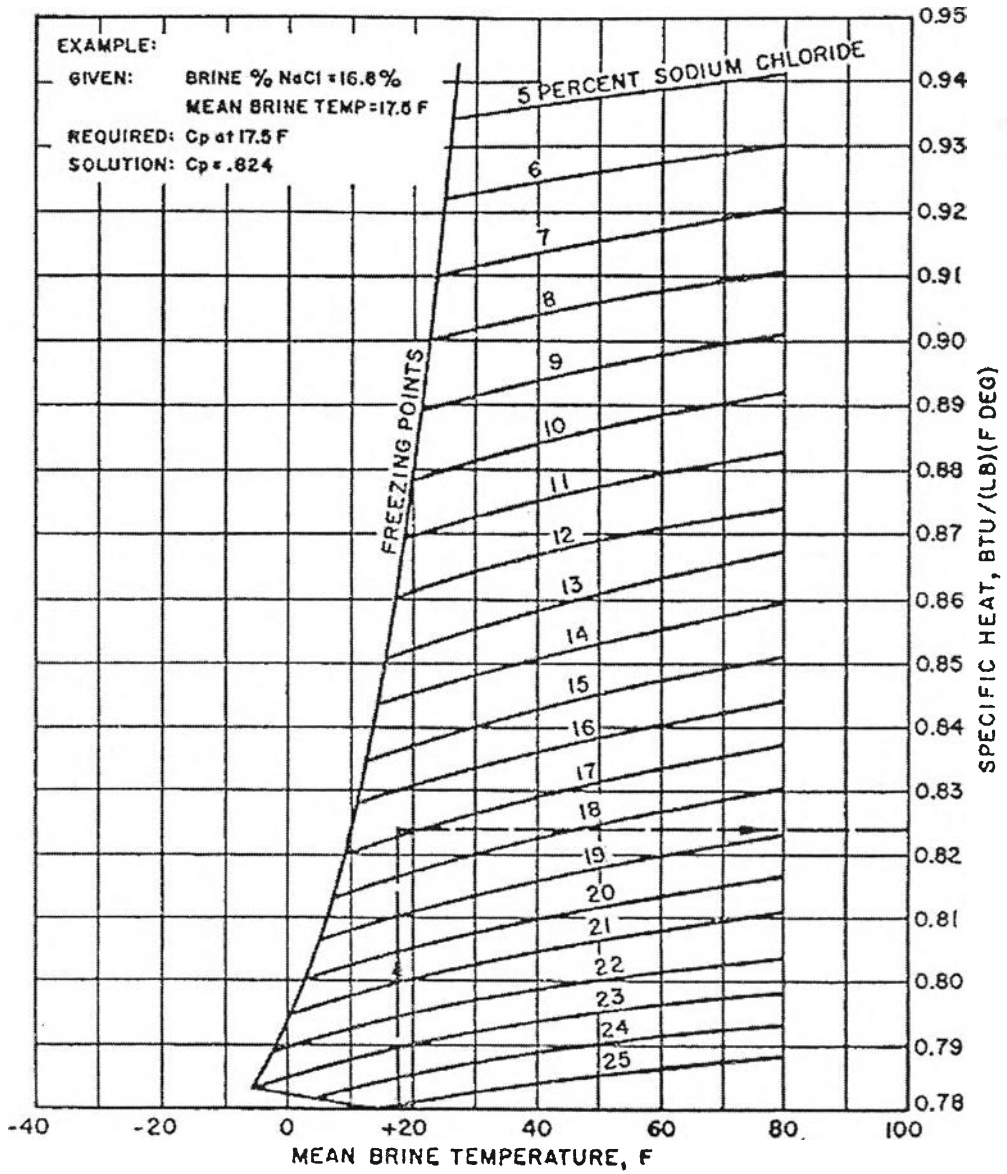
อุณหภูมิ (°C)	$\rho,$ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c_p,$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}}$	$k,$ $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	$\nu,$ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 10^6$	$\beta$ $b \times 10^{-3}$ $\text{K}^{-1}$	ตัวเลข Prandtl $Pr$
-150	2.793	1.026	0.0116	3.08	8.21	0.76
-100	1.980	1.009	0.0160	5.95	5.82	0.74
-50	1.534	1.005	0.0204	9.55	4.51	0.725
0	1.293	1.005	0.0243	13.30	3.67	0.715
20	1.205	1.005	0.0257	15.11	3.43	0.713
40	1.127	1.005	0.0271	16.97	3.20	0.711
60	1.067	1.009	0.0285	18.90	3.00	0.709
80	1.000	1.009	0.0299	20.94	2.83	0.708
100	0.946	1.009	0.0314	23.06	2.68	0.703
120	0.898	1.013	0.0328	25.23	2.55	0.70
140	0.854	1.013	0.0343	27.55	2.43	0.695
160	0.815	1.017	0.0358	29.85	2.32	0.69
180	0.779	1.022	0.0372	32.29	2.21	0.69
200	0.746	1.026	0.0386	34.63	2.11	0.685
250	0.675	1.034	0.0421	41.17	1.91	0.68
300	0.616	1.047	0.0454	47.85	1.75	0.68
350	0.566	1.055	0.0485	55.05	1.61	0.68
400	0.524	1.068	0.0515	62.53	1.49	0.68



รูปที่ ค.1 แสดงค่าความหนืดของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์

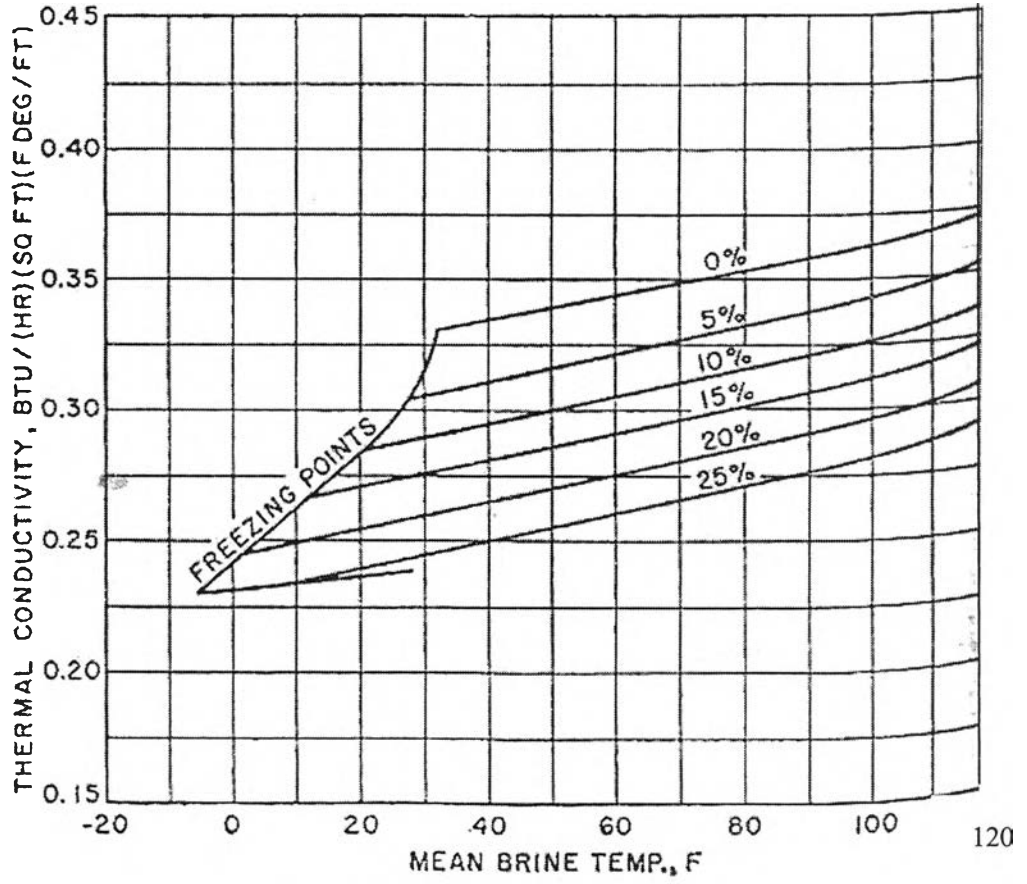


รูปที่ ค.2 แสดงค่า specific gravity ของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์



รูปที่ ค.3 แสดงค่า specific heat ของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์





รูปที่ ค.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์

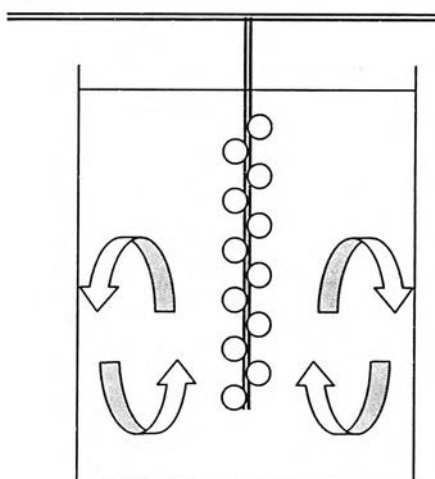
ภาคผนวก ง

ลักษณะการไหลของน้ำในช่องน้ำแข็ง

## รูปแบบการไหลวนของน้ำในช่อง

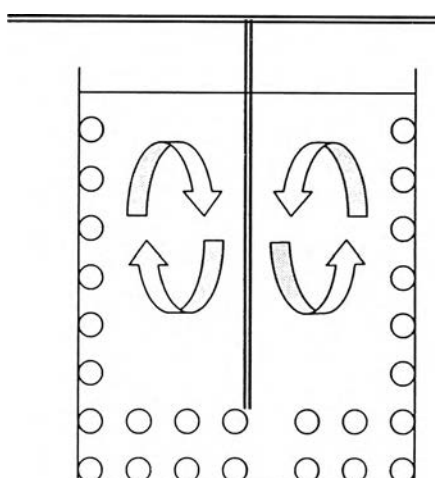
จากการสังเกตลักษณะการลอยของฟองอากาศขึ้นสู่ปากช่อง ซึ่งมีผลต่อการไหลวนของน้ำในช่อง แบ่งลักษณะการไหลขึ้นของฟองอากาศได้ ดังนี้

1. ในกรณีที่อัตราการจ่ายน้อย ฟองอากาศจะไหลขึ้นบริเวณกลางช่อง ติดกับท่อขึ้นสู่ปากช่อง ซึ่งกรณีนี้เป็นกรณีที่พบในโรงงานผลิตน้ำแข็ง โดยลักษณะการไหลวนของน้ำเป็นดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 รูปแบบการไหลวนของน้ำในช่องกรณีที่อัตราการจ่ายน้อย

2. ในกรณีที่อัตราการจ่ายมาก ฟองอากาศจะไหลขึ้นบริเวณขอบช่องสู่ปากช่อง ลักษณะการไหลวนของน้ำเป็นดังรูปที่ ง.2



รูปที่ ง.2 รูปแบบการไหลวนของน้ำในช่องกรณีที่อัตราการจ่ายมาก

## ภาคผนวก จ

มาตรฐานของน้ำที่ใช้ในโรงงานผลิตน้ำแข็งซอง

## มาตรฐานของน้ำที่ใช้ในโรงงานผลิตน้ำแข็งของ

เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งในโรงงานน้ำแข็ง ต้องผ่านมาตรฐานของน้ำที่ทางกระทรวงสาธารณสุขได้ประกาศไว้ ในส่วนนี้จึงจะกล่าวถึงมาตรฐานของน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งของในโรงงานเพื่อนำมาบริโภค จากข้อมูลของกองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข โดยน้ำที่มีคุณภาพที่ดีจะมีอิทธิพลต่อความขุ่นของน้ำแข็งของที่ผลิต

คุณภาพน้ำ หมายถึง สภาวะของน้ำที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปนตามความเหมาะสมของน้ำเพื่อใช้ในกิจกรรมของมนุษย์ กล่าวอีกนัยหนึ่ง หมายถึง คุณภาพน้ำนั้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของมนุษย์ที่จะใช้เฉพาะกิจ หรือเฉพาะกรณีไป เช่น คุณภาพน้ำเพื่อใช้ดื่มย่อมต้องมีคุณภาพสูงหรือดีที่สุด ส่วนคุณภาพน้ำเพื่อการเกษตรกรรมย่อมมีคุณภาพต่ำกว่า ซึ่งคุณภาพของแหล่งน้ำธรรมชาติโดยทั่วไปจะเปลี่ยนแปลงไปมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่างๆ ที่เจือปนอยู่ในน้ำ และสภาพแวดล้อมในแต่ละท้องถิ่นที่แตกต่างกัน เช่น สภาพภูมิประเทศ ลักษณะทางธรณีวิทยา การใช้ที่ดิน ตลอดจนการทำกิจกรรมต่างๆ ของสิ่งมีชีวิตที่เกี่ยวข้องกับน้ำ เป็นต้น

น้ำเป็นสิ่งที่จำเป็นและสำคัญในการดำรงชีวิต ความต้องการน้ำของมนุษย์ ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะการใช้น้ำเพื่อบริโภคจะต้องเป็นน้ำที่มีคุณภาพดีที่สุด กรมอนามัยได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภค เพื่อให้ประชาชนมีน้ำสะอาดที่ปราศจากพิษภัยไว้บริโภค โดยกำหนดคุณภาพของน้ำที่สามารถนำมาบริโภคได้ จะต้องผ่านการปรับปรุงให้มีคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี และแบคทีเรีย จึงกำหนดให้น้ำดื่มมีคุณภาพไม่ต่ำกว่าเกณฑ์คุณภาพน้ำประปา กรมอนามัย ปี พ.ศ. 2543

### คุณภาพน้ำทางกายภาพ

คุณภาพน้ำทางกายภาพ คือ ลักษณะของน้ำที่สามารถรับรู้ได้ด้วยประสาทสัมผัส เช่น รส กลิ่น สี และความขุ่นที่เกิดจากสารแขวนลอย รวมทั้งเกลือแร่ต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ ได้แก่

- สี สีของน้ำเกิดจากสารที่ละลายในน้ำตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์ หรือโลหะหนักบางชนิด น้ำที่มีปริมาณเหล็กสูงจะเป็นสีเหลืองอ่อน บางครั้งสารอินทรีย์ในวัตถุที่เกิดจากการสลายตัวของพืชทำให้น้ำมีสีน้ำตาลปนแดง สีของน้ำส่งผลให้เกิดความน่ารังเกียจต่อผู้บริโภค ซึ่งไม่สามารถบอกผลกระทบต่อสุขภาพได้โดยตรง แต่อาจบอกประเภทของสิ่งเจือปนในน้ำได้ จึงกำหนดค่าของสีไม่เกิน 15 หน่วยแพลตตินัมโคบอล

- ความขุ่น(turbidity) เกิดจากสารแขวนลอย หรือ สารที่ไม่ละลายน้ำขนาดเล็กแขวนลอยในน้ำ ซึ่งไม่มีผลต่อสุขภาพอนามัยมากนักแต่ทำให้น้ำไม่ชวนดื่มเป็นที่น่ารังเกียจ ส่วนผลกระทบโดยตรงของสารแขวนลอยจะทำให้เครื่องกรองอุดตันและชำรุดเร็ว อีกทั้งยังส่งผลต่อระบบการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน เนื่องจากสารแขวนลอยจะห่อหุ้มจุลินทรีย์ไว้ ทำให้คลอรีนไม่สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ จึงต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีความขุ่นต่ำ จึงกำหนดค่าความขุ่นของน้ำเป็น 10 เอ็นทียู

- รส เกิดจากสารละลายในน้ำ เช่น ถ้ามีด่างละลายอยู่สูง หรือมีความกระด้างมากจะทำให้มีรสฝืด ถ้ามีเกลือคลอไรด์จะทำให้มีรสกร่อยหรือเค็ม

- กลิ่น เกิดได้หลายสาเหตุ เช่น กลิ่นอับ อาจเกิดจากสารอินทรีย์ในน้ำ เช่น ไบโอดีเน่าเปื่อย กลิ่นคาว อาจเกิดจากเหล็กออกไซด์ในน้ำ และกลิ่นเน่าเหม็น มักเกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายของแบคทีเรีย เช่น แก๊สไข่เน่า กลิ่นของน้ำทำให้น้ำไม่น่าดื่ม

### คุณภาพของน้ำทางเคมี

เป็นลักษณะที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ซึ่งเกิดจากสารละลายที่เจือปนในน้ำ ต้องทำการตรวจสอบทางห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ เช่น สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ได้แก่ ความกระด้าง เหล็ก ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม สารหนู ปรีท ฟลูออไรด์ คลอไรด์ ซัลเฟต และฟอสเฟต รายละเอียดดังนี้

- ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เกิดจากสารที่แตกตัวให้อนุโมลกรด-ด่าง มีค่าตั้งแต่ 0-14 ค่าต่ำกว่า 7 หมายถึง น้ำมีความเป็นกรดสูง ถ้าค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าน้ำเป็นกลาง แต่ถ้าสูงกว่า 7 แสดงว่าเป็นด่าง ภาวะความเป็นกรดด่างส่งผลต่อคุณภาพของน้ำ การเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต และคุณสมบัติการกัดกร่อนของน้ำ จึงกำหนดความเป็นกรดด่างต้องอยู่ในช่วง 6.5-8.5

- ความกระด้าง เกิดจากเกลือแคลเซียมและแมกนีเซียมที่ละลายอยู่ในน้ำ ความกระด้างแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ความกระด้างชั่วคราว เกิดจากเกลือไบคาร์บอเนตของธาตุแคลเซียม แก่ไขได้ด้วยการต้ม และความกระด้างถาวร เกิดจากเกลือคลอไรด์ซัลเฟตของแคลเซียมและแมกนีเซียม ไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยความร้อน

ความกระด้างไม่ส่งผลต่อสุขภาพอนามัยมากนัก แต่มีผลกระทบกับการซักล้าง และทำให้เกิดตะกรันในหม้อต้มน้ำ อีกทั้งทำให้น้ำมีรสฝืด จึงกำหนดค่าความกระด้างต้องไม่เกิน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ปริมาณสารละลายทั้งหมดที่เหลือจากการระเหย สารละลายทั้งหมดที่อยู่ในน้ำ ได้แก่ พวกสารอินทรีย์ และ สารอนินทรีย์ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม ฯลฯ ในรูปของสารประกอบไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต คลอไรด์ และซัลเฟต จึงกำหนดให้ปริมาณสารละลายต้องไม่เกิน 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

- เหล็ก เกิดจากสารประกอบของเหล็กในดิน สามารถละลายน้ำได้ดีในที่มีออกซิเจนและเมื่อถูกกับอากาศจะตกตะกอนเป็นสีน้ำตาลแดง มีกลิ่นเฉพาะตัว และมีรสที่ไม่พึงประสงค์ ทำให้เป็นที่น่ารังเกียจของผู้บริโภค กำจัดได้ด้วยการกรองหรือตกตะกอน ซึ่งต้องอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี กำหนดต้องไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

- แมงกานีส เกิดจากสารประกอบแมงกานีส เมื่อถูกกับอากาศจะตกตะกอนเป็นสีดำมีผลต่อสุขภาพ ถึงแม้จะไม่มีอาการเฉียบพลัน แต่พิษจะสะสมเรื้อรัง ซึ่งมีผลต่อสุขภาพด้านร่างกายและจิตใจ ทำให้มีอาการของโรคจิตและสายตาสีม เม็ดเลือดขาวถูกทำลาย กำหนดให้ค่าแมงกานีสต้องไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ทองแดง และ สังกะสี ไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกาย มีประโยชน์ในทางโภชนาการ หากได้รับในปริมาณที่เหมาะสมแต่อาจทำให้น้ำมีรสไม่ชวนดื่ม จึงกำหนดปริมาณไว้ไม่เกิน 1.0 และ 3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

- ซัลเฟต เกิดจากเกลือแร่ในธรรมชาติ ทำให้เกิดน้ำกระด้างถาวรเป็นตะกอนในหม้อต้ม อนุภูมนี้โดยลำพังไม่มีผลต่อสุขภาพอนามัย แต่หากมีธาตุแมกนีเซียมสูงด้วยจะทำให้เกิดผลคล้ายระบาย โดยทั่วไปซัลเฟตมีผลทำให้เกิดรสได้น้อยกว่าคลอไรด์ จึงกำหนดปริมาณไว้ไม่เกิน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ตะกั่ว เป็นสารพิษที่เกิดโทษต่อร่างกายอย่างร้ายแรงเมื่อเข้าสู่ร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทารก เด็ก และ หญิงมีครรภ์จะไวต่อสารนี้มาก ความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับปริมาณที่สะสมอยู่ในร่างกาย จึงกำหนดให้ระดับตะกั่วมีได้ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร

- โครเมียม เป็นสารพิษที่เกิดโทษต่อร่างกาย ทำให้อ่อนเพลีย ปวดตามข้อ และยังเป็นสารก่อมะเร็งด้วย ถ้าร่างกายได้รับเกินขนาดจะทำให้เกิดพิษเฉียบพลัน โดยจะมีอาการเวียนศีรษะ กระจายน้ำอย่างรุนแรง อาเจียน หมดสติ และเสียชีวิต กำหนดค่าโครเมียมไว้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

- แคดเมียม เป็นสารพิษที่มีความเป็นพิษสูง แม้ได้รับเข้าสู่ร่างกายเพียงเล็กน้อยมีผลต่อระบบไต ความดันโลหิตสูง เส้นเลือดฝอยแข็งตัว หัวใจวาย แผลเรื้อรังในปอด ถุงลมโป่งพอง และมีผลต่อกระดูก ทำให้กระดูกเปราะแตก และมีรูปร่างผิดปกติ จึงกำหนดค่าแคดเมียมไว้ไม่เกิน 0.003 มิลลิกรัมต่อลิตร

- สารหนู ก่อให้เกิดพิษต่อการทำงานของระบบต่างๆ ในร่างกาย ในลักษณะเฉียบพลัน และเรื้อรัง โดยมีผลต่อผิวหนัง ระบบประสาท ระบบหายใจ และระบบสืบพันธุ์ จึงกำหนดค่าสารหนูในน้ำบริโภคต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

- พรอท เป็นสารพิษที่มีความเป็นพิษสูง มีผลต่ออาการทางระบบประสาท จึงกำหนดให้มีพรอทอยู่ในน้ำไม่เกิน 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร

- คลอไรด์ เกิดจากคลอไรด์ในธรรมชาติ ขณะเดียวกันคลอไรด์มาจากสิ่งขับถ่ายของมนุษย์ และน้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือน ทำให้น้ำมีรสกร่อย ไม่มีผลต่อสุขภาพมากนัก แต่ทำให้น้ำไม่ชวนดื่ม จึงกำหนดต้องไม่เกิน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ไนเตรท เกิดจากการสลายตัวของไนโตรเจน เช่น ในปุ๋ย หากมีอยู่ในน้ำปริมาณสูงจะมีพิษต่อร่างกาย โดยเฉพาะทารกในครรภ์และเด็กซึ่งอาจทำให้เกิดการขาดออกซิเจน มีอาการตัวเขียว และทำให้ถึงแก่ชีวิตได้ จึงกำหนดให้มีค่าต้องไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ฟลูออไรด์ เกิดจากแร่ฟลูออไรด์ จะมีอยู่ในน้ำธรรมชาติ หากมีอยู่ในน้ำบริโภคในระดับที่สูง อาจทำให้ฟันผุผิดปกติ และในระดับ 3.0-8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้เกิดกระดูกผิดปกติ ดังนั้นจึงกำหนดค่าฟลูออไรด์ไม่เกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

- คลอรีนอิสระคงเหลือ สำหรับน้ำบริโภคที่มีการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค ควรให้มีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลืออยู่เพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำต่อไประหว่าง 0.2-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือตามที่หน่วยงานที่รับผิดชอบกำหนดไว้เป็นอย่างอื่น เช่น น้ำประปาที่มีท่อส่งยาว อาจต้องเติมคลอรีนให้มีคลอรีนเหลืออยู่ในท่อต้นทางประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้ปลายท่อคลอรีนไม่น้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือในกรณีที่เกิดโรคระบาด อาจเติมคลอรีนเป็น 2 เท่า ของปกติก็ได้



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัชชัย ลิ้มมณฑล เกิดเมื่อวันที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2525 ที่ จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเทพศิรินทร์ เมื่อปีการศึกษา 2542 ได้เข้าศึกษาต่อและได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตจาก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี การศึกษา 2546 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่ ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2546

