



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งแบบสามมิติโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

3D-Simulation of ice forming by Computational Fluid Dynamics Method

نامผู้วิจัย นายภาณุวัฒน์ เน้อยทอง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกรียงไกร อัสวมาศบันลือ, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐ วรยศ, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒน์ ภูมิปัญญาคุณ, วศ.ม.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งแบบสามมิติโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

3D-Simulation of ice forming by Computational Fluid Dynamics Method

โดย

นายภาณุวัฒน์ เน้อยทอง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2552

ภาณุวัฒน์ เนือยทอง 2552: การจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งแบบสามมิติโดยวิธีพลศาสตร์
ของไหลเชิงคำนวณ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขา
วิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ปรธานกรรมการที่ปรึกษา:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกรียงไกร อัสวมาศบันลือ, Ph.D. 136 หน้า

อุตสาหกรรมน้ำแข็งซองเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้พลังงานสูง การลดเวลาใน
กระบวนการผลิตสามารถลดปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตได้ งานวิจัยนี้เสนอการ
จำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งซองแบบสามมิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป fluent โดยในงานวิจัยทำการเก็บ
ข้อมูลทางกายภาพมาสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด แล้วนำมาวิเคราะห์ปัจจัยที่เกิดจากการ
เปลี่ยนสถานะขอบเขต, การเปลี่ยนรูปทรงภาชนะบรรจุ และการลดปริมาตรลงครึ่งหนึ่งเพื่อเป็น
แนวทางในการลดพลังงานในกระบวนการผลิต รูปแบบของปัญหาถูกพิจารณาเป็นแบบ 3 มิติ ที่
มีการประมาณตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยวิธี implicit โดยรูปแบบของการเปลี่ยนสถานะ
ถูกกำหนดเป็น solidification problem ที่มีความละเอียดของขนาดกริด 0.5 เซนติเมตรและ
ช่วงเวลาคำนวณ 1 วินาที

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยน้อย
กว่า 1 % กรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ พบว่า รูปทรงที่ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ รูปทรงปริซึมฐาน
สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาวประสิทธิผล 16.153 m ซึ่งใช้เวลาประมาณ 31 hr กรณีลดปริมาตรลง
ครึ่งหนึ่งพบว่าเวลาที่ใช้ลดลงมากกว่าครึ่งหนึ่ง โดยรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมใช้เวลาน้อยที่สุด
คือ 16 hr โดยมีความยาวประสิทธิผล 14.748 m จากการวิเคราะห์พบว่าความยาวประสิทธิผล
แปรผกผันกับเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งซอง โดยรูปทรงภาชนะที่ใช้เวลาในการแข็งตัวของ
น้ำแข็งน้อยจะมีความยาวประสิทธิผลมาก ซึ่งความยาวประสิทธิผลที่เหมาะสมมีค่า 14 ถึง 17 m
จากงานวิจัยพบว่า ปริซึมฐานสามเหลี่ยมและปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นรูปทรงที่เหมาะสม
ที่สุดในการขึ้นรูปน้ำแข็งซอง

Panuwat Nuaythong 2009: 3D-Simulation of ice forming by Computational Fluid Dynamics Method. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Kriengkrai Assawamartbunlue, Ph.D. 136 pages.

Ice Block Industry is the one of high energy industry. The reduction time is one factor which can be save the process energy also. This study presents the imitation of 3d simulation of ice forming by fluent package program. The physical data were collected for the most suitable simulation. Then, experiment the change of boundary condition factor, the change of packaging model and reduced the volume to $\frac{1}{2}$ for save the energy process. The factors were considered by 3d simulation which estimated the time change variable by implicit method. The phase change was defined to solidification problem which the accuracy of grid size is 0.5 cm and time step size is 1 sec.

The comparison of the imitation and the experiment found that an average of value was less than 1%. In case study of the packaging model found that the rectangular prism spent the least time about 31 hours which the effective length is 16.15 m. In case study of volume reduction which spent time less than half, found that the trigonal prism spent the least time about 16 hours which the effective length is 14.74 m. According to the analyze of the results found that the effective length investigates the time making an ice block. The packaging model which spends the least time to forming is the effective length about 14-17 m. From this study found that the trigonal prism and rectangular prism are the most appropriate model to from an ice block.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงไกร อัสวมาศบันลือ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐ วรยศ กรรมการวิชาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิพัฒน์ ฐริปัญญาคูณ กรรมการวิชาการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานติส สุธาสกร ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณห้องเย็นอมรรัตน์ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อในการเก็บข้อมูลและที่พักอาศัยตลอดหนึ่งเดือนเต็ม ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ Computational Mechanics Laboratory ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาสำหรับโปรแกรมสำหรับงานวิจัย

ถ้าหากกล่าวได้ว่าชีวิตคือการเดินทาง ข้าพเจ้าก็คงเหมือนเรือน้อยลำหนึ่งที่ต้องลอยในทะเลใหญ่ โดยมีฝั่งเป็นจุดหมาย ข้าพเจ้าจะไม่สามารถเดินทางอย่างปลอดภัยได้เลย ถ้าปราศจากน้ำทะเลที่คอยพยุงตัวและมีแสงแดดที่คอยให้ความอบอุ่น เปรียบได้กับ ความรัก ความหวังใยและกำลังใจ จากทุกๆคนที่มีให้ข้าพเจ้า ขอขอบคุณทุกคนด้วยใจจริง เหนืออื่นใด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุกด้านและสำคัญที่สุดคือกำลังใจที่มีให้ตลอดเวลา จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงลงไปได้

ภาณุวัฒน์ เนือยทอง

มีนาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	24
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	105
สรุป	105
ข้อเสนอแนะ	106
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	107
ภาคผนวก	110
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของน้ำในสถานะของแข็งและของเหลว	111
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ	116
ภาคผนวก ค ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงาน	120
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	136

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สภาวะที่ใช้ในการจำลองการทดลองที่ 6 ในการพิจารณาขนาดกริด	31
2	สภาวะที่ใช้ในการจำลองการทดลองที่ 6 ในการพิจารณาขนาดช่วงเวลาคำนวณ	34
3	สภาวะขอบเขตที่ทำการศึกษาปัจจัยจากอุณหภูมิขอบเขตของปัญหาการขึ้นรูปน้ำแข็งซอง	36
4	รายละเอียดรูปทรงที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent กรณีศึกษาผลจากภาชนะบรรจุปริมาตร 0.183 m^3	37
5	รายละเอียดรูปทรงที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent กรณีศึกษาผลจากภาชนะบรรจุปริมาตร 0.0915 m^3	38
6	ความยาวประสิทธิภาพของรูปทรงปริมาตร 0.183 m^3	39
7	ความยาวประสิทธิภาพของรูปทรงปริมาตร 0.0915 m^3	40
8	สภาวะที่กำหนดใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent ของการทดลองที่ 1	45
9	ช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะของแข็งในช่องสัญญาณที่ 3 ในการทดลองทั้ง 6	60
10	คุณสมบัติที่ใช้ในการจำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือ	62
11	คุณสมบัติที่ใช้ในการจำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ	64
12	คุณสมบัติที่ใช้ในการจำลองสภาวะกรณีเปลี่ยนรูปทรงภาชนะบรรจุ	67

ตารางผนวกที่

ก1	ค่า Heat capacity ของน้ำ, น้ำแข็งและน้ำทะเล	112
ก2	ค่า Thermal conductivity ของน้ำ, น้ำแข็งและน้ำทะเล	113
ก3	ค่า Saturated vapor pressure ของน้ำ, น้ำแข็งและน้ำทะเล	114
ก4	ค่า Viscosity ของน้ำ, น้ำแข็งและน้ำทะเล	115
ก5	การแปลงหน่วยคุณสมบัติจากหน่วยอังกฤษ(United British) เป็นหน่วยเอสไอ(SI Unit)	115

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข1 รายละเอียดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ Comark รุ่น C8510 - 10 channels Printing Thermometer Type K or PST	117
ค1 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ในการทดลองที่ 1	121
ค2 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ในการทดลองที่ 2	124
ค3 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ในการทดลองที่ 3	127
ค4 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ในการทดลองที่ 4	129
ค5 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ในการทดลองที่ 5	131
ค6 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ในการทดลองที่ 6	133

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งซองในอุตสาหกรรมผลิตน้ำแข็งซอง	3
2	ชุดประกอบน้ำแข็งซองในอุตสาหกรรมก่อนกระบวนการผลิต	4
3	ชุดซองน้ำแข็งในระหว่างกระบวนการผลิตน้ำแข็งซอง	5
4	ลักษณะแบบจำลองการเปลี่ยนสถานะของสารPCM	18
5	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดจากจุดกึ่งกลางเทียบกับเวลา ที่อุณหภูมิขอบเขต -7.5°C และ -13°C	21
6	กราฟแสดงอัตราส่วนของเหลวของภาชนะลูกบาศก์จากสภาวะขอบเขตการถ่ายความร้อนแบบนำความร้อนบริเวณผิวขอบด้านข้างและการพาความร้อนบริเวณผิวขอบเขตด้านบน	22
7	การเปรียบเทียบความหนาของชั้นหลอมเหลวกับเวลาที่ขนาดกริดที่แตกต่างกัน	23
8	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิและความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง	23
9	ขนาดรูปทรงของน้ำแข็งซองก่อนการบรรจุน้ำเปล่าและหลังการบรรจุน้ำเปล่าที่ใช้ในงานวิจัย	25
10	ตำแหน่งจุดวัดสัญญาณทั้ง 10 จุดที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ	26
11	เครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบ 10 ช่องสัญญาณ Comark รุ่น C 8510 ที่ใช้ในการทดลอง	26
12	ชุดหัวต่อกับสายเทอร์โมคอปเปิลชนิด K ที่ใช้ในการทดลอง	27
13	ชุดวัดสัญญาณอุณหภูมิที่ประกอบหัวต่อกับเครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	27
14	ลักษณะน้ำแข็งซองหลังการผลิตที่ประกอบกับชุดวัดอุณหภูมิก่อนการเก็บชุดอุปกรณ์วัดสัญญาณ	28
15	รูปทรงของปัญหาถูกกำหนดโดยโปรแกรม Gambit เพื่อใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	รูปแบบปัญหาในการทดลองที่ 6 ในการกำหนดขนาดกริดที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent	30
17	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการพิจารณาขนาดกริดของแบบจำลองที่ 6 จุดวัดที่ 9	32
18	ค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลาในการพิจารณาขนาดกริดของแบบจำลองที่ 6 จุดวัดที่ 9	32
19	ค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลาในการกำหนดขนาดช่วงเวลาคำนวณที่จุดวัดที่ 9 การทดลองที่ 6	35
20	วงกลมทดสอบภายในพื้นที่หน้าตัดสามเหลี่ยมในรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม	39
21	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่จุดวัดที่ 1 และ 2 ในการทดลองที่ 1	41
22	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขอบเขตกับเวลาของจุดวัดที่ 1 และ 2 ทั้ง 6 การทดลอง	42
23	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของจุดวัดภายในช่องน้ำแข็ง ในการทดลองที่ 1	43
24	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาจากการเก็บข้อมูลจากโรงงานที่ตำแหน่งช่องสัญญาณภายในช่องน้ำแข็ง	44
25	ระนาบ xy ที่ใช้ในการพิจารณาในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent	46
26	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลา ของระนาบ xy จากการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม fluent	47
27	กราฟแสดงอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลา ของระนาบ xy จากการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม fluent	48
28	ระนาบ xy ที่ใช้ในการพิจารณาในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
29	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลา ในระนาบ xz ของการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent	50
30	กราฟแสดงอัตราส่วนของเหลวของระนาบ xz เทียบกับเวลาในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent	51
31	เส้นบอกระยะทางในแนวแกน x, y, z ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent	52
32	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน x ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent	52
33	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน z ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent	53
34	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent	54
35	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับระยะทางในแนวแกน x ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent	55
36	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับระยะทางในแนวแกน y ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent	55
37	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับระยะทางในแนวแกน z ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent	56
38	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการทดลองที่ 1 เทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent	57
39	ค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลาของการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม fluent เทียบกับผลการทดลองทั้ง 6 การทดลอง	58
40	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของช่องสัญญาณที่ 3 แยกตามการทดลองทั้ง 6	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาแยกตามจุดวัดในการทดลองทั้ง 6	61
42	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับเวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้ำเกลือ ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวน้ำด้านบน 15 cm ในกรณีศึกษาสภาวะขอบเขต	63
43	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับเวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้ำเกลือ ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวน้ำด้านบน 10 cm ในกรณีศึกษาสภาวะขอบเขต	63
44	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับเวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อากาศที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวน้ำด้านบน 15 cm ในกรณีศึกษาสภาวะขอบเขต	65
45	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับเวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อากาศที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวน้ำด้านบน 10 cm ในกรณีศึกษาสภาวะขอบเขต	65
46	รูปทรงภาชนะบรรจุทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.44 m ความสูง 1.21 m ใน กรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	68
47	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของ ทรงกระบอก ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	69
48	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียบกับระยะทางในแกน y ในการจำลองการขึ้น รูปน้ำแข็งของทรงกระบอก ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	70
49	ภาชนะบรรจุรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม ความยาวด้าน 0.5495 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	70
50	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึม ฐานสามเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	71
51	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแกน y ในการจำลองการขึ้นรูป น้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	72
52	รูปทรงภาชนะบรรจุปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความยาวด้าน 0.3885 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
53	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	73
54	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแกน y ในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	74
55	รูปทรงภาชนะบรรจุปริซึมฐานห้าเหลี่ยม ความยาวด้าน 0.296 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	74
56	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	75
57	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแกน y ในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	76
58	รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม ความยาวด้าน 0.241 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	76
59	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	77
60	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	78
61	รูปทรงภาชนะบรรจุปริซึมฐานแปดเหลี่ยม ความยาวด้าน 0.176 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	78
62	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานแปดเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	79
63	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานแปดเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	80
64	รูปทรงภาชนะบรรจุครึ่งทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.884 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
65	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของเครื่องทรงกลม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	81
66	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของเครื่องทรงกลม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	82
67	การเปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวกับเวลาในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวขอบเขตบน 15 cm ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ	82
68	การเปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวกับความยาวประสิทธิผล ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ ปริมาตร 0.183 m^3	83
69	รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.2 m x 0.78 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	84
70	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	85
71	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	86
72	รูปทรงภาชนะบรรจุทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2102 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	86
73	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงกระบอก ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	87
74	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงกระบอก ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	88
75	รูปทรงภาชนะบรรจุทรงเครื่องทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.404 m ความสูง 0.3521 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	89
76	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของเครื่องทรงกลม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
77	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของ เครื่องทรงกลม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	90
78	รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมความยาวด้าน 0.3887 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	91
79	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึม ฐานสามเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	92
80	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรง ปริซึมฐานสามเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	93
81	รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสความยาวด้าน 0.2749 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	93
82	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึม ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	94
83	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรง ปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	95
84	รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยมความยาวด้าน 0.2096 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	96
85	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึม ฐานห้าเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	97
86	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรง ปริซึมฐานห้าเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	98
87	รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยมความยาวด้าน 0.1706 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	98
88	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึม ฐานหกเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	99

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
89	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	100
90	รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานแปดเหลี่ยมความยาวด้าน 0.1251 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการปริมาตร	101
91	กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานแปดเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	102
92	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานแปดเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	103
93	การเปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวกับเวลา ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวขอบเขตบน 15 cm ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร	103
94	การเปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวกับความยาวประสิทธิผล ในรูปทรงปริมาตร 0.0915 m^3	104

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

c_s	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสสารในสถานะของแข็ง (J/kg-k)
c_l	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสสารในสถานะของแข็ง (J/kg-k)
c_v	=	ความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ (J/kg-k)
c_p	=	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (J/kg-k)
e	=	พลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวล (J/m)
$f(x)$	=	ฟังก์ชันของตัวแปร x
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (m/s^2)
h_{ref}	=	เอนทาลปีอ้างอิง (J/kg-k)
H	=	ความร้อนแฝงการเปลี่ยนสถานะของแข็งเป็นของเหลว (J/kg-k)
L	=	ค่าความร้อนแฝงจำเพาะ (J/kg-k)
L	=	ความยาว (m)
L_{eff}	=	ความยาวประสิทธิผล (m)
P	=	ความดัน (pascal)
Q	=	ความร้อน (w/m^2)
$\dot{Q}$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน
S_h	=	พจน์เพิ่มเติม (Source term)
Ste	=	ค่าคงที่ของสเตฟาน
S	=	ความหนาของชั้นหลอมนเหลว (m)
t	=	เวลา (S)
T	=	อุณหภูมิ (k)
T_F	=	อุณหภูมิเยือกแข็ง (k)
T_C	=	อุณหภูมิขอบเขตของปัญหา (k)
T_s	=	อุณหภูมิของแข็ง (k)
T_l	=	อุณหภูมิของเหลว (k)
T	=	อุณหภูมิในขณะทีพิจารณา (k)
T_{ref}	=	อุณหภูมิอ้างอิง (k)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์

v_x	=	ความเร็วในแกน x (m/s)
v_y	=	ความเร็วในแกน y (m/s)
v_z	=	ความเร็วในแกน z (m/s)
V	=	ปริมาตร (m^3)
x	=	ระยะทางในแนวแกน x (m)
y	=	ระยะทางในแนวแกน y (m)
z	=	ระยะทางในแนวแกน z (m)
ρ	=	Rho, ความหนาแน่น (Kg/m^3)
ρ_s	=	ความหนาแน่นของแข็ง (Kg/m^3)
ρ_l	=	ความหนาแน่นของเหลว (Kg/m^3)
μ	=	ความหนืด (Kg/m^3)
ΔH	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนแฝง (J/kg)
Δ	=	อัตราการเปลี่ยนแปลง
β	=	Beta, อัตราส่วนของเหลว (Liquid fraction)
∇	=	Del operator, $= i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$
κ	=	Kappa, สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (w/mk)
σ	=	Sigma, ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann

ดรรชนีล่าง

0, 1, 2, ..., 9	=	จุดวัดทั้ง 10 จุดที่ใช้ในการทดลอง
S	=	ของแข็ง
l	=	ของเหลว
x	=	ทิศทางในแนวแกน x
y	=	ทิศทางในแนวแกน y

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ดรรชนีล่าง

z	=	ทิศทางในแนวแกน z
ref	=	ตำแหน่งที่ใช้อ้างอิง
F	=	สถานะเยือกแข็ง
C	=	ขอบเขตของปัญหา
v	=	ปริมาตรจำเพาะ
P	=	ความดัน

การจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งแบบสามมิติโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

3D-Simulation of ice forming by Computational Fluid Dynamics Method

คำนำ

ประเทศไทยมีโรงงานผลิตน้ำแข็งเชิงพาณิชย์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและการประมงเป็นจำนวนมากและในกระบวนการผลิตจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงมากเนื่องจากการผลิตน้ำแข็งแต่ละครั้งต้องใช้เวลาอันยาวนาน ดังนั้นการประหยัดพลังงานจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการลดค่าใช้จ่ายในการผลิต การศึกษาลักษณะการขึ้นรูปน้ำแข็งจึงจำเป็นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการผลิต การศึกษาปัญหาการผลิตน้ำแข็งเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนสถานะของสารแต่เนื่องจากลักษณะหรือรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนในการเปลี่ยนสถานะ มีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งยังมีข้อจำกัดในหลายด้าน จึงทำให้ขาดการศึกษาอย่างจริงจัง

โปรแกรม Fluent เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เพื่อใช้ในการคำนวณปัญหาด้านวิศวกรรมศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการใช้วิธีทำการทดลองทางกายภาพ คือ สามารถศึกษาปัญหาที่ซับซ้อนได้ดี โดยใช้ค่าใช้จ่ายถูกกว่าและไม่มีความเสี่ยงต่ออันตราย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการขึ้นรูปน้ำแข็งของแบบสามมิติด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยความถูกต้องจากแบบจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิจากโรงงานผลิตน้ำแข็งของ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองที่ใกล้เคียงที่สุด และแบบจำลองจะถูกนำมาใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ใช้ในการผลิต และทำการศึกษากรณีเปลี่ยนสภาวะขอบเขตที่ใช้ในการจำลอง , เปลี่ยนรูปทรงของภาชนะบรรจุและการลดปริมาตรลงครึ่งหนึ่ง ผลที่ได้จะถูกใช้เป็นแนวทางในการประหยัดพลังงานต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของแบบสามมิติด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาภายในน้ำแข็งของ
3. เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับเวลาภายในน้ำแข็งของ
4. เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปทรงและปริมาตรของน้ำแข็งของต่อระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัว

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาปัญหาการขึ้นรูปน้ำแข็งของแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วย
2. พิจารณาการเกิดการแข็งตัวของน้ำแข็งเพียง 1 ก้อน โดยไม่คิดผลกระทบที่เกิดจากน้ำแข็งก้อนข้างเคียง
3. พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่เกิดจากอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิต่อน้ำเกลือเท่านั้น

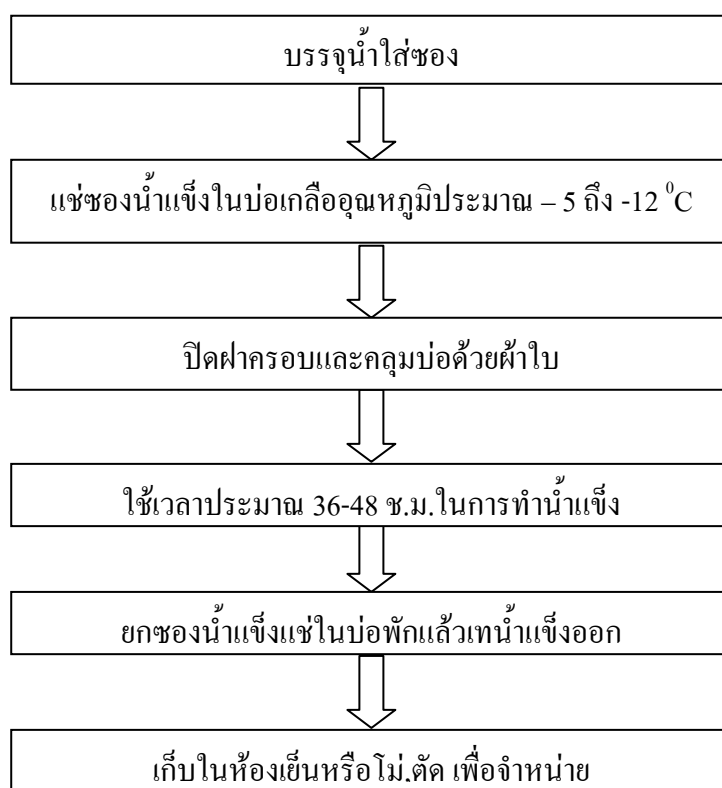
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ fluent ในการจำลองสภาวะการขึ้นรูปน้ำแข็งของได้ถูกต้อง
2. เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงได้
3. เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงได้
4. เข้าใจถึงผลที่เกิดจากการเปลี่ยนสภาวะขอบเขต, รูปทรงภาชนะบรรจุและปริมาตรที่ใช้ในการผลิตได้
5. ข้อมูลจากการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำแข็งของและกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะสารให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด

การตรวจเอกสาร

การผลิตน้ำแข็งซอง

อเนก (2535) กล่าวว่า การผลิตน้ำแข็งซอง มี 3 ประเภทด้วยกันคือ ผลิตเพื่อใช้ในการประมง, การบริโภคแบบก้อนและการบริโภคแบบเกล็ด โดยลักษณะทางกายภาพของน้ำแข็งซองเป็นก้อนสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ โดยมีน้ำหนักประมาณ 150 กิโลกรัมต่อก้อน ใช้เวลาในการผลิตน้ำแข็งซองประมาณ 36-48 ชั่วโมงต่อหนึ่งชุดการผลิต

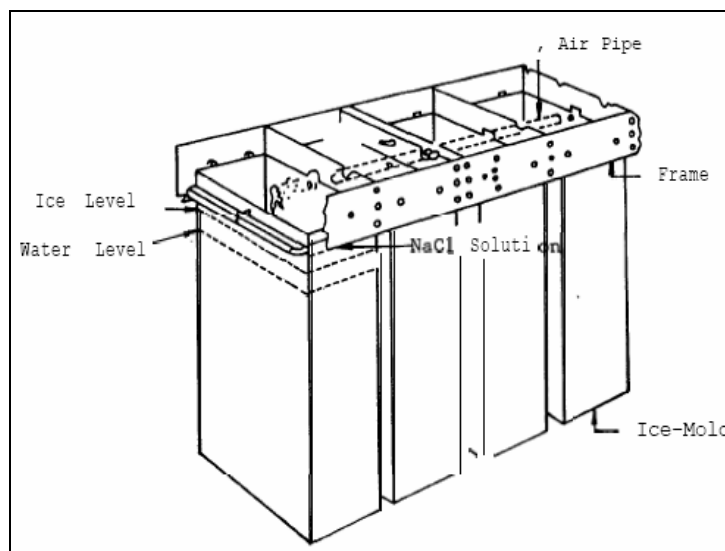


ภาพที่ 1 ขั้นตอนการผลิตน้ำแข็งซองในอุตสาหกรรมผลิตน้ำแข็งซอง

ที่มา: อเนก (2535)

จากภาพที่ 1 การผลิตน้ำแข็งซองเริ่มต้นจากการเทน้ำแข็งเดิมที่มีอยู่ในซองออก แล้วนำซองน้ำแข็งเปล่ามาบรรจุน้ำตามระดับที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 2 จากนั้นนำซองน้ำแข็งที่มีน้ำบรรจุไว้แล้วใส่ลงไปในบ่อน้ำเกลือขนาดใหญ่ที่มีอุณหภูมิระหว่าง -5 ถึง -12 °C ความร้อนจากน้ำจะถ่ายเทให้กับน้ำเกลือซึ่งจะถูกนำออกไปทิ้งสู่อากาศภายนอกผ่านทางสารทำความเย็นที่ไหลเวียน

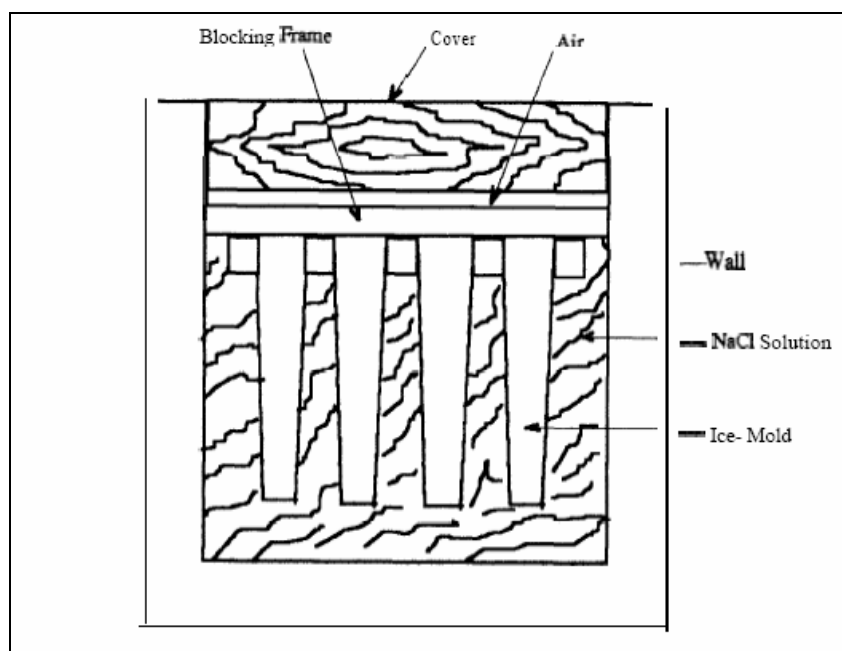
อยู่ภายในท่อที่เชื่อมในบ่อน้ำเกลือ ทำให้น้ำเกลือในบ่ออยู่ในสถานะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ช่วงทำความเย็นจะรักษาอุณหภูมิโดยปิดฝาไม้ครอบของน้ำแข็ง และปิดอีกชั้นด้วยผ้าใบครอบบ่อน้ำเกลือ น้ำที่อยู่ภายในช่องจะกลายเป็นน้ำแข็งภายในระยะเวลาประมาณ 36-48 ชั่วโมง



ภาพที่ 2 ชุดประกอบน้ำแข็งของในอุตสาหกรรมก่อนกระบวนการผลิต

ที่มา: อเนก (2535)

เมื่อพิจารณาระบบที่เป็นน้ำแข็งของ ดังแสดงในภาพที่ 3 จะเห็นว่าผนังขอบเขตที่สัมผัสกับช่องน้ำแข็งจะมี 2 ส่วนคือ ผนังขอบเขตที่เป็นอากาศบริเวณผิวด้านบน และผนังขอบเขตที่เป็นน้ำเกลือบริเวณผนังด้านข้างและด้านล่าง ดังนั้นเมื่อพิจารณาระบบที่เป็นช่องน้ำแข็งเพียงหนึ่งก้อน จะมีสภาวะขอบเขต 2 ส่วนคือ อุณหภูมิอากาศบริเวณระนาบแนวนอนด้านบนของน้ำแข็งและอุณหภูมิน้ำเกลือบริเวณผนังด้านล่างและด้านข้างทั้งหมด



ภาพที่ 3 ชุดของน้ำแข็งในระหว่างกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ

ที่มา: อเนก (2535)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ก้อง (2545) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) เป็นศาสตร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์การไหล การถ่ายเทความร้อน และปรากฏการณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการไหลโดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เช่น การออกแบบระบบปรับอากาศและการระบายอากาศภายในอาคาร, การปรับปรุงลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของเครื่องบินหรือยานพาหนะ, การออกแบบโรงจักรต้นกำลังให้มีประสิทธิภาพสูงสุด, การจำลองการระบายอากาศและการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์, อุตสาหกรรมเคมี, ใช้ในทางการแพทย์เพื่อศึกษาการไหลเวียนของเลือด

ศาสตร์แขนงนี้เริ่มใช้ในงานอย่างจริงจังในปี 1960 ในอุตสาหกรรมการบิน โดยใช้ CFD สำหรับออกแบบรูปทรงและจำลองการไหลในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ, เครื่องยนต์สันดาปภายในและเตาเผา นอกจากนั้นในอุตสาหกรรมการบิน CFD ถูกใช้ในการทำนายแรงกระตุ้นที่เกิดขึ้นขณะที่รถวิ่งด้วยการพัฒนาที่ต่อเนื่องทำให้ CFD เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ทางอากาศยาน แต่เนื่องจากเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์ในยุคนั้นยังไม่มีประสิทธิภาพมากนัก

อีกทั้งอุปกรณ์คอมพิวเตอร์มีราคาสูงและยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ทำให้ CFD ถูกใช้ในวงจำกัด ในปี 1990 เป็นยุคที่มีการพัฒนาคอมพิวเตอร์อย่างแพร่หลาย คอมพิวเตอร์มีความสามารถในการคำนวณสูงขึ้น และเร็วขึ้น ประกอบกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์มีราคาถูกลง ทำให้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการใช้งานมีความสะดวก และง่ายขึ้น จึงทำให้ CFD เริ่มเติบโตในวงการอุตสาหกรรม และถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน โดยการใช้ CFD ในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ในงานอุตสาหกรรมมีข้อดีกว่าการทำการทดลองจริง คือ ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่โดยสามารถเปลี่ยนแปลงรูปทรงต่างๆ ได้จากคอมพิวเตอร์โดยตรง ทั้งยังสามารถทำการจำลองการทดลองที่ไม่สามารถทำได้ในสภาวะจริง เช่น ในระบบที่ใหญ่, ซับซ้อนหรืออันตราย และข้อมูลที่ได้จากการคำนวณสามารถนำมาแสดงผลได้อย่างชัดเจนทำให้เห็นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของระบบต่างๆ ได้

ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปที่มีอยู่ในปัจจุบันจะมีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันในการกำหนดค่าตัวแปรที่จะใช้ในการคำนวณและวิธีการควบคุมการคำนวณจึงทำให้ดูเหมือนว่ามีรหัสโปรแกรมที่แตกต่างกันยากที่จะเข้าใจ แต่ในความเป็นจริงแล้วทุกซอฟต์แวร์จะมีส่วนประกอบของรหัสภายในแบ่งเป็นสามส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นขั้นตอนก่อนการคำนวณ ส่วนที่สองเป็นส่วนของการแก้ไขปัญหา ส่วนสุดท้ายเป็นขั้นตอนหลังการคำนวณ โดยในแต่ละส่วนก็จะมีรายละเอียดปลีกย่อยภายในที่แตกต่างกันออกไป

1. ขั้นตอนก่อนการคำนวณ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดปัญหาโดยในแต่ละซอฟต์แวร์จะมีการรับค่าต่างๆ ในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป โดยส่วนใหญ่จะออกแบบให้ง่ายต่อการใช้งาน เช่น มีหน้าต่างแสดงข้อมูลต่างๆ ที่ต้องการในการคำนวณและให้ทำการใส่ค่า โดยเมื่อทำการใส่ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ซอฟต์แวร์จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณแล้วซอฟต์แวร์จะนำข้อมูลมาทำการจัดรูปแบบให้เหมาะสม เพื่อใช้ในขั้นตอนการคำนวณ ในขั้นตอนก่อนการคำนวณมีสิ่งที่ผู้ใช้ซอฟต์แวร์จะต้องทำดังนี้คือ เริ่มจากระบุขอบเขตปัญหาที่สนใจเพื่อกำหนดขอบเขตที่ใช้งานในโปรแกรม แล้วจึงทำการสร้างกริดโดยการแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ โดยไม่ทับกันเพื่อพิจารณารูปร่างที่ศึกษาโดยการสร้างกริดที่ละเอียดจะช่วยพิจารณาปัญหาได้อย่างถูกต้องมากขึ้น แล้วเลือกคุณสมบัติทางกายภาพของสภาพแวดล้อมที่จะคำนวณซึ่งเป็นสภาวะขอบเขตที่พิจารณาซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหานั้นต่อมา กำหนดค่าคุณสมบัติต่างๆ ของของไหลที่จะคำนวณแล้วจึงกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเป็นลำดับสุดท้าย

สำหรับค่าความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นขึ้นอยู่กับเซลล์ในบริเวณที่สนใจ ดังนั้นถ้าใช้จำนวนเซลล์มากขึ้นก็จะได้ผลการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำขึ้น แต่การใช้จำนวนเซลล์ที่มาก จะต้องใช้เวลาและทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในการคำนวณที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องทำการแบ่งจำนวนเซลล์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยจะใช้กริดแบบไม่มีรูปลักษณะ (Non-uniform) เพื่อที่จะทำการแบ่งบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงๆ ให้มีความละเอียดมากๆ และในส่วนของบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยๆ ทำการแบ่งกริดแต่เพียงหยาบๆ การดำเนินการในลักษณะนี้ทำให้เกิดวิธีที่จะพัฒนาซอฟต์แวร์ CFD ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีกวิธีหนึ่งเรียกว่าวิธีสร้างกริดแบบสามารถปรับตัวได้เองเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะปัญหา (adaptive meshing) โดยหลักการทำงานคือ ซอฟต์แวร์สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในบริเวณต่างๆ ระหว่างการคำนวณและทำการปรับปรุงกริดเดิมให้มีความละเอียดขึ้นในบริเวณนั้นๆ

ในขั้นตอนการสร้างกริดนี้เองเป็นสิ่งที่ผู้พัฒนาซอฟต์แวร์ CFD ต่างๆ ให้ความสำคัญมาก เนื่องจากในการวิเคราะห์ทางอุตสาหกรรมโดยการใช้ CFD นั้นใช้เวลาในการดำเนินการสร้างกริดถึงครึ่งหนึ่งของเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมด ดังนั้นซอฟต์แวร์ CFD ส่วนใหญ่จึงมีความสามารถในการสร้างกริดในตัวเองโดยสามารถอ่านค่าข้อมูลขอบเขตต่างๆ จากโปรแกรมออกแบบสำเร็จรูปที่นิยมใช้ได้ เช่น AutoCAD, Solid Work เป็นต้น

2. ขั้นตอนการคำนวณ

ซอฟต์แวร์ CFD ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้มีรหัสวิธีการแก้ปัญหาทางตัวเลขแบ่งออกได้เป็นสามแบบคือ วิธีผลต่างสืบเนื่อง วิธีขึ้นประกอบจำกัด และวิธีปริมาตรจำกัด ส่วนสำคัญที่ทำให้แต่ละวิธีแตกต่างกันคือการประมาณค่าตัวแปรการไหลด้วยฟังก์ชันและขั้นตอนทำการไม่ต่อเนื่องสมการ (Discretisation)

2.1 วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method)

วิธีผลต่างสืบเนื่องเป็นวิธีที่ประมาณค่าตัวแปรการไหลด้วยการเฉลี่ยค่าระหว่างจุดรอบๆ ข้างโดยใช้อนุกรมเทเลอร์ ค่าผลต่างอนุพันธ์ต่างๆ ในสมการควบคุมจะถูกแทนที่โดยใช้ผลต่างสืบเนื่องทำให้ได้สมการพีชคณิตสำหรับค่าตัวแปรในแต่ละจุด สำหรับการแก้ปัญหาลักษณะต่างๆ ด้วยการใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องนั้นได้ถูกรวบรวมโดย Smith (1985)

2.2 วิธีขึ้นประกอบจำกัด (Finite Element Method)

วิธีขึ้นประกอบจำกัดเป็นวิธีที่ใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าภายในเป็นตัวอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรในแต่ละขึ้นประกอบ โดยฟังก์ชันที่ใช้ประมาณค่านั้นมีหลายรูปแบบ เช่น ฟังก์ชันเชิงเส้น หรือ ฟังก์ชันกำลังสอง เป็นต้น โดยหลักการในการคำนวณคือ สมการควบคุมจะต้องเป็นจริงเมื่อทำการแทนค่าตัวแปรด้วยผลเฉลยแม่นยำตรง ดังนั้นเมื่อแทนค่าตัวแปรด้วยฟังก์ชันการประมาณค่าภายในซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรงจะทำให้มีส่วนเหลือค้าง (Residual) ซึ่งส่วนเหลือค้างนี้จะเป็นตัวแปรในการวัดข้อผิดพลาด ส่วนเหลือค้างนี้สามารถทำให้หมดไปด้วยการคูณด้วยฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนัก และทำการหาปริพันธ์ ผลที่ได้จะเป็นสมการพีชคณิตของแต่ละขึ้นส่วน หลังจากนั้นจึงทำการรวมสมการทั้งหมดของทุกขึ้นส่วนที่ทำการแบ่งจะได้ระบบสมการพีชคณิตของปัญหาทั้งขอบเขต วิธีขึ้นประกอบจำกัดนี้ทำการพัฒนาเริ่มต้นมาจากการวิเคราะห์ปัญหาความเค้นในโครงสร้างของวัตถุ และได้ถูกนำมาปรับปรุงเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์งานเกี่ยวกับของไหลโดย Ziendiewicz และ Taylor ในปี 1991

2.3 วิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method)

วิธีปริมาตรจำกัดเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีผลต่างสืบเนื่อง เพื่อความเหมาะสมสำหรับปัญหาการไหล และการถ่ายเทความร้อน สำหรับวิธีปริมาตรจำกัดดำเนินการโดยทำการหาปริพันธ์สมการควบคุมภายในปริมาตรจำกัดหนึ่งๆ จนครบทั้งขอบเขตของปัญหาจากนั้นทำการไม่ต่อเนื่องสมการโดยแทนค่าอนุพันธ์ที่ปรากฏในสมการด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง สมการเมื่อแทนค่าและทำการจัดรูปแล้วพจน์ต่างๆ จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของการไหล เช่นการพา การแพร่ และพจน์การกำเนิด หลังจากนั้นนำระบบสมการพีชคณิตของปัญหาทั้งขอบเขตที่ได้มาแก้สมการโดยวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) ต่างๆ เช่น วิธีการตรง (Direct method) และวิธีการทำซ้ำ (Iterative method) โดยวิธีการทำซ้ำนั้นเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเนื่องจากวิธีนี้ใช้หน่วยความจำในการคำนวณน้อยกว่าวิธีการตรงมาก ในปัจจุบันสำหรับปัญหาเกี่ยวกับการไหลของไหล ผู้ผลิตซอฟต์แวร์นิยมใช้วิธีปริมาตรจำกัดในขั้นตอนการแก้ปัญหาซอฟต์แวร์ที่ใช้กันแพร่หลายคือ PHOENICS, FLUENT, FLOW3D, STAR-CD, FLOW-VENT เป็นต้น

3. ขั้นตอนหลังการคำนวณ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งโดยการนำผลการคำนวณที่ได้มาแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ซึ่งซอฟต์แวร์ CFD ที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่สามารถแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เช่น แสดงลักษณะขอบเขตที่ได้ทำการแบ่งพร้อมด้วยเวกเตอร์ของความเร็วภายในบริเวณนั้นๆ หรือทำการแสดงค่าเป็นลักษณะลำดับสีที่เท่ากันของความเร็วหรือความดัน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่สนใจ นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ CFD ยังพัฒนาเครื่องมือต่างๆ ในการแสดงผล เช่น สามารถแสดงผลทีละระนาบ เพื่อให้เห็นความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่ละชั้น และสามารถย่อขยายหรือหมุนในส่วนบริเวณที่ให้ความสนใจได้

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปของน้ำแข็งของแบบสามมิติด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Fluent ในการศึกษาเนื่องจากมีข้อดีและเหมาะสมกับลักษณะปัญหาการถ่ายเทความร้อนที่มีความซับซ้อนเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของสาร อีกทั้งยังประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษาด้วย

ปัญหาการเปลี่ยนสถานะ

รจนา (2545) กล่าวว่าปัญหาการเปลี่ยนสถานะมีลักษณะเด่นคือ รอยต่อสถานะ (Phase change interface) มีการเคลื่อนที่ซึ่งทำให้เป็นปัญหาไม่เชิงเส้น (Non-linear problem) และต้องมีการคำนวณค่าความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิเยือกแข็งระหว่างการแข็งตัว ซึ่งสามารถแบ่งวิธีในการแก้ปัญหาโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้ในหลายรูปแบบ

1. ลักษณะการเปลี่ยนสถานะ

Voller *et al.* (1990) ได้แบ่งปัญหาการเปลี่ยนสถานะตามลักษณะการเปลี่ยนสถานะของสารดังนี้คือ

1.1 การแบ่งสถานะกันชัดเจน (Distinct)

สถานะของแข็งและของเหลวซึ่งถูกแบ่งแยกกันอย่างชัดเจนด้วยเส้นแบ่งสถานะ (Phase change interface) ที่มีลักษณะราบเรียบและต่อเนื่อง (Smooth continuous) ลักษณะนี้จะเกิดขึ้นกับ

ปัญหาที่มีอุณหภูมิเยือกแข็งมีค่าคงที่ (Isothermal phase change) ตัวอย่าง เช่น การขึ้นรูปของน้ำแข็ง (Freezing of water) หรือ การแข็งตัวอย่างรวดเร็วของโลหะบริสุทธิ์ (Rapid solidification of pure metals)

1.2 การเปลี่ยนสถานะในโลหะ (Alloy)

เกิดในการเปลี่ยนสถานะที่มีโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) ซึ่งเป็นแท่ง (Columnar) และ/หรือ เม็ด (Equi-axed grains) และเส้นแบ่งสถานะมีลักษณะรูปร่างซับซ้อน เช่น การขึ้นรูปของโลหะส่วนใหญ่ที่มีอุณหภูมิเยือกแข็งเป็นช่วงของอุณหภูมิ

1.3 การเปลี่ยนสถานะอย่างต่อเนื่อง (Continuous)

สถานะของของแข็งและของเหลวกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณที่มีการเปลี่ยนสถานะและไม่มีเส้นแบ่งสถานะที่ชัดเจนระหว่างสถานะทั้งสอง ได้แก่ การขึ้นรูปของขี้ผึ้ง (Wax) โพลีเมอร์ (polymer) หรือ แก้ว (glass)

นอกจากนี้ Bejan (1993) ได้ทำการแยกความเร็วในการเปลี่ยนสถานะโดยใช้ค่าสเตฟัน (Ste) ในการพิจารณา โดยที่

$$Ste = \frac{c_s(T_F - T_C)}{L} \quad (1)$$

โดยที่ C_s คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารในสถานะของแข็ง, T_F คือ อุณหภูมิเยือกแข็ง, L คือ ค่าความร้อนแฝงจำเพาะ, T_C คืออุณหภูมิขอบเขตของปัญหา โดยสรุป สำหรับปัญหาการขึ้นรูปน้ำแข็งเป็นปัญหาการเปลี่ยนสถานะที่มีอุณหภูมิเยือกแข็งมีค่าคงที่ (Isothermal phase change) มีการเปลี่ยนสถานะที่มีการแบ่งสถานะกันชัดเจนระหว่างของแข็งและของเหลว และเกิดการเปลี่ยนสถานะอย่างช้าๆ เนื่องจากค่า $Ste < 1$

2. การแก้ปัญหาการเปลี่ยนสถานะ

ปัญหาการเปลี่ยนสถานะสามารถแบ่งวิธีในการแก้ปัญหาโดยระเบียบวิธีเชิงเลขได้ในหลายรูปแบบ คือ วิธีการอ้างอิงจุดต่อ เนื่องจากเส้นแบ่งสถานะมีการเคลื่อนที่ (Moving boundary) และบริเวณดังกล่าวมีปัจจัยสำคัญคือ ปริมาณความร้อนแฝงซึ่งมีค่าสูง จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา และการใช้ตัวแปรหลักในการพิจารณาค่าความร้อนแฝง ได้แก่ การใช้อุณหภูมิเป็นหลัก และการใช้เอนทาลปีเป็นหลัก การพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของจุดต่อ แบ่งออกเป็นดังนี้

2.1 วิธีกริดเคลื่อนที่ (Front tracking)

เป็นการพิจารณาว่ากริดเคลื่อนที่ตามเส้นแบ่งสถานะ (Phase front) อย่างต่อเนื่องโดยอาศัยเงื่อนไขสมดุลความร้อนที่เส้นแบ่งสถานะในการคำนวณตำแหน่งเส้นแบ่งสถานะที่เวลาต่างๆ ซึ่งอาจต้องการสมการการผิดรูปของกริด (Deforming grid formulation) เพื่อปรับเปลี่ยน mesh ตามการเคลื่อนที่ของเส้นแบ่งสถานะ วิธีนี้ได้ผลถูกต้องสำหรับปัญหาที่จุดเยือกแข็งมีอุณหภูมิคงที่ (Isothermal problems) แต่ไม่เหมาะสมกับปัญหาที่อุณหภูมิเยือกแข็งเป็นช่วงของอุณหภูมิ (Mushy problem)

2.2 วิธีกริดอยู่กับที่ (Fixed grid)

เป็นการให้กริดอยู่กับที่ ส่วนตำแหน่งของเส้นแบ่งสถานะจะทราบจากอุณหภูมิที่คำนวณได้วิธีนี้ถูกหามาจาก Weak formulation ซึ่งเงื่อนไขที่เส้นแบ่งสถานะ มีความหมายอยู่ภายในสมการแล้ว จึงไม่ต้องใช้เงื่อนไขดังกล่าวในการหาตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะไปพร้อมๆ กัน ข้อดีคือ ไม่จำเป็นต้องทราบตำแหน่งเริ่มต้นของการเปลี่ยนสถานะ ทำให้เหมาะสมกับปัญหาที่มีช่วงอุณหภูมิเยือกแข็ง (Mushy problems) ปัญหาที่มีรูปแบบการแข็งตัวที่ซับซ้อน และปัญหาการแข็งตัวในหลายมิติ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาปัญหาการขึ้นรูปน้ำแข็งของแบบสามมิติโดยแก้ปัญหาในส่วนของการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งโดยวิธีกริดอยู่กับที่ (Fixed grid) เนื่องจากเหมาะสมกับปัญหาการขึ้นรูปที่ซับซ้อนในหลายมิติได้ดี

สมการทางคณิตศาสตร์

ในกรณีที่ใช้โปรแกรมด้าน CFD จะกำหนดรูปแบบทั้งหมด ทั้งมวล โมเมนตัม และ พลังงาน สำหรับสถานะของเหลวใน สองและสามมิติ การเปลี่ยนสถานะจะถูกหาโดยสมดุลความร้อนและรอยต่อสถานะจะถูกหาโดยอัตราส่วนปริมาตรของเหลว (Liquid fraction) ของสองสถานะ ซึ่งความแม่นยำของรอยต่อสถานะจะขึ้นอยู่กับขนาดของกริด (Grid Size) และขนาดของช่วงเวลา คำนวณ (Time steps size)

1. สมการการถ่ายเทความร้อนสำหรับการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ

สมการอนุรักษ์มวล (Equation of continuity)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left[\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] = 0 \quad (2)$$

โดยที่ v_x, v_y และ v_z คือ ความเร็วในแกน x, y และ z ตามลำดับ

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Equation of motion)

แนวแกน X

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \mu \left[\left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (3)$$

โดยที่ P คือ ความดัน ρ คือ ความหนาแน่น μ คือ ความหนืด และ S_x คือ Source term

แนวแกน Y

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = \mu \left[\left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial y} + S_y \quad (4)$$

แนวแกน Z

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \mu \left[\left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] + \rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + S_z + S_b \quad (5)$$

โดยที่ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + 2\mu \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right] + S_h \quad (6)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิ C_p คือ ความจุความร้อน และ S_h คือ Source term

จากสมการที่ (2), (3), (4) เนื่องจากไม่พิจารณาการพาความร้อนโดยพิจารณาเฉพาะสมการอนุรักษ์พลังงานซึ่งจะได้ว่า

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + S_h \quad (7)$$

ซึ่ง S_h เป็นพจน์ที่จะถูกพิจารณาในกรณีที่เป็นกรณียการเปลี่ยนสถานะซึ่งในกรณีนี้ จะถูกกำหนดโดย สมการการถ่ายเทความร้อน เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรความร้อนแฝง

$$S_h = \rho \frac{\partial \Delta H}{\partial t} \quad (8)$$

โดยที่ ΔH คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนแฝง

ดังนั้นจะได้สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบแกน 3 มิติ

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \rho \frac{\partial \Delta H}{\partial t} \quad (9)$$

ในการหาแนวเส้นรอยต่อจะถูกพิจารณาโดยวิธีการที่ใช้แบบ Fixed grid และ สมการเอนทาลปี ในส่วนความร้อนแฝงจะถูกกำหนดใน Source term เอนทาลปีจะถูกกำหนดโดยผลรวมของ Sensible enthalpy (h) กับ ค่าความร้อนแฝง ΔH

$$H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \beta L \quad (10)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} h_{ref} &= \text{เอนทาลปีอ้างอิง} \\ T_{ref} &= \text{อุณหภูมิอ้างอิง} \\ c_p &= \text{ความจุความร้อนที่ความดันคงที่} \end{aligned}$$

2. อัตราส่วนของเหลว (Liquid fraction), β

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquid} - T_{solidus}} \quad ; \quad T_{solidus} < T < T_{liquid} \quad (11)$$

ซึ่งความร้อนแฝงจะมีค่าระหว่าง 0 (ของแข็ง) กับ L (ของเหลว)

3. ความยาวประสิทธิผล (Effective Length), L_{eff}

$$L_{eff} = \frac{A_s}{R} \quad (12)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} A_s &= \text{พื้นที่ผิวสัมผัสน้ำเกลือของช่องน้ำแข็ง} \\ R &= \text{รัศมีวงกลมทดสอบ} \end{aligned}$$

4. ค่าความคลาดเคลื่อน

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อน} = \frac{(\text{ผลการทดลองจากโรงงาน} - \text{ผลการจำลองด้วยโปรแกรม})}{\text{ผลการทดลองจากโรงงาน}} \quad (13)$$

5. เปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน

$$\text{เปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน} = \text{ค่าความคลาดเคลื่อน} \times 100 \quad (14)$$

งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

รจนา (2544) ทำการศึกษาการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งแบบสองมิติโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นน้ำแข็ง โดยใช้การพิจารณาจุดต่อแบบกริดอยู่กับนิ่งและคำนวณปริมาณความร้อนแฝงจากค่าความร้อนสัมผัสสมมุติ โดยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ได้มาจากการประกอบกันของสมการครอบคลุมซึ่งคือสมการการอนุรักษ์พลังงานความร้อน และสมการการนำความร้อน สำหรับการทำให้สมการไม่ต่อเนื่อง (Discretisation) ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มที่พิจารณาจุดต่อแบบอยู่กับที่ โดยแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นปริมาตรย่อยๆ และให้จุดต่ออยู่ตรงกลางปริมาตร โดยสมมุติตัวแปรให้มีการกระจายตามระยะทางเชิงเส้นตรง และประมาณตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยระบบ Two-Time Level Scheme 3 แบบ นอกจากนี้ยังได้เสนอการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่รอยต่อสถานะ 3 รูปแบบ และในส่วนการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม สำหรับการเปลี่ยนสถานะในหนึ่งมิติ พบว่า ผลเฉลยที่ได้จากการประมาณตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาทุกวิธีมีค่าใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำ และในการพิจารณารูปแบบการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่รอยต่อสถานะด้วยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในสถานะของแข็ง จะได้ผลเฉลยจากการจำลองแบบที่มีความใกล้เคียงผลเฉลยที่สุด ในกรณีการเปลี่ยนสถานะในสองมิติ ได้ผลเฉลยโดยประมาณมีความใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำเป็นอย่างดี และเนื่องจากการแบ่งรูปร่างและขนาดช่วงเวลาให้คำตอบที่ไม่ขึ้นกับขนาดปริมาตรควบคุมและช่วงเวลาของการประมาณตัวแปรตามเวลาทุกวิธีมีขนาดใกล้เคียงกันจึงพบว่าวิธี Explicit มีการประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

จุฬารัตน์และสมนึก (2548) ได้ทำการวิจัยเพื่อปรับปรุงระเบียบวิธีดิสครีไทเซชันในการแก้ความผิดพลาดในการคำนวณและได้นำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาค่าเชิงตัวแบบหนึ่งมิติที่ทราบผลเฉลยโดยวิธีเชิงวิเคราะห์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ระเบียบวิธีดิสครีไทเซชันถูกปรับปรุงเพื่อแก้ความผิดพลาดในการคำนวณและได้นำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาค่าเชิงตัวแบบหนึ่งมิติที่ทราบผลเฉลย โดยวิธีเชิงวิเคราะห์แล้วเพื่อหาประสิทธิภาพของระเบียบวิธีที่นำเสนอ แล้วหาประสิทธิภาพของระเบียบวิธีที่นำเสนอ โดยงานวิจัยได้ทำการอธิบายระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบกริดคงที่ในปัญหาด้านการขึ้นรูปของแข็ง โดยรอยต่อสถานะจะถูกกำหนดในสมการอนุรักษ์พลังงาน การปรับปรุงวิธีดิสครีไทเซชันได้ทำการพิจารณาในพจน์ของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ขอบเขตปริมาตรควบคุม เพื่ออธิบายจำนวนของอนุกรมในส่วนของรอยต่อสถานะ ซึ่งปัญหาแบบ 1 มิติ ได้ถูกพิจารณาด้วยวิธีดังกล่าว ซึ่งระเบียบวิธีดังกล่าวได้ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้นด้วยการตัดส่วนที่พิจารณาเชิงตัวเลขที่ไม่คงที่ออกเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลเฉลย และได้

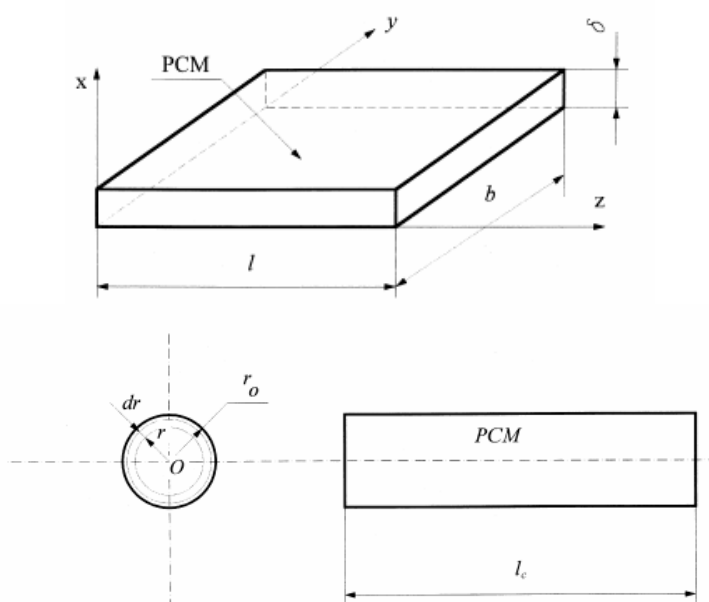
ทำการพิจารณาในส่วนของปัญหา 2 มิติเพิ่มเติมซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.2 % เป็นที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยทางคณิตศาสตร์

Sarler (1995) ได้ทำการรวบรวมผลงานวิจัยของ Stefan ในเรื่องการเปลี่ยนสถานะของแข็ง-ของเหลว ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เสนอรายละเอียดของงานวิจัยของ Jozef Stefan ในเรื่องการเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็ง-ของเหลว ในระหว่างปี 1889-1891 ซึ่งรายละเอียดที่พิจารณาคือปรากฏการณ์การขนส่ง, การพิจารณาการเปลี่ยนสถานะของเหลว – ก๊าซในปี 1873 และปฏิกิริยาเคมีในปี 1889 ซึ่งกล่าวว่า งานของ Stefan คือ การอธิบายผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและการทดลองเรื่องการเปลี่ยนสถานะของแข็ง-ของเหลวของ Pioneers Blake ในช่วงปีค.ศ. 17th และ Lomt Clapeyron and Neuman ในปี 18th โดยที่งานของ Stefan มีความเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของขอบเขตสถานะด้วยแนวคิดของตัวเองได้พิจารณาค่าคงที่ของตัวเองมาใช้ซึ่งถูกเรียกว่า Stefan number จุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยนี้คือการพยายามรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยของ Stefan ในเรื่องการเปลี่ยนสถานะระหว่าง ของเหลวและของแข็งที่ปรากฏในงานวิจัยมารวมเป็นอันหนึ่งอันเดียวเพื่อจะนำไปใช้ในเรื่องเดียวกันได้ง่าย

Ismaila and Padilhab (2000) ศึกษาการขึ้นรูปของน้ำแข็งในการไหลแบบราบเรียบภายในท่อสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นการขึ้นรูปน้ำแข็งที่การทำความเย็นต่ำกว่าจุดเยือกแข็งซึ่งได้ทำการพิจารณา 2 แบบทั้งแบบจำลองและการทดลอง ในการวิจัยนี้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากผลที่ได้จากแบบจำลองที่ทำการพิจารณา โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นเป็นคุณสมบัติทางกายภาพทางความร้อนในช่วงของแข็ง จุดประสงค์ของแบบจำลองนี้คือการแสดงสมการหลักของสมดุลพลังงานในช่วงของแข็งและของเหลวในการขึ้นรูปของแข็ง สมการเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต ถูกทำให้อยู่ในเทอมไร้หน่วยโดยวิธีของ Landau เพื่อทำให้เป็นรูปแบบเพื่อนำไปใช้ในการเคลื่อนที่ของสภาวะขอบเขต, เส้นความเร็วแบบราบเรียบในช่วงของเหลว โดยจะพิจารณาผลลัพธ์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference) โดยผลลัพธ์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Neumann แบบจำลองความจุความร้อนของ Bonacina และแบบจำลองพลังงานแบบกริดอยู่นิ่งของ Goodrich โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน

Zivkovic and Fujii (2001) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองการเปลี่ยนสถานะของสารเปลี่ยนสถานะ (PCM) ในภาชนะแบบลูกบาศก์และทรงกลม ดังภาพที่ 4 โดยพิจารณาสมการคณิตศาสตร์อยู่ในรูปของตัวแปรเอลธาลปีเป็นหลัก โดยแบบจำลองได้ศึกษาในหลากหลายรูปแบบเพื่อนำมา

เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Voller (1990) เพื่อทำการสนับสนุนสมมติฐานของแบบจำลองที่ทำการศึกษา สารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ได้แก่ $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ สมการการถ่ายเทความร้อนที่พิจารณา ประกอบด้วย การนำความร้อนและการพาความร้อน ซึ่งได้แสดงผลการทดลองในรูปความสัมพันธ์ของความยาวในแนวแกนภาชนะที่พิจารณากับอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา ดังเช่น ผลของภาชนะลูกบาศก์ที่ระยะแกน $x = 0.8405$ เมตรกับอุณหภูมิ เปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ Voller (1990) มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.12% ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบโดยรวมเป็นที่น่าพอใจอย่างมาก ทำให้สามารถสรุปผลการศึกษาได้ว่า การนำความร้อนในสารเปลี่ยนสถานะซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของสารเปลี่ยนสถานะ, แรงต้านทานผนังและผลของการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน ไม่มีผลต่อแบบจำลองการเปลี่ยนสถานะที่ทำการศึกษา



ภาพที่ 4 ลักษณะแบบจำลองการเปลี่ยนสถานะของสาร PCM

ที่มา: Zivkovic (2001)

Scanlon and Stickland (2002) ได้ทำการศึกษาละลายตัวของน้ำภายในท่อทรงกลมที่บรรจุด้วยน้ำแข็งที่มีผลจากการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนจากสภาวะขอบเขต โดยจะแบ่งการศึกษานี้ออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกทำการทดลองซึ่งเป็นการทดลองของท่อน้ำทรงกระบอกซึ่งมีผลของความร้อนที่มีค่า Rayleigh number เป็น 0.22×10^8 และ 0.475×10^8 ซึ่งในการทดลองนี้จะเป็นผลึกน้ำแข็งผสมอยู่ในน้ำที่มีการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบพาความร้อน และ

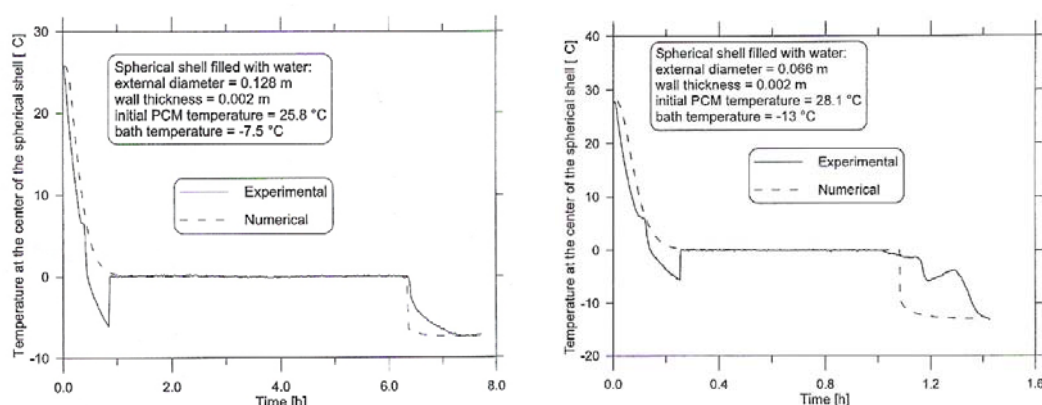
ทำการเก็บข้อมูลการทดลองด้วยวิธี Shadowgraphy และ วิธี PIV ซึ่งเป็นวิธีการเก็บข้อมูลโดยการประกอบอุปกรณ์ต่อพ่วงเครื่องบันทึก(CCD) และส่วนที่สองคือการศึกษาด้วยระเบียบวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ที่ทำการพิจารณารอยต่อสถานะโดยใช้วิธีแบบกริดยูนิง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ผลจากการเปรียบเทียบตำแหน่งรอยต่อสถานะของแข็งกับของเหลวระหว่างภาพจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับภาพบันทึกจากการทดลองมีความใกล้เคียงและแสดงรอยต่อสถานะที่เกิดขึ้นในเวลาแต่ละช่วงได้ดี แต่จะมีข้อเสียคือภาพที่ได้จากการบันทึกด้วยกล้องจะทึบมองไม่ชัดเจน

Casano and Piva (2003) ได้ทำการศึกษาปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนคงที่ในปัญหาการเปลี่ยนสถานะ โดยศึกษาในสองลักษณะคือการทำการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งในส่วนของการทดลองได้ทำการทดลองในกระบวนการเปลี่ยนสถานะในสารเปลี่ยนสถานะ (PCM) ที่มีผลจากความร้อนที่ตำแหน่งด้านบนเหนือระบบที่พิจารณาโดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคอปเปิลโดยวัดในระยะแนวแกน x และในการจำลองได้ใช้โปรแกรมที่พัฒนาจากวิธีปริมาตรควบคุมสำหรับการพิจารณาผลเฉลย ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและแบบจำลองได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งสามารถอธิบายผลจากการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนในระบบและผลการถ่ายเทความร้อนสู่ระบบจากแบบจำลองด้วยโปรแกรมที่ทำการศึกษา

Bermudez and Otero (2003) ได้ทำการศึกษาปัญหาการหล่อขึ้นรูปอลูมิเนียมในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นปัญหาการเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งกับของเหลวแบบสเตฟาน (Stefan Problem) โดยพิจารณาสมการเอลธาลปีในการแก้ปัญหาแบบสามมิติซึ่งสภาวะขอบเขตจะถูกกำหนดเป็นแบบอิสระโดยให้เปลี่ยนแปลงตามขอบเขตจริงในแต่ละงานที่ศึกษาและทำการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนในสถานะของเหลวเป็นหลัก ซึ่งได้ทำลักษณะไม่ต่อเนื่องในสมการด้วยวิธีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับเวลาและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกำหนดระยะห่าง และเสนอระเบียบขั้นตอนเชิงตัวเลขสำหรับการแก้ปัญหาสมการไม่ต่อเนื่อง ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยได้แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของความเร็วที่ใช้ในการหล่ออลูมิเนียมกับเวลาและความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาดังภาพที่ 5 ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดจริงจากโรงงานเพื่ออ้างอิงความถูกต้องของงานวิจัยต่อไป

Soltan and Ardehali (2003) ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขึ้นรูปน้ำแข็งที่เกิดจากขดลวดทำความเย็น กล่าวว่าความต้องการที่เพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของเครื่องใช้ไฟฟ้า ต้องมีการวางแผนงานด้านการจัดการ ดังนั้นการเก็บพลังงานความร้อน (TES) จึงถูกนำมาพิจารณา ผลที่เกิดจากช่วงภาระสูงสุดและต่ำสุด โดยทำการวิเคราะห์ การประดิษฐ์ถังกักเก็บและออกแบบระบบ การทำนายเวลาในการขึ้นรูปน้ำแข็ง และความแม่นยำในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจุดประสงค์ของการวิจัย คือการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาเวลาขึ้นรูปน้ำแข็ง โดยพิจารณาการถ่ายเทความร้อนแบบเวลาไม่คงที่ (Transient) และการถ่ายเทมวลของการขึ้นรูปน้ำแข็งรอบๆท่อ โดยเงื่อนไขขอบเขตที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference) ของ Du-fort Frankle ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งผลที่ได้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งในท่อขนาด 20 มิลลิเมตร สามารถทำนายความหนาของน้ำแข็งได้ที่ 10 มิลลิเมตร โดยใช้เวลารวมในการเกิดทั้งหมด 2,609.4 วินาที

Ismail *et al.* (2003) ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในขบวนการแข็งตัวของน้ำแข็งภายในท่อทรงกลม ซึ่งสมการครอบคลุมของปัญหาและสภาวะขอบเขตถูกพิจารณาด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference) และวิธีกริดเคลื่อนที่ (Moving Grid) โดยแบบจำลองที่พิจารณาจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยอื่น และทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากขนาดของท่อและวัสดุที่ใช้ในการผลิตท่อ สำหรับอุณหภูมิเริ่มต้นของสารเปลี่ยนสถานะอันได้แก่น้ำ แบ่งออก 2 กรณี คือ ที่อุณหภูมิ 25.8°C กับ 28.2°C ส่วนอุณหภูมิของสารทำความเย็น คือ -7.5°C กับ -13°C ตามลำดับ ซึ่งจะถูกพิจารณาเทียบกับอัตราส่วนมวลและเวลาในการขึ้นรูปของน้ำ ในท่อทรงกลม ผลการศึกษาพบว่า เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของน้ำภายในท่อเพิ่มตามขนาดความหนาของท่อและอุณหภูมิของสารทำความเย็นภายในท่อ และ วัสดุที่ทำจากโลหะจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าโลหะซึ่งจะทำให้ลดเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของน้ำประมาณ 30 นาที



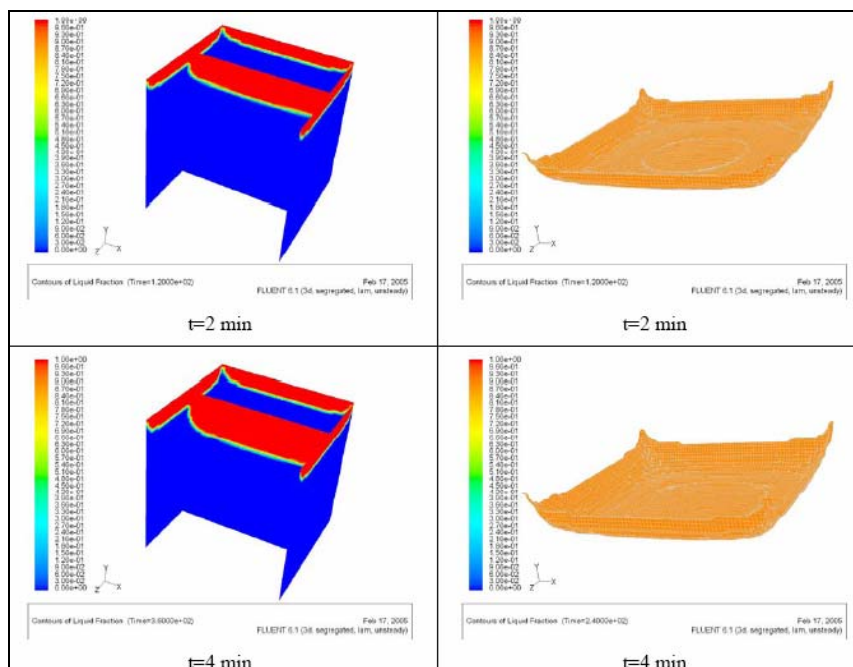
ภาพที่ 5 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดจากจุดกึ่งกลางเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิขอบเขต -7.5 °C และ -13 °C

ที่มา: Ismail (2003)

Conde *et al.* (2005) เสนอแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและการขึ้นรูปของการไหลแบบราบเรียบภายในท่อโดยทำการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent โปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ซึ่งจะพิจารณาปริมาณความร้อนและรอยต่อสถานะในความยาวถึงจุดต่อท่อ ซึ่งเป็นแบบ 2 มิติแบบ สี่เหลี่ยม 600 x 20 cm ด้วยวิธีกำหนดค่าแปรในเทอมของเอนทัลปี (Enthalpy- Porosity Technique) และอัตราส่วนของเหลว (Liquid Fraction) จะถูกพิจารณาในช่วงสถานะของผสมระหว่าง ของเหลว- ของแข็ง (Mushy Zone) โดยในการวิจัยได้ทำการพิจารณาสารทั้งหมด 3 ชนิดเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่ น้ำ, น้ำมันปาล์ม และน้ำมันเชื้อเพลิง โดยกำหนดสภาวะขอบเขตเริ่มต้นเดียวกันที่ ความเร็วเริ่มต้น 0.6, 0.95 และ 1.4 m/s ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 4.7 และ 7.3 mm อุณหภูมิผนังท่อที่ 77 และ 195 K โดยผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมถูกนำไปเปรียบเทียบกับแหล่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่ามีความเคลื่อนของน้ำมันเชื้อเพลิง, น้ำ, น้ำมันปาล์ม 5.7, 10.2 และ 39% ตามลำดับ

Muttaleb (2006) เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหลอมเหลวของน้ำแข็งภายในภาชนะลูกบาศก์ โดยทำการวิจัยเชิงตัวเลขเกี่ยวกับการละลายตัวของน้ำแข็งในภาชนะ ซึ่งใช้วิธีเอนทัลปีแบบกริดอยู่นิ่งในการควบคุมการพาความร้อนจากสิ่งแวดล้อม และพิจารณาผลจากการเปลี่ยนสถานะด้วยการกำหนดพจน์เพิ่มเติม (Source term) ไว้ในรูปความร้อนแฝงซึ่งปรากฏในสมการครอบคลุม (Governing Equations) โดยการทำจำลองซึ่งพิจารณาด้วยโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Fluent) โดยจะทำการพิจารณาลูกบาศก์ขนาด 2x2 เลือกขนาดกริดที่

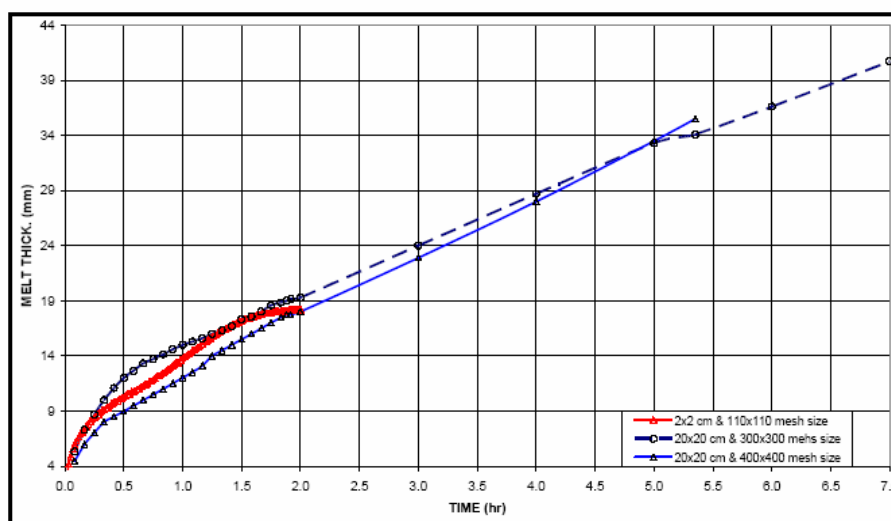
110x110 และทำการเลือกช่วงเวลาที 1 วินาที ค่าความแตกต่างอุณหภูมิของแข็งและของเหลวถูกเลือกที่ 0.05 K ซึ่งผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กราฟแสดงอัตราส่วนของเหลวของภาชนะลูกบาศก์จากสถานะขอบเขตการนำความร้อนผิวขอบเขตด้านข้างและการพาความร้อนบริเวณผิวขอบเขตด้านบน

ที่มา: Muttaleb (2006)

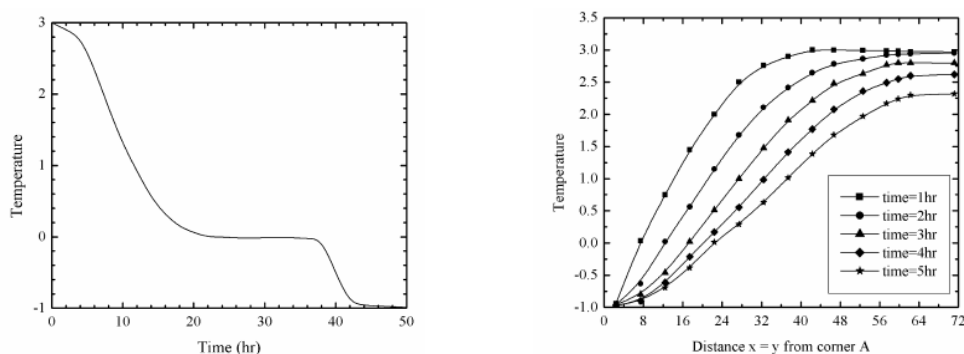
ซึ่งผลที่ได้สนับสนุนในเรื่องผลที่เกิดจาก Natural Convection ด้านบนกล่องลูกบาศก์ต่อการละลายของน้ำแข็งในกล่องลูกบาศก์มากกว่าการนำความร้อนจากผิวขอบเขตด้านข้าง และความถูกต้องของผลการจำลองที่ได้ขึ้นกับ Grid Size ดังแสดงดังภาพที่ 7 ค่า Time Step และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเหลว (Liquidus Temperature) กับอุณหภูมิของแข็ง (Solidus Temperature)



ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบความหนาของชั้นหลอมเหลวกับเวลา ที่ขนาดกริดแตกต่างกัน

ที่มา: Muttaleb (2006)

Chatterjee and Chakraborty (2007) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน ในปัญหาการเปลี่ยนสถานะแบบสองมิติโดยใช้วิธีพิจารณาตัวแปรเอลธาลปีในสมการของ Lattice Boltzman ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นวิธีการของ Lattice Boltzman ในการนำเสนออัลกึธึมการถ่ายเท ความร้อนภายในระบบซึ่งได้พัฒนาวิธีเอลธาลปีแบบกริดคงที่ ซึ่งผลจากการศึกษาแสดงดังภาพที่ 8 โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่ามีค่าใกล้เคียงเป็นที่น่าสนใจ



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิและความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง

ที่มา: Chatterjee (2007)

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยขั้นเริ่มต้นทำการเก็บข้อมูลจากโรงงานเพื่อนำมากำหนดใช้ในแบบจำลอง โดยอุณหภูมิน้ำเกลือและอุณหภูมิอากาศจะถูกใช้เป็นสภาวะขอบเขต ซึ่งแบบจำลองจะทำการสร้างรูปแบบการคำนวณเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลจากโรงงาน โดยลักษณะการจำลองที่มีความใกล้เคียงจะถูกนำมาวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปทรงภาชนะ การเปลี่ยนสภาวะขอบเขตและการลดปริมาตรน้ำที่ใช้ในการผลิต

อุปกรณ์

1. การเก็บข้อมูลจากโรงงาน

- 1.1 เครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบ 10 ช่องสัญญาณ Comark รุ่น C 8510 ที่มีช่วงอุณหภูมิวัด -100°C ถึง 1300°C
- 1.2 สาย Thermocouple Type K จำนวน 10 เส้น เชื่อมหัวต่อด้วยไฟฟ้า
- 1.3 หัวต่อเชื่อมเครื่องบันทึกอุณหภูมิ กับ Thermocouple จำนวน 10 ตัว
- 1.4 แถบหมึก Canon รุ่น Seamless ribbon ERC- 051

2. การจำลองด้วยโปรแกรม fluent

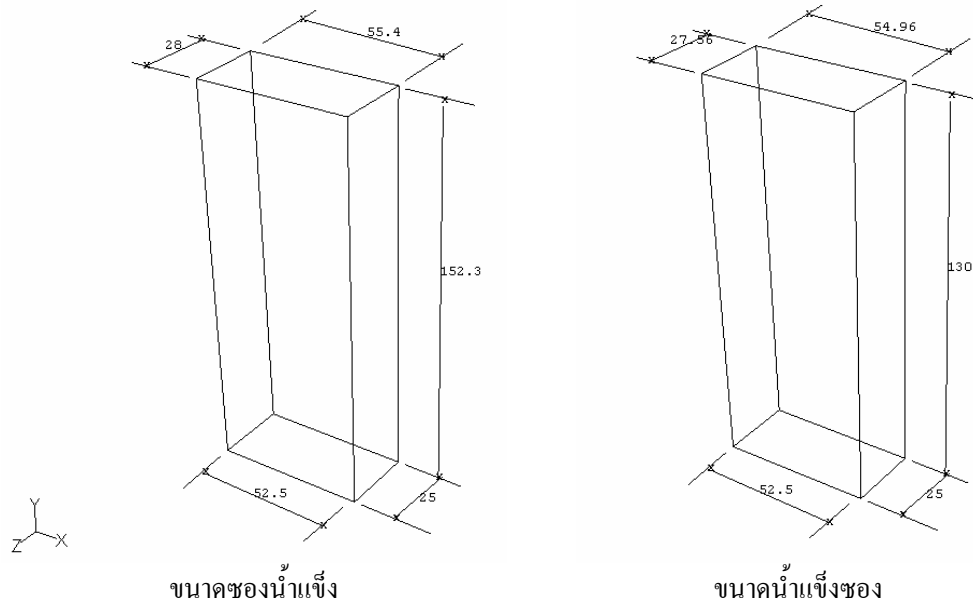
- 2.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ หน่วยประมวลผลกลางแบบ Intel Core™ 2 Duo 1.8 GHz หน่วยความจำสำรอง (RAM) 1.5 GHz
- 2.2 เครื่องพิมพ์แบบสี (Colors Printer)
- 2.3 โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ FLUENT

วิธีการ

1. การเก็บข้อมูลจากโรงงาน

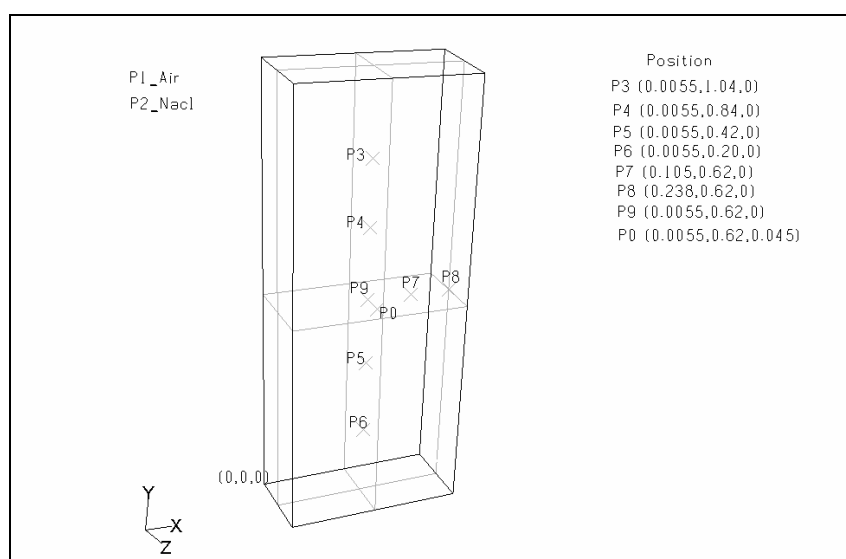
โรงงานอุตสาหกรรมน้ำแข็งซองที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเป็นโรงงานผลิตน้ำแข็งซองที่ทำการผลิตตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งในการเก็บข้อมูลได้ทำการสุ่มตัวอย่างของน้ำแข็งที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งหมด 6 ซองโดยไม่ซ้ำตำแหน่ง โดยดำเนินการขั้นตอนการเก็บข้อมูลดังต่อไปนี้

1.1 วัสดุทรงของน้ำแข็งที่ใช้ในการผลิตดังแสดงในภาพที่ 9 โดยความสูงของน้ำที่บรรจุจะเป็นความสูงของระบบที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งขนาดของน้ำแข็งมีขนาด 25 x 52 x 152 ซม. โดยประมาณ และน้ำแข็งของหลังการผลิตมีขนาด 25 x 52 x 130 ซม. โดยประมาณ



ภาพที่ 9 ขนาดรูปทรงของช่องน้ำแข็งก่อนการบรรจุน้ำเปล่าและหลังการบรรจุน้ำเปล่า

1.2 กำหนดตำแหน่งจุดที่ใช้วัดอุณหภูมิภายในช่องน้ำแข็งและภายนอกน้ำแข็งทั้งหมดรวม 10 จุด โดยตำแหน่งจุดวัดภายในช่องน้ำแข็งทั้ง 8 จุดกระจายใน 3 แกน และจุดวัดอีก 2 จุดจะถูกใช้ในการวัดอุณหภูมิขอบเขต ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิอากาศเหนือผิวผนังด้านบน (P1) และ อุณหภูมิ น้ำเกลือ (P2) ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ตำแหน่งจุดวัดสัญญาณทั้ง 10 จุดที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต

1.3 ประกอบเครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบ 10 ช่องสัญญาณ Comark รุ่น C 8510 ในภาพที่ 11 เข้ากับสายเทอร์โมคอปเปิล ชนิด K ในภาพที่ 12 โดยผ่านหัวต่อเชื่อมสายสัญญาณซึ่งลักษณะในการประกอบชุดวัดอุณหภูมิแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 11 เครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบ 10 ช่องสัญญาณ Comark รุ่น C 8510 ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 12 ชุดหัวต่อกับสายเทอร์โมคอปเปิลชนิด K ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 13 ชุดวัดสัญญาณอุณหภูมิที่ประกอบหัวต่อกับเครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

1.4 เริ่มวัดอุณหภูมิในสถานะเริ่มต้นของน้ำ และกำหนดเวลาแสดงผลไว้ทุก 10 นาที ตลอดการผลิตจนกระทั่งน้ำแข็งออกจากช่อง



ภาพที่ 14 ลักษณะน้ำแข็งของหลังการผลิตที่ประกอบกับชุดวัดอุณหภูมิก่อนการเก็บชุดอุปกรณ์วัดสัญญาณ

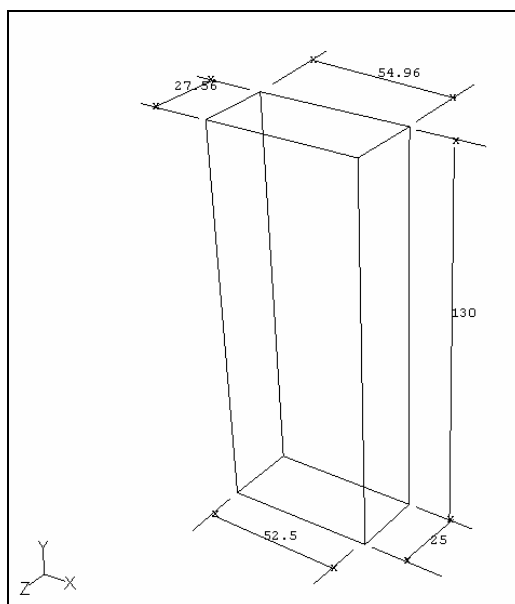
1.5 จัดเก็บชุดบันทึกอุณหภูมิและสุ่มเลือกของน้ำแข็งที่ใช้วัดอุณหภูมิจนครบ 6 การทดลอง โดยตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิจะเป็นตำแหน่งเดียวกันทุกการทดลอง

2. การจำลองด้วยโปรแกรม Fluent

ขั้นตอนการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent จะเริ่มทำการสร้างรูปทรงของปัญหา ด้วยโปรแกรม Gambit ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม Fluent ต่อจากนั้นจะทำการสร้างแบบจำลองตาข่ายข้อมูล (Meshing) ซึ่งจะเป็นการกำหนดความละเอียดของการจำลอง หลังจากนั้นจะนำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม Fluent เพื่อกำหนดสภาวะขอบเขตและรูปแบบของปัญหาที่ใช้ในการจำลองแล้วจึงทำการแก้ปัญหา โดยรูปแบบของการจำลองที่เหมาะสมที่สุด จะถูกนำมาวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปทรงน้ำแข็งของ, สภาวะขอบเขตและปริมาณต่อไป

2.1 การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ

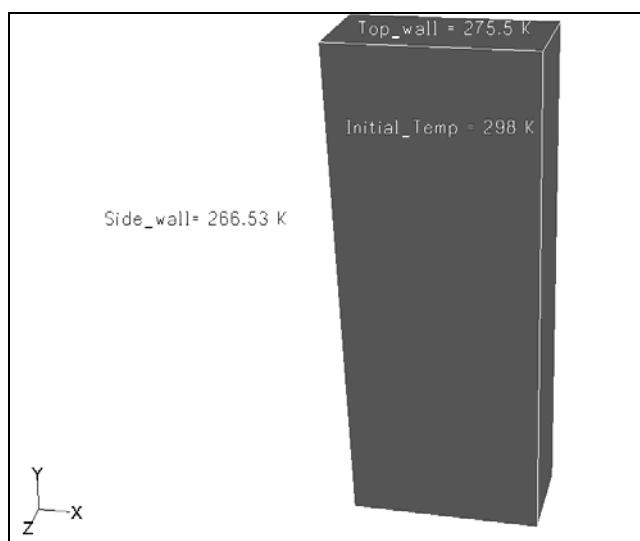
รูปทรงในการเก็บข้อมูลจากโรงงานจะถูกนำมาสร้างด้วยโปรแกรม Gambit ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมสำเร็จรูป Fluent แสดงในภาพที่ 15 โดยมีรูปทรงเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความสูง 130 cm โดยประมาณ



ภาพที่ 15 รูปทรงของปัญหาที่ถูกสร้างโดยโปรแกรม Gambit เพื่อใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent

2.2 การสร้างแบบจำลองตาข่ายข้อมูล (Meshing)

จากรูปทรงของปัญหาเป็นรูปทรงที่ไม่มีความซับซ้อนในการวิเคราะห์จึงทำการสร้างแบบจำลองตาข่ายข้อมูลแบบมีโครงสร้าง ซึ่งชนิดของกริดจะขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปทรงเป็นหลัก ซึ่งในกรณีที่รูปทรงเป็นรูปทรง 3 เหลี่ยมหรือทรงกลมที่มีความซับซ้อน จำเป็นจะต้องใช้กริดแบบไม่มีโครงสร้างเพื่อทำการสร้างโครงสร้างตาข่ายบริเวณที่มีความซับซ้อน สำหรับความถูกต้องของปัญหาจะขึ้นอยู่กับขนาดกริด (Grid Size) ดังนั้นจึงทำการพิจารณาขนาดกริดที่ใช้ในการจำลอง โดยเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดลองที่ 6 ที่นำมาใช้ในการกำหนดสถานะขอบเขตดังแสดงในภาพที่ 16



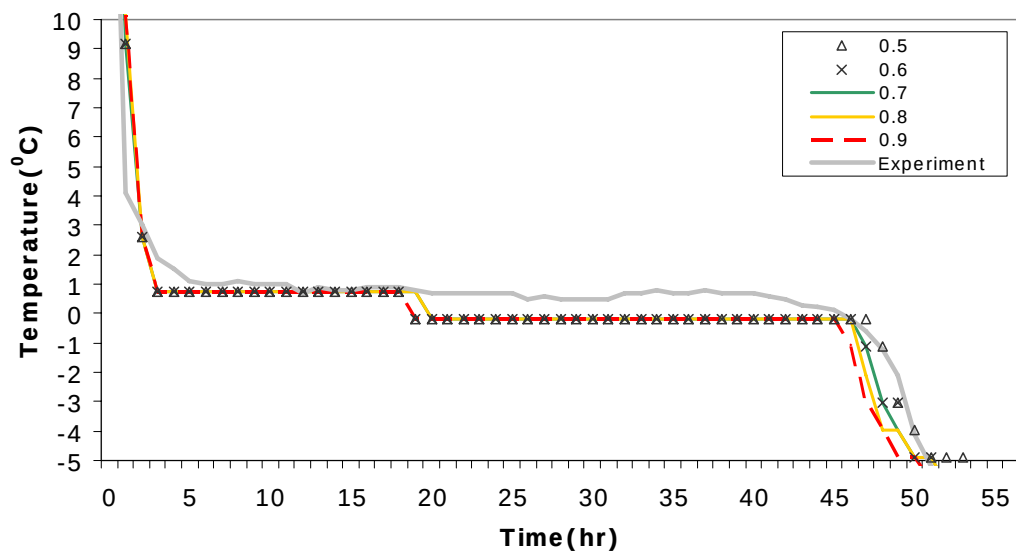
ภาพที่ 16 รูปแบบปัญหาในการทดลองที่ 6 ในการกำหนดขนาดกริดที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent

ในการจำลองจะกำหนดคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นสภาวะขอบเขตของการทดลองที่ 6 ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 298 K อุณหภูมิน้ำเกลือคงที่ 266.53 K และอุณหภูมิอากาศคงที่ที่ 275.5 K แล้วทำการปรับเปลี่ยนขนาดของกริดที่ใช้ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 cm ซึ่งในการเปรียบเทียบความถูกต้องจะพิจารณาจากจุดวัดอุณหภูมิที่ 9 ที่มีตำแหน่งใกล้กับกึ่งกลางของน้ำแข็ง โดยในส่วนของคุณสมบัติของน้ำที่พิจารณาจะแยกพิจารณาระหว่างของเหลวและของแข็ง ใน Thermal Conductivity, Cp, Density โดยกำหนดในรูป piecewise polynomial ที่มีช่วงคุณสมบัติเปลี่ยนตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ผลจะแสดงเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนที่จุด 9 เทียบกับเวลา ซึ่งขนาดกริดที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจะถูกเลือกใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent ทั้งหมด ต่อไป

ตารางที่ 1 สภาวะที่ใช้ในการจำลองการทดลองที่ 6 ในการพิจารณานาถกริด

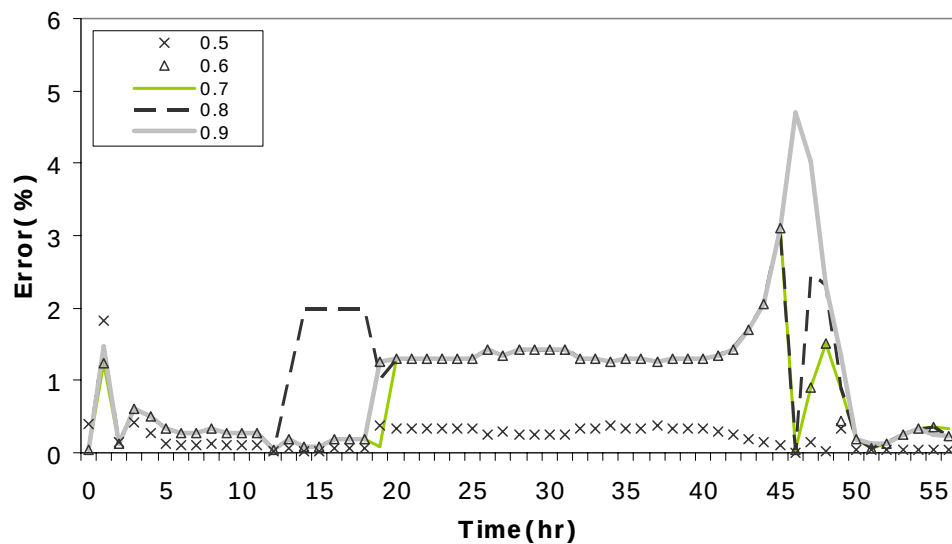
Material Properties	Water Conditions Using in Fluent Program
Initial Temperature	298 K
Nacl Temperature	Wall Temperature Constant 266.53 K
Air Temperature	Wall Temperature Constant 275.5 K
Grid size	Adjust Grid size
Time Step Size	1 s
Melting Heat	334 kj/kg
Viscosity	Constant 0.001003 kg/ms
Molecular Weight	Constant 18.0152 kg/kgmol
Solidus Temperature	273 k
Liquidus Temperature	274 k
Thermal Conductivity	Piecewise-Polynomial $y = 4E-05x^2 + 0.0079x + 0.5582$ (Liquidus) $y = -2E-07x^2 - 0.0588x + 2.7619$ (Solidus)
Cp	Piecewise-Polynomial $y = 0.0018x^4 - 0.1337x^3 + 2.6766x^2 - 20.834x + 4231.8$ (Liquidus) $y = 0.0423x^3 - 0.6339x^2 + 55.808x + 1618.5$ (Solidus)
Density	Piecewise-Polynomial $y = -0.0001x^4 + 0.0082x^3 - 0.2629x^2 + 0.8758x + 999.09$ (Liquidus) $y = -0.0001x^4 - 0.0017x^3 + 0.0443x^2 - 0.6884x + 924.39$ (Solidus)

ผลจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$) กับเวลา (hr) จุดวัดที่ 9 ดังแสดงในรูปที่ 17 และ เปรี่เซนต์ความคลาดเคลื่อนในรูปที่ 18 ตามลำดับ



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการพิจารณาขนาดกริดของแบบจำลองที่ 6

จากภาพที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการพิจารณาขนาดกริดของแบบจำลองที่ 6 จุดวัดที่ 9 พบว่าขนาดกริด 0.5 cm มีเส้นอุณหภูมิใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุดเมื่อเทียบกับกริดทั้งหมด เมื่อพิจารณาตลอดเส้นกราฟพบว่าเวลาที่แตกต่างกันมากที่สุดคือช่วง 45 hr ถึง 55 hr



ภาพที่ 18 ค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลาในการพิจารณาขนาดกริดของแบบจำลองที่ 6

จากภาพที่ 18 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลาในการพิจารณานาคริตของแบบจำลองที่ 6 จุดวัดที่ 9 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับขนาดกริดที่พิจารณา โดยขนาดกริดที่มีขนาดเล็กจะมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยตาม ซึ่งที่ 0.5 cm มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกริดทั้งหมด และเมื่อกำหนดขนาดกริดให้มีค่าต่ำกว่า 0.5 cm พบว่าโปรแกรมไม่สามารถทำงานได้ที่ขนาดกริดดังกล่าว ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดกริดที่ 0.5 cm ในการจำลอง

2.3 รูปแบบของปัญหา

เนื่องจากปัญหาเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนที่ไม่มีการถ่ายเทมวลและความเร็ว ดังนั้นปัญหาจะถูกพิจารณาเฉพาะสมการพลังงานเท่านั้นและแก้ปัญหาคาการเปลี่ยนสถานะสารโดยกำหนดรูปแบบปัญหาเป็น Solidification /melting Problem ซึ่งเป็นรูปแบบปัญหาที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการขึ้นรูปของแข็งและการหลอมเหลว โดยจะมีการพิจารณาช่วงการขึ้นรูป/หลอมเหลว ที่เกี่ยวข้องกับผลต่างของอุณหภูมิในช่วงเปลี่ยนสถานะของสารระหว่างอุณหภูมิของแข็ง (Solidus Temperature) และอุณหภูมิของเหลว (Liquidus Temperature) ในการจำลองจะพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 3 มิติ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Unsteady Problem) และทำการประมาณตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยวิธี implicit ซึ่งสมการที่ถูกทำดิสครีไทเซชัน (Discretization Equation) ได้แก่สมการพลังงานเพียงสมการเดียว

2.4 Convergence criteria

สำหรับทุกขั้นตอนของงานวิจัยนี้ ค่าของ Convergence criteria ได้ถูกกำหนดแยกตัก้างของการคำนวณเชิงตัวเลขที่ 1×10^{-6}

2.5 คุณสมบัติของน้ำ

แยกพิจารณาใน 2 สถานะเนื่องจากคุณสมบัติของน้ำในแต่ละสถานะไม่เหมือนกัน ซึ่งคุณสมบัติของน้ำในสถานะของแข็งและสถานะของเหลวจะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก

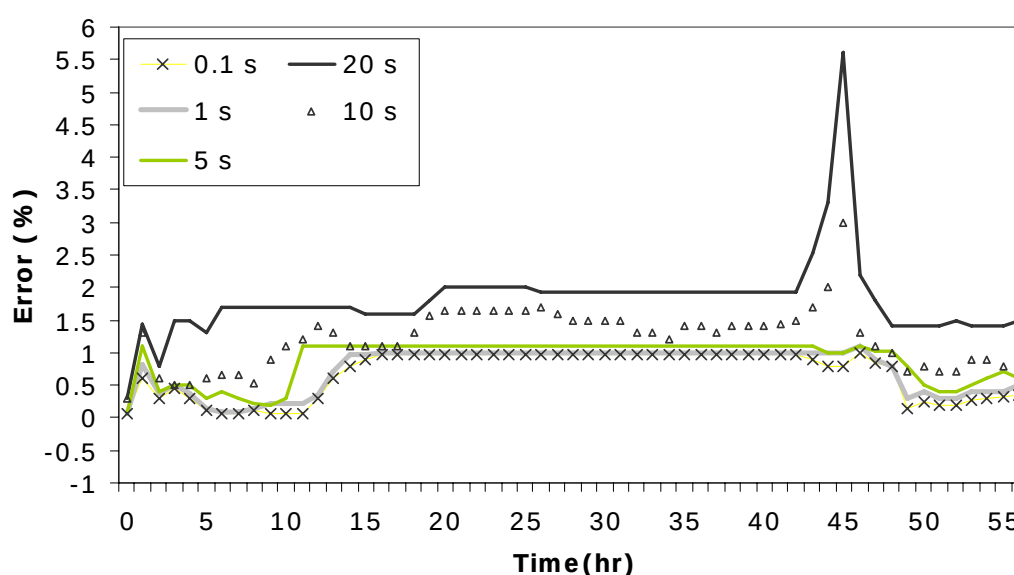
2.6 การวิเคราะห์ปัญหา

ในการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent ช่วงเวลาการคำนวณ (Time Step Size) มีความสำคัญต่อความถูกต้องของข้อมูล ดังนั้นในการเลือกใช้จึงต้องทำการเปรียบเทียบขนาดของช่วงการคำนวณกับผลการทดลองจริง เพื่อหาค่าที่ใกล้เคียงที่สุด

ซึ่งได้เลือกการทดลองที่ 6 มาใช้เปรียบเทียบความถูกต้องในการช่วงเวลาการคำนวณที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent ซึ่งกำหนดคุณสมบัติดังตารางที่ 2 เพื่อวิเคราะห์หาค่าช่วงเวลาการคำนวณที่นำมาใช้ในการจำลอง

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการจำลองการทดลองที่ 6 ในการพิจารณาขนาดช่วงเวลาการคำนวณ

Material Properties	Water Conditions Using in Fluent Program
Initial Temperature	298 K
Nacl Temperature	Wall Temperature Constant 266.53 K
Air Temperature	Wall Temperature Constant 275.5 K
Grid size	0.5 cm
Time Step Size	Adjust time step size
Melting Heat	334 kJ/kg
Viscosity	Constant 0.001003 kg/ms
Molecular Weight	Constant 18.0152 kg/kgmol
Solidus Temperature	273 k
Liquidus Temperature	274 k
Thermal Conductivity	Piecewise-Polynomial $y = 4E-05x^2 + 0.0079x + 0.5582$ (Liquidus) $y = -2E-07x^2 - 0.0588x + 2.7619$ (Solidus)
Cp	Piecewise-Polynomial $y = 0.0018x^4 - 0.1337x^3 + 2.6766x^2 - 20.834x + 4231.8$ (Liquidus) $y = 0.0423x^3 - 0.6339x^2 + 55.808x + 1618.5$ (Solidus)
Density	Piecewise-Polynomial $y = -0.0001x^4 + 0.0082x^3 - 0.2629x^2 + 0.8758x + 999.09$ (Liquidus) $y = -0.0001x^4 - 0.0017x^3 + 0.0443x^2 - 0.6884x + 924.39$ (Solidus)



ภาพที่ 19 ค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลาในการกำหนดช่วงเวลาการคำนวณที่จุดวัดที่ 9 การทดลองที่ 6

จากภาพที่ 19 พบว่าค่าช่วงเวลาการคำนวณที่ 0.1 s มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเวลา โดยมีความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกับ 1 s แต่เนื่องจากค่าช่วงเวลาการคำนวณน้อยมากๆ จะทำให้เกิดปัญหากับระบบคอมพิวเตอร์ได้ ดังนั้นจึงเลือกช่วงเวลาการคำนวณ 1 s ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกันกับช่วงเวลาการคำนวณ 0.1 s ที่สุด

3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นน้ำแข็งของ

วิเคราะห์ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยได้แก่ ภาชนะบรรจุ, อุณหภูมิขอบเขตและปริมาตร ซึ่งเกี่ยวข้องกับการผลิตน้ำแข็งของโดยตรง จึงสามารถที่จะนำมาปรับปรุงการผลิตได้โดยง่าย เพื่อนำมาใช้เป็นทางเลือกในการลดพลังงานและต้นทุนการผลิตได้

3.1 กรณีศึกษาสถานะอุณหภูมิขอบเขต

การขึ้นรูปน้ำแข็งของเป็นลักษณะปัญหาการถ่ายเทความร้อนระหว่างระบบกับอุณหภูมิขอบเขตซึ่งได้แก่อุณหภูมิน้ำเกลือและอุณหภูมิอากาศ ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาการขึ้นรูปน้ำแข็งจึงต้องพิจารณาสถานะอุณหภูมิขอบเขตเป็นอันดับแรก โดยทำการเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิขอบเขตให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการผลิต โดยทำการแยกพิจารณา 2 กรณีคือ

- กำหนดให้ อุณหภูมิอากาศคงที่ และอุณหภูมิน้ำเกลือเปลี่ยนแปลง
- กำหนดให้ อุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง และอุณหภูมิน้ำเกลือคงที่

ตารางที่ 3 ได้แสดงสภาวะขอบเขตที่ใช้ในการศึกษาโดยแยกออก 2 กรณีคือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิน้ำเกลือ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนสภาวะขอบเขตในแต่ละกรณี

ตารางที่ 3 สภาวะขอบเขตที่ทำการศึกษาปัจจัยจากอุณหภูมิขอบเขตของปัญหาการขึ้นรูปน้ำแข็งซอง

กรณีที่ 1 กำหนดอุณหภูมิน้ำเกลือคงที่ -6.62°C	กรณีที่ 2 กำหนดอุณหภูมิอากาศคงที่ 2.5°C
1. $T_{\text{air}} = 0.5^{\circ}\text{C}$	1. $T_{\text{NaCl}} = -2.62^{\circ}\text{C}$
2. $T_{\text{air}} = 1.5^{\circ}\text{C}$	2. $T_{\text{NaCl}} = -4.62^{\circ}\text{C}$
3. $T_{\text{air}} = 2.5^{\circ}\text{C}$	3. $T_{\text{NaCl}} = -5.62^{\circ}\text{C}$
4. $T_{\text{air}} = 3.5^{\circ}\text{C}$	4. $T_{\text{NaCl}} = -6.62^{\circ}\text{C}$
5. $T_{\text{air}} = 4.5^{\circ}\text{C}$	5. $T_{\text{NaCl}} = -7.62^{\circ}\text{C}$
6. $T_{\text{air}} = 5.5^{\circ}\text{C}$	6. $T_{\text{NaCl}} = -8.62^{\circ}\text{C}$
7. $T_{\text{air}} = 6.5^{\circ}\text{C}$	7. $T_{\text{NaCl}} = -11.62^{\circ}\text{C}$

3.2 กรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุน้ำแข็ง

ปัจจัยอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำการศึกษา ได้แก่ รูปทรงภาชนะ เนื่องจากเป็นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดรูปร่างของระบบที่ทำการพิจารณา ดังนั้นในการศึกษารูปทรงภาชนะจะทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะภาชนะในรูปทรงต่างๆกัน โดยกำหนดปริมาตรให้คงที่เท่ากับภาชนะที่ใช้บรรจุจริงซึ่งมีปริมาตรรวม 0.183 m^3 และเพื่อให้สภาวะขอบเขตมีความใกล้เคียงกันจึงกำหนดให้พื้นที่บริเวณผิวขอบเขตบนซึ่งเป็นจุดที่สัมผัสกับอากาศมีขนาดเท่ากันคือ 0.151 m^2 ดังแสดงในตารางที่ 4 จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในระบบกับเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งซองต่อไป

ตารางที่ 4 รายละเอียดรูปทรงที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent กรณีศึกษารูปทรงภาชนะ
บรรจุปริมาตร 0.183 m^3

รูปทรงวัตถุ	พื้นที่ผิวสัมผัส น้ำเกลือ (m^2)	พื้นที่ผิวรอบนอก ทั้งหมด (m^2)	ปริมาตร (m^3)	ความสูง (m)
ปริซึมฐาน 3 เหลี่ยมมุมฉาก	2.42	2.57	0.183	1.21
ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมผืนผ้า	2.10	2.25	0.183	1.21
ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมจัตุรัส	2.03	2.18	0.183	1.21
ปริซึมฐาน 5 เหลี่ยม	1.94	2.09	0.183	1.21
ปริซึมฐาน 6 เหลี่ยม	1.90	2.05	0.183	1.21
ปริซึมฐาน 8 เหลี่ยม	1.87	2.02	0.183	1.21
ทรงกระบอก	1.82	1.97	0.183	1.21
ครึ่งทรงกลม	1.69	1.84	0.183	0.443

3.3 กรณีศึกษาการลดปริมาตรครึ่งหนึ่ง

เนื่องจากปัญหาเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำกับอุณหภูมิขอบเขต ดังนั้น ปริมาตรน้ำจึงมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยตรง การศึกษาครั้งนี้จึงทำการลดปริมาตรระบบลง ครึ่งหนึ่งเพื่อศึกษาเวลาที่เกิดขึ้น ซึ่งเดิมใช้ปริมาตร 0.183 m^3 เมื่อลดปริมาตรลงจะเหลือ 0.0915 m^3 และพื้นที่สัมผัสอากาศเหลือ 0.07561 m^2 ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่สัมผัสอากาศเดิม และส่วนสูงเท่าเดิมที่ 1.21 m

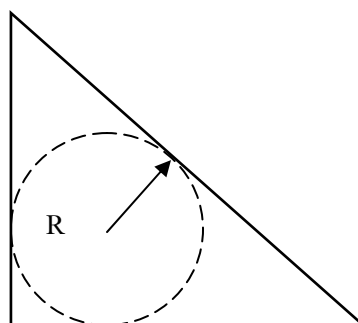
โดยคุณสมบัติในการจำลองจะเลือกใช้เปรียบเทียบกับกรณที่ 6 โดยกำหนดสภาวะขอบเขตเดียวกันในแต่ละรูปทรงที่พิจารณา ผลที่ได้จากการจำลองจะถูกนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลา เพื่อศึกษารูปทรงที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้เวลาในการขึ้นรูปน้อยที่สุด และวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อไป

ตารางที่ 5 รายละเอียดรูปทรงที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent กรณีศึกษารูปทรงภาชนะ
บรรจุปริมาตร 0.0915 m^3

รูปทรงวัตถุ	พื้นที่ผิวสัมผัส น้ำเกลือ (m^2)	พื้นที่ผิวรอบนอก ทั้งหมด (m^2)	ปริมาตร (m^3)	ความสูง (m)
ปริซึมฐาน 3 เหลี่ยมมุมฉาก	1.681	1.7569	0.0915	1.21
ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมผืนผ้า	1.474	1.5496	0.0915	1.21
ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมจัตุรัส	1.405	1.4816	0.0915	1.21
ปริซึมฐาน 5 เหลี่ยม	1.343	1.4192	0.0915	1.21
ปริซึมฐาน 6 เหลี่ยม	1.314	1.3897	0.0915	1.21
ปริซึมฐาน 8 เหลี่ยม	1.286	1.3620	0.0915	1.21
ทรงกระบอก	1.254	1.3303	0.0915	1.21
ครึ่งทรงกลม	1.092	1.1684	0.0915	0.202

ในการพิจารณาปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งของภาชนะรูปทรงต่างกัน พบว่าเมื่อน้ำตัดเปลี่ยนไปพื้นที่ผิวที่สัมผัสน้ำเกลือจะเปลี่ยนไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาระยะที่สั้นที่สุดจากจุดศูนย์กลางถึงผนังขอบเขต เปรียบได้กับการพิจารณาวงกลมทดสอบที่มีศูนย์กลางเดียวกันกับพื้นที่หน้าตัดของรูปทรงซึ่งรัศมีของวงกลมทดสอบจะน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 20 เป็นวงกลมทดสอบที่ใหญ่ที่สุดที่บรรจุภายในพื้นที่หน้าตัดสามเหลี่ยมมุมฉาก ดังนั้นวงกลมทดสอบคือวงกลมขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถบรรจุในพื้นที่หน้าตัดที่พิจารณาได้

ตารางที่ 6 แสดงความยาวประสิทธิผล(L_{eff}) ของรูปทรงปริมาตร 0.183 m^3 ซึ่งบอกถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสน้ำเกลือทั้งหมดต่อรัศมีวงกลมทดสอบที่มีรัศมีมากที่สุดที่สามารถบรรจุภายในพื้นที่หน้าตัดได้ พบว่าความยาวประสิทธิผลที่มากที่สุดคือปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับ 16.153 m และครึ่งทรงกลมน้อยที่สุดคือ 3.814 m



ภาพที่ 20 วงกลมทดสอบภายในพื้นที่หน้าตัดสามเหลี่ยมในรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม

ตารางที่ 7 แสดงความยาวประสิทธิภาพของรูปทรงปริมาตร 0.0915 m^3 ซึ่งบอกถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสน้ำเกลือทั้งหมดต่อรัศมีวงกลมทดสอบที่มีรัศมีมากที่สุดที่สามารถบรรจุภายในพื้นที่หน้าตัดได้ พบว่าความยาวประสิทธิภาพที่มากที่สุดคือปริซึมฐาน 3 เหลี่ยมเท่ากับ 14.748 m และครึ่งทรงกลมน้อยที่สุดคือ 3.104 m

ตารางที่ 6 ความยาวประสิทธิภาพของรูปทรงปริมาตร 0.183 m^3

รูปทรงวัตถุ (ปริมาตร 0.183 m^3)	รัศมีวงกลม ทดสอบ $R(\text{m})$	พื้นที่ผิวสัมผัส น้ำเกลือ $A_s (\text{m}^2)$	ความยาวประสิทธิภาพ $L_{\text{eff}}; A_s/R (\text{m})$
ปริซึมฐาน 3 เหลี่ยมมุมฉาก	0.160	2.42	15.125
ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมผืนผ้า	0.130	2.10	16.153
ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมจัตุรัส	0.194	2.03	10.463
ปริซึมฐาน 5 เหลี่ยม	0.199	1.94	9.748
ปริซึมฐาน 6 เหลี่ยม	0.208	1.90	9.134
ปริซึมฐาน 8 เหลี่ยม	0.212	1.87	8.820
ทรงกระบอก	0.220	1.82	8.272
ครึ่งทรงกลม	0.443	1.69	3.814

ตารางที่ 7 ความยาวประสิทธิผลของรูปทรงปริมาตร 0.0915 m^3

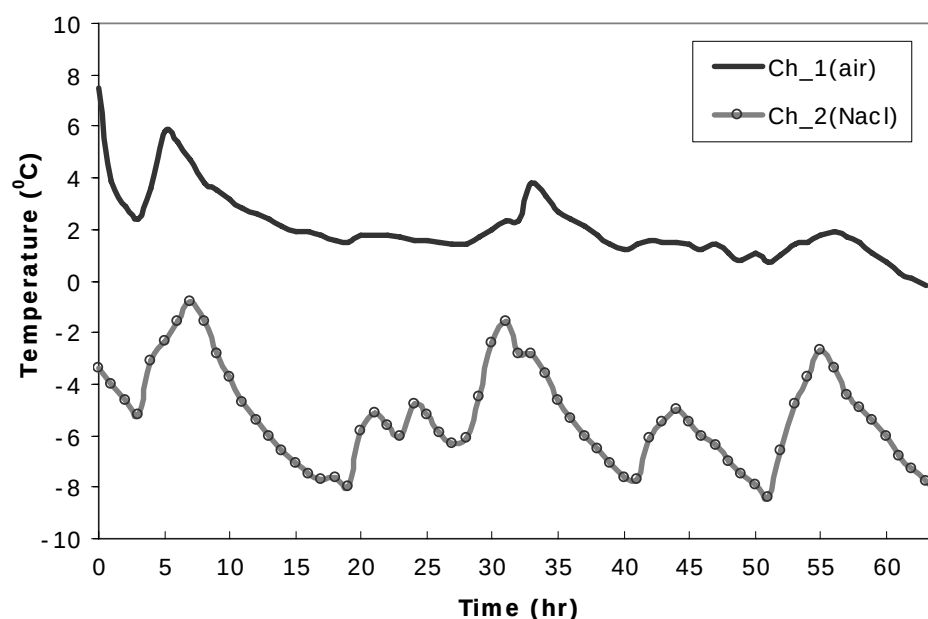
รูปทรงวัตถุ (ปริมาตร 0.0915 m^3)	รัศมีวงกลม ทดสอบ $R \text{ (m)}$	พื้นที่ผิวสัมผัส น้ำเกลือ $A_s \text{ (m}^2\text{)}$	ความยาวประสิทธิผล $L_{\text{eff}}; A_s/R \text{ (m)}$
ปริซึมฐาน 3 เหลี่ยมมุมฉาก	0.114	1.681	14.748
ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมผืนผ้า	0.100	1.474	14.740
ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมจัตุรัส	0.137	1.405	10.262
ปริซึมฐาน 5 เหลี่ยม	0.144	1.343	9.330
ปริซึมฐาน 6 เหลี่ยม	0.147	1.314	8.939
ปริซึมฐาน 8 เหลี่ยม	0.151	1.286	8.519
ทรงกระบอก	0.155	1.254	8.094
ครึ่งทรงกลม	0.352	1.092	3.104

ผลและวิจารณ์

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งผลออกเป็น 3 ส่วนซึ่งได้แก่ ผลการเก็บข้อมูลจากโรงงาน, ผลการจำลองด้วยโปรแกรม fluent และผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปน้ำแข็งซอง

1. ผลการทดลองจากโรงงาน

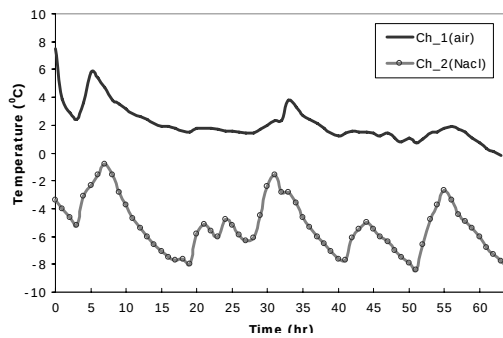
ผลการทดลองจากโรงงานเป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากโรงงานโดยตรง ซึ่งแสดงในรูปของอุณหภูมิกับเวลา ที่ตำแหน่งของจุดวัดทั้ง 10 ซึ่งแยกระหว่างอุณหภูมิอุณหภูมิขอบเขตและอุณหภูมิภายในของระบบ อุณหภูมิขอบเขตคือ จุดวัดที่ 1 (Ch 1) บันทึกอุณหภูมิอากาศบริเวณด้านบนของน้ำแข็ง และ จุดวัดที่ 2 (Ch 2) บันทึกอุณหภูมิน้ำเกลือ ดังแสดงในภาพที่ 21 ซึ่งเป็นสภาวะขอบเขตของปัญหาที่ทำการพิจารณา



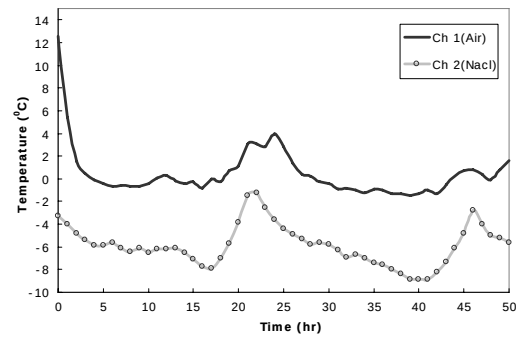
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่จุดวัดที่ 1 และ 2 ในการทดลองที่ 1

จากภาพที่ 21 พบว่าลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของจุดวัด 1 (Ch 1) จะมีเส้นกราฟเพิ่มและลดแบบไม่คงที่ โดยเส้นกราฟจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงที่ 3 และค่อนข้างคงที่ประมาณ 2°C ตลอดช่วงและจุดวัด 2 (Ch 2) มีลักษณะเส้นกราฟไม่คงที่คล้ายกับจุดวัดที่ 1 แต่มีการเพิ่มและลดตลอดเวลา ซึ่งรูปแบบดังกล่าวมีความใกล้เคียงกันทั้ง 6 การทดลองดังแสดงในภาพ

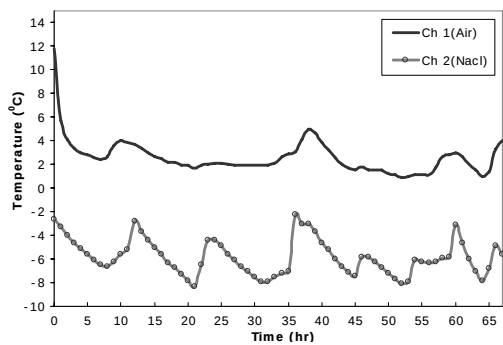
ที่ 22 ซึ่งพบว่าสภาวะการขึ้นรูปน้ำแข็งของมิถุนหภูมิขอบเขตไม่คงที่ ซึ่งเส้นกราฟแต่ละการทดลองมีรูปแบบไม่เหมือนกัน เนื่องจากตำแหน่งช่องที่ทำกรทดลองไม่ใช่จุดเดียวกัน



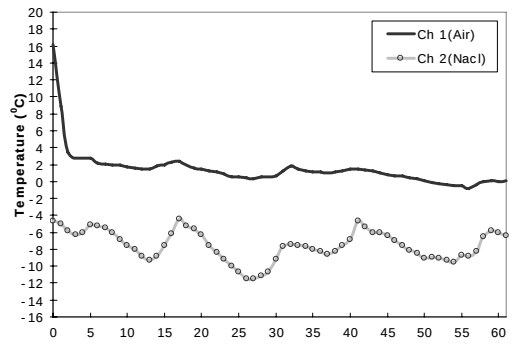
การทดลองที่ 1



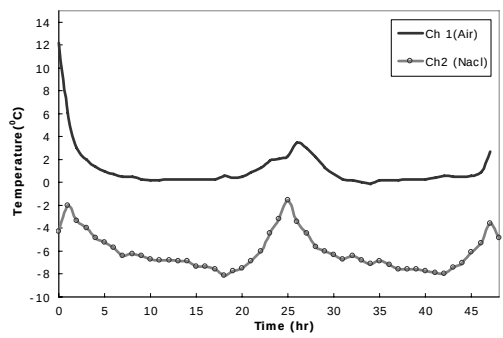
การทดลองที่ 4



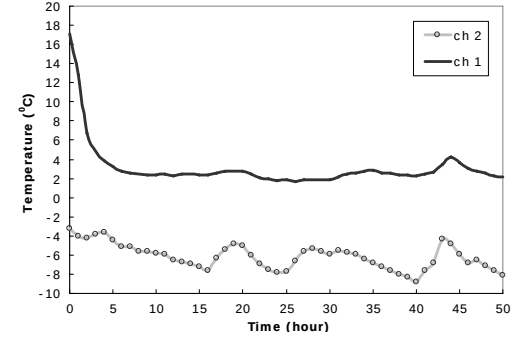
การทดลองที่ 2



การทดลองที่ 5

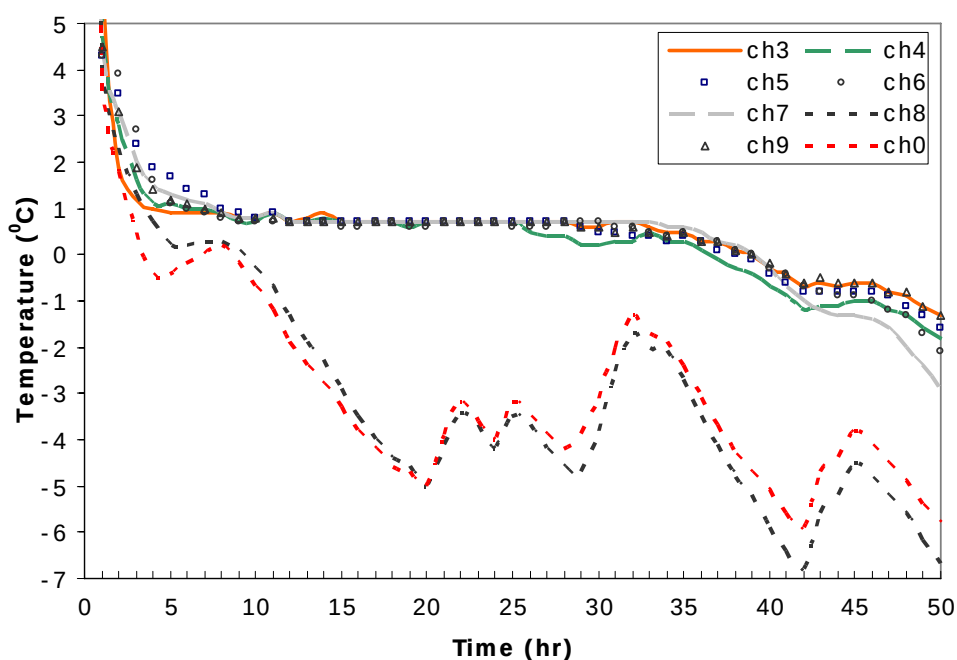


การทดลองที่ 3



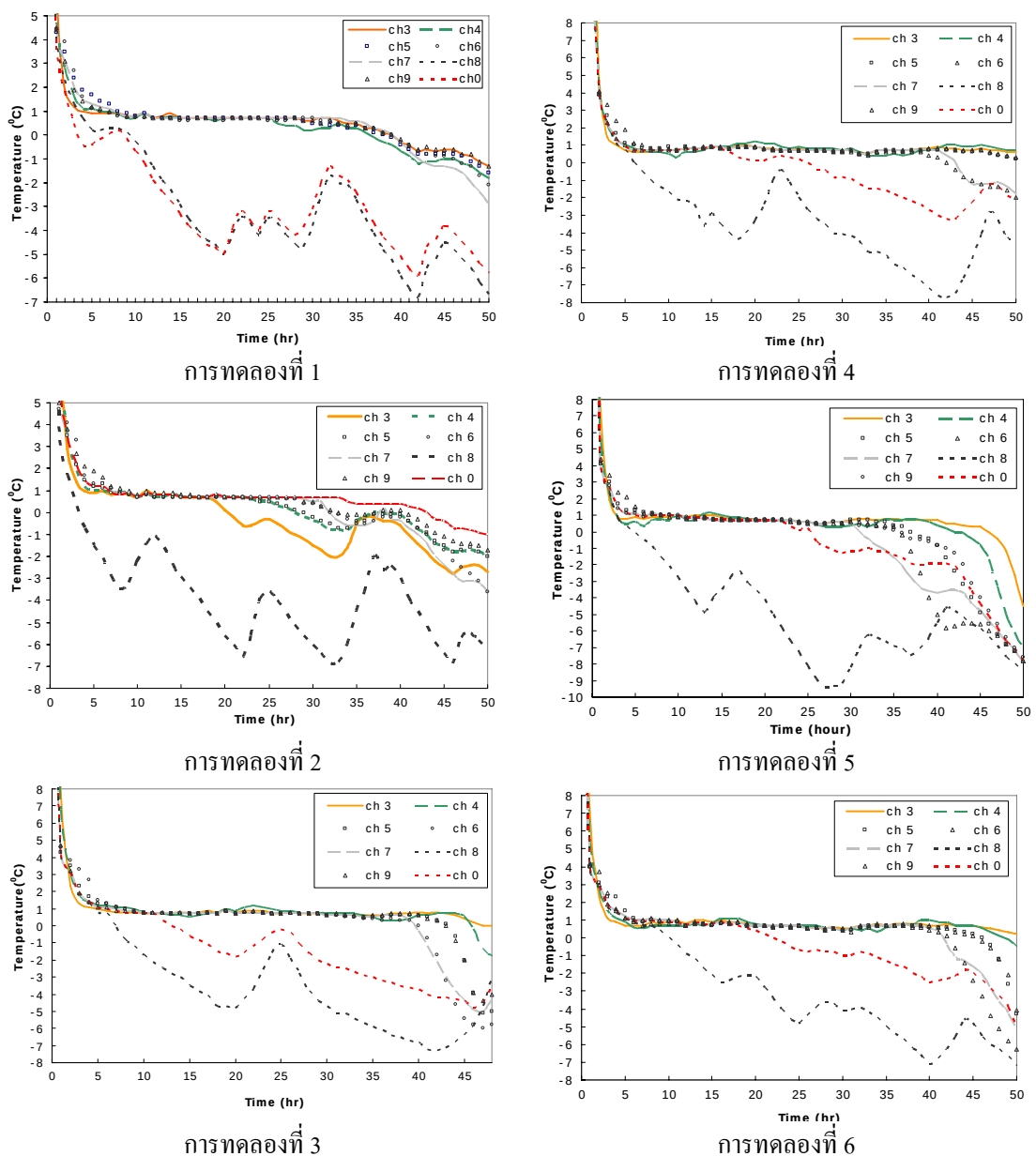
การทดลองที่ 6

ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขอบเขตกับเวลาของจุดวัดที่ 1 และ 2 ทั้ง 6 การทดลอง



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของจุดวัดภายในช่องน้ำแข็ง ในการทดลองที่ 1

จากภาพที่ 23 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) กับเวลา (hr) ของจุดวัดภายในช่องน้ำแข็ง ในการทดลองที่ 1 พบว่าเส้นกราฟอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรก และค่อนข้างคงที่ประมาณ 1°C ต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 30 แล้วจึงค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งลักษณะดังกล่าวปรากฏในช่องสัญญาณที่ 3, 4, 5, 6, 7, 9 ซึ่งเส้นกราฟลักษณะดังกล่าวจะมีความแตกต่างกับเส้นกราฟของจุดวัดที่ 8 และ 0 อย่างชัดเจน โดยในจุดวัดที่ 8 และ 0 จะมีลักษณะเส้นกราฟลดลงอย่างต่อเนื่องจากชั่วโมงแรกถึงชั่วโมงที่ 20 และมีการเพิ่มขึ้นและลดลงของเส้นกราฟแบบไม่คงที่ตลอดการผลิด ผลเนื่องมาจากตำแหน่งจุดวัดที่ 8 และ 0 มีตำแหน่งใกล้กับผนังช่องน้ำแข็งมากกว่าจุดวัดอื่นๆ โดยจุดวัดที่ 8 ห่างจากผนังช่องน้ำแข็ง 2 cm และ จุดวัดที่ 0 ห่างจากผนังช่องประมาณ 1.5 cm จึงได้รับผลกระทบจากสภาวะขอบเขตโดยตรง สังเกตได้จากลักษณะเส้นกราฟอุณหภูมิของจุดวัดที่ 8 และจุดวัดที่ 0 คล้ายกับอุณหภูมิน้ำเกลือในภาพที่ 21



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาจากการเก็บข้อมูลจากโรงงานที่ตำแหน่ง
ช่องสัญญาณภายในช่องน้ำแข็ง

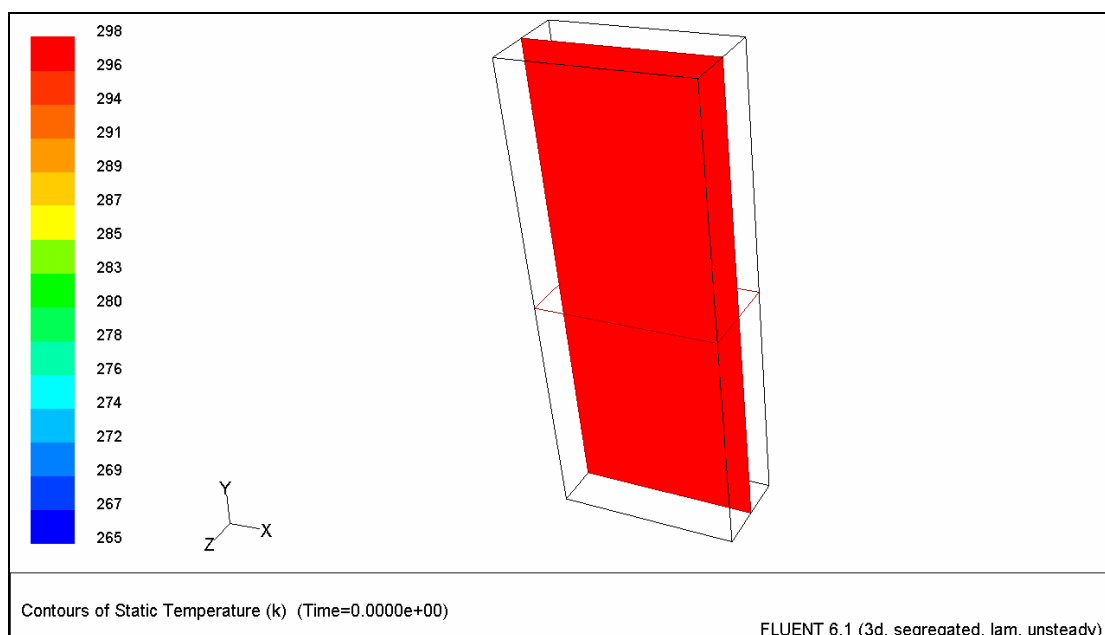
จากภาพที่ 24 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ตำแหน่งจุดวัดภายในช่องน้ำแข็ง
ทั้ง 8 จุด พบว่าเส้นกราฟจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้ง 6 การทดลอง ซึ่งเส้นกราฟอุณหภูมิของจุดวัด
ที่ 3, 4, 5, 6, 7, 9 จะมีลักษณะเดียวกันและจะแตกต่างกับเส้นกราฟอุณหภูมิของจุดที่ 8 และ 0 ที่มี
เส้นอุณหภูมิเพิ่มและลดไม่คงที่ตลอดการทดลอง

2. ผลการจำลองด้วยโปรแกรม fluent

ในการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent ทำการจำลองสถานะการขึ้นรูปน้ำแข็งของที่มีปริมาตร 0.183 m^3 และมีพื้นที่สัมผัสอากาศ 0.151 m^2 ในการจำลองได้กำหนดสภาวะขอบเขตคือ อุณหภูมิ น้ำเกลือกับอุณหภูมิอากาศเป็นแบบค่าเฉลี่ยเนื่องจากเส้นอุณหภูมิไม่คงที่และไม่มีรูปแบบเฉพาะ โดยคุณสมบัติที่ใช้ในการจำลองการทดลองที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 8 ซึ่งผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม fluent จะถูกแสดงในรูป Contour ของอุณหภูมิเทียบกับเวลาในระนาบ xy

ตารางที่ 8 แสดงสภาวะที่กำหนดใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent ของการทดลองที่ 1

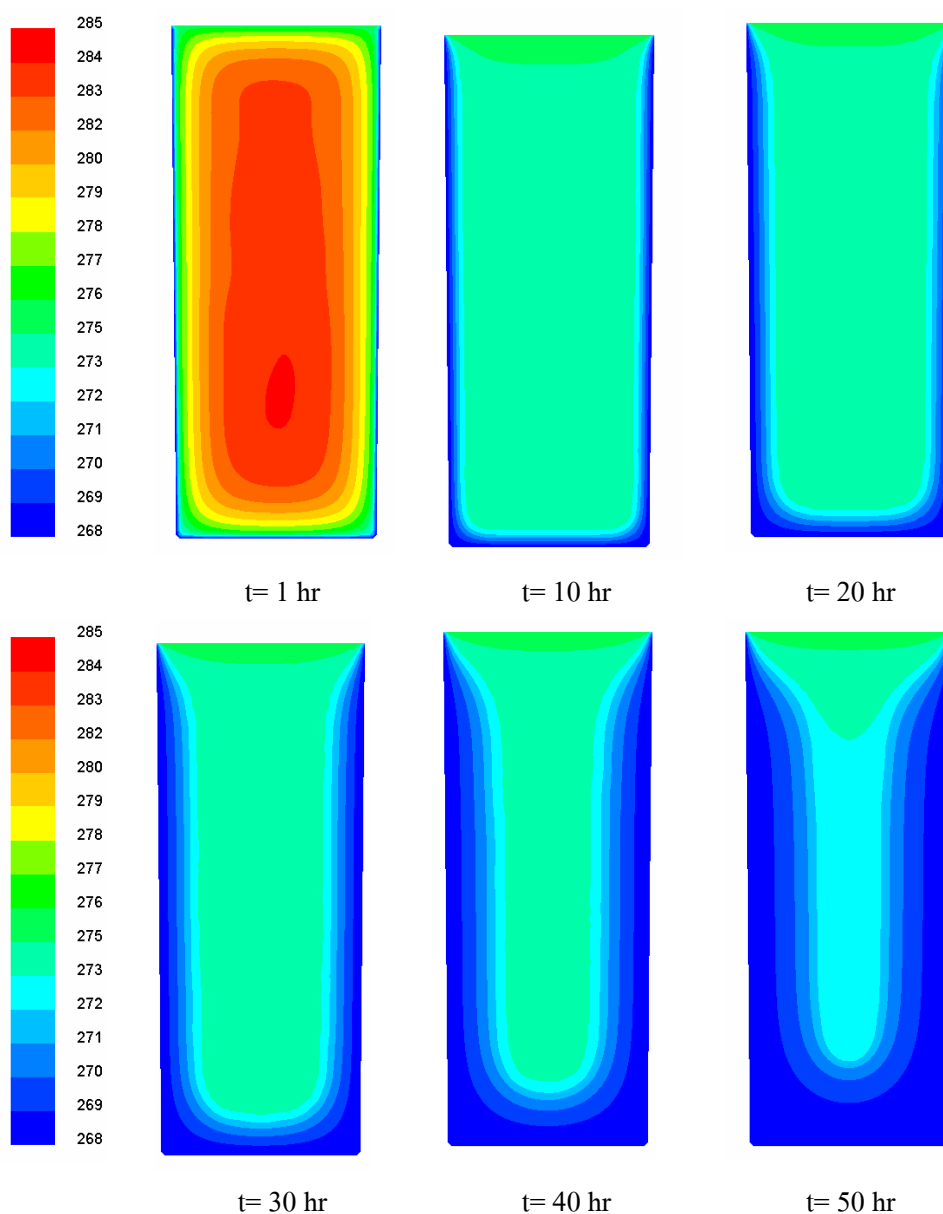
Material Properties	Water Conditions Using in Fluent Program
Initial Temperature	298 k
Nacl Temperature	Wall Temperature Constant 267.7 k
Air Temperature	Wall Temperature Constant 275.04 k
Grid size	0.5 cm
Time Step Size	1 s
Melting Heat	334 kJ/kg
Viscosity	Constant 0.001003 kg/ms
Molecular Weight	Constant 18.0152 kg/kgmol
Solidus Temperature	273 k
Liquidus Temperature	274 k
Thermal Conductivity	Piecewise-Polynomial $y = 4\text{E-}05x^2 + 0.0079x + 0.5582$ (Liquidus) $y = -2\text{E-}07x^2 - 0.0588x + 2.7619$ (Solidus)
Cp	Piecewise-Polynomial $y = 0.0018x^4 - 0.1337x^3 + 2.6766x^2 - 20.834x + 4231.8$ (Liquidus) $y = 0.0423x^3 - 0.6339x^2 + 55.808x + 1618.5$ (Solidus)
Density	Piecewise-Polynomial $y = -0.0001x^4 + 0.0082x^3 - 0.2629x^2 + 0.8758x + 999.09$ (Liquidus) $y = -0.0001x^4 - 0.0017x^3 + 0.0443x^2 - 0.6884x + 924.39$ (Solidus)



ภาพที่ 25 ระนาบ xy ที่ใช้ในการพิจารณาในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent

ภาพที่ 25 แสดงระนาบที่ใช้ในการพิจารณาในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม fluent ที่กำหนดสถานะขอบเขตอุณหภูมิน้ำเกลือ 267.7 k และอุณหภูมิอากาศ 275.04 k ซึ่งระนาบ xy จะแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่กระจายบนระนาบในลักษณะแถบสีของอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่พิจารณา โดยผลจะแสดงผลในชั่วโมงที่ และเพิ่มเวลาทุก 10 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เกิดจากเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป และแสดงผลของความสัมพัทธ์ระหว่าง Liquid fraction กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อพิจารณาสถานะสาร ในระนาบ xy

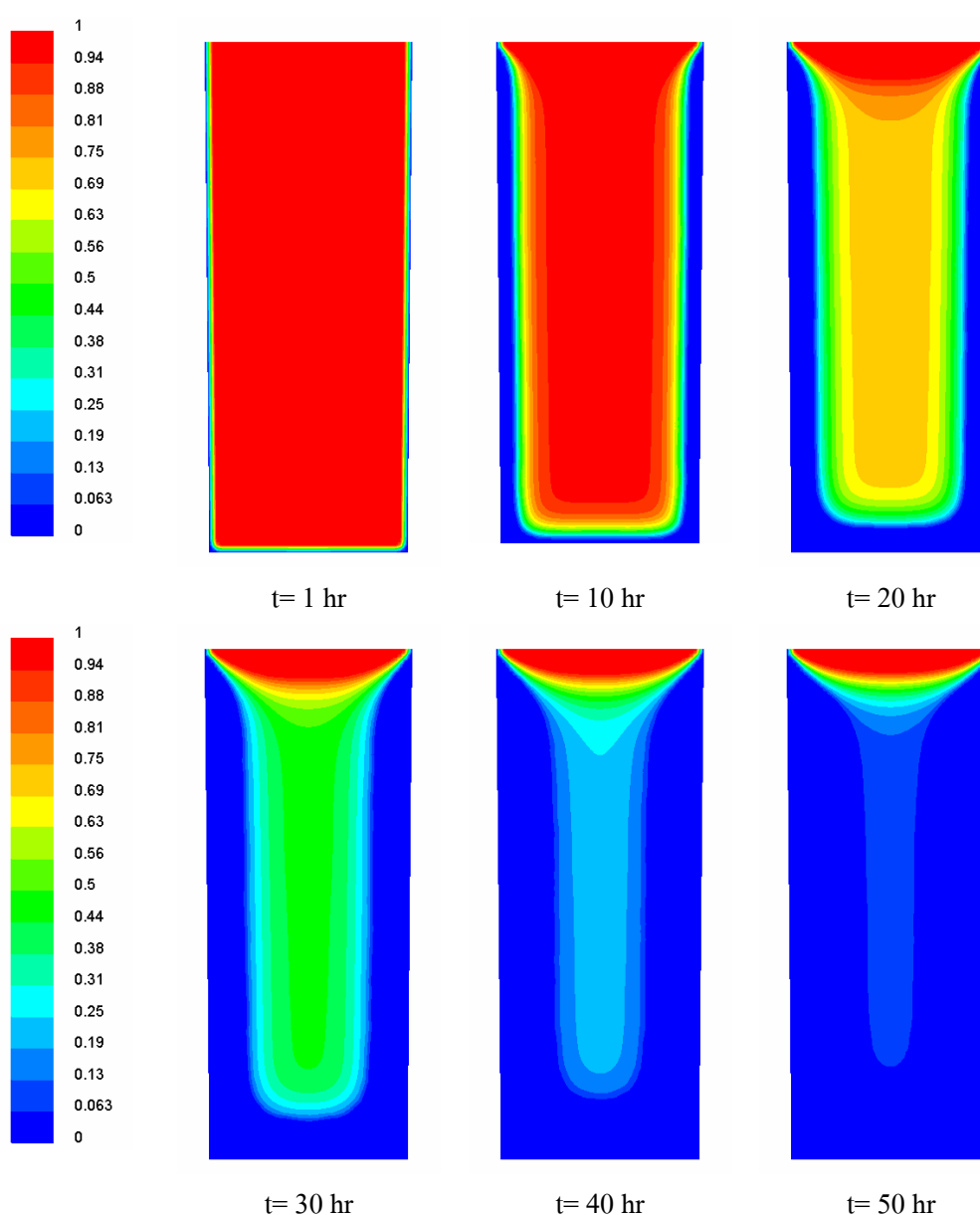
โดยระนาบ xy มีความยาวในแกน $x = 52$ cm และความยาวในแกน $y = 130$ cm ดังนั้นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะสัมพันธ์กับระยะทางในแนวแกน x และแกน y โดยตำแหน่ง $y = 130$ cm เป็นตำแหน่งบนสุดของระนาบ xy ที่เป็นตำแหน่งที่สัมผัสกับอุณหภูมิอากาศ และผนังโดยรอบจะเป็นบริเวณที่สัมผัสกับอุณหภูมิน้ำเกลือ



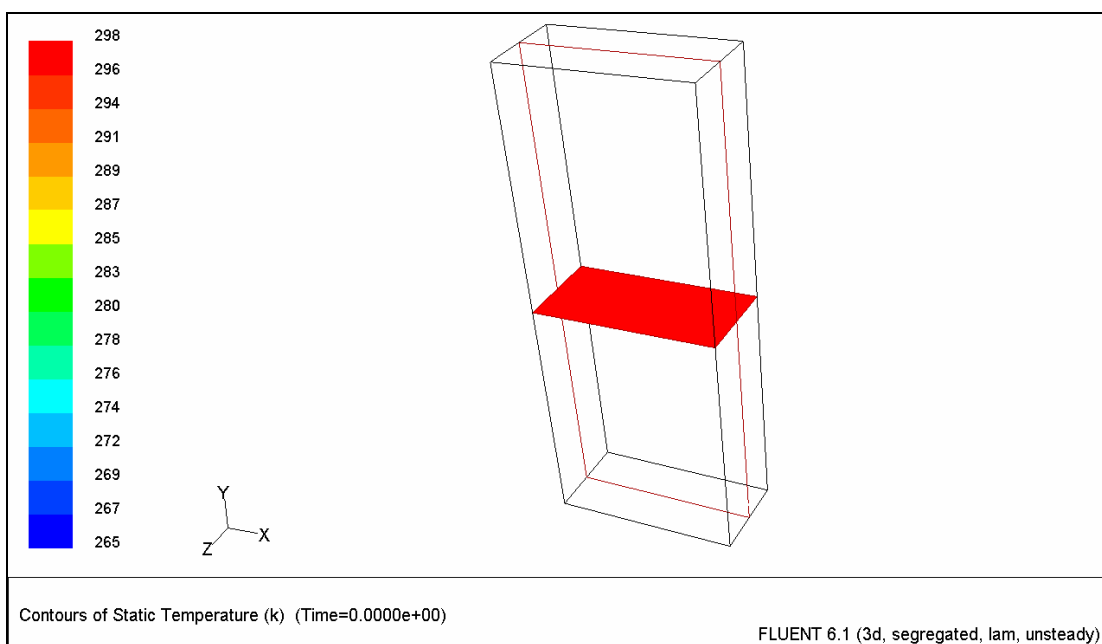
ภาพที่ 26 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลา ของระนาบ xy จากการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม fluent

จากภาพที่ 26 พบว่าอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงที่ 1 โดยเริ่มจากตำแหน่งใกล้ผนัง ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 5°C และอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางเข้าสู่จุดกึ่งกลางระนาบ เมื่อพิจารณาเวลาที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะมีค่าลดลง บริเวณเปลี่ยนสถานะ(mushy zone) บริเวณกึ่งกลางระนาบเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นบริเวณเปลี่ยนสถานะจะลดลง โดยที่ตำแหน่งสูงสุดในแกน y มีอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งลักษณะดังกล่าวคล้ายกับภาพที่ 27 กราฟแสดงอัตราส่วนของเหลว (β) กับเวลา ซึ่งพบว่าในช่วง 1 ชั่วโมงที่ 1 อัตราส่วนของเหลว = 1 ซึ่งแสดงว่ามีสถานะของเหลว และอัตราส่วนของเหลว

จะลดลงตามระยะทางเพิ่มขึ้นเข้าสู่จุดกึ่งกลางในแกน x โดยอัตราส่วนของเหลวในบริเวณใกล้เคียงจะมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาที่ 10 ในสถานะของแข็ง เมื่อพิจารณาเวลาที่เพิ่มขึ้นบริเวณของแข็งจะขยายตัวมากขึ้นโดยมีทิศทางเข้าสู่กึ่งกลางระนาบ ซึ่งในช่วงเวลาที่ 50 จะอยู่ในสถานะของแข็งทั้งหมด โดยเหลือสถานะของเหลวบริเวณใกล้เคียงผนังด้านบนที่มีอัตราส่วนของเหลว = 1



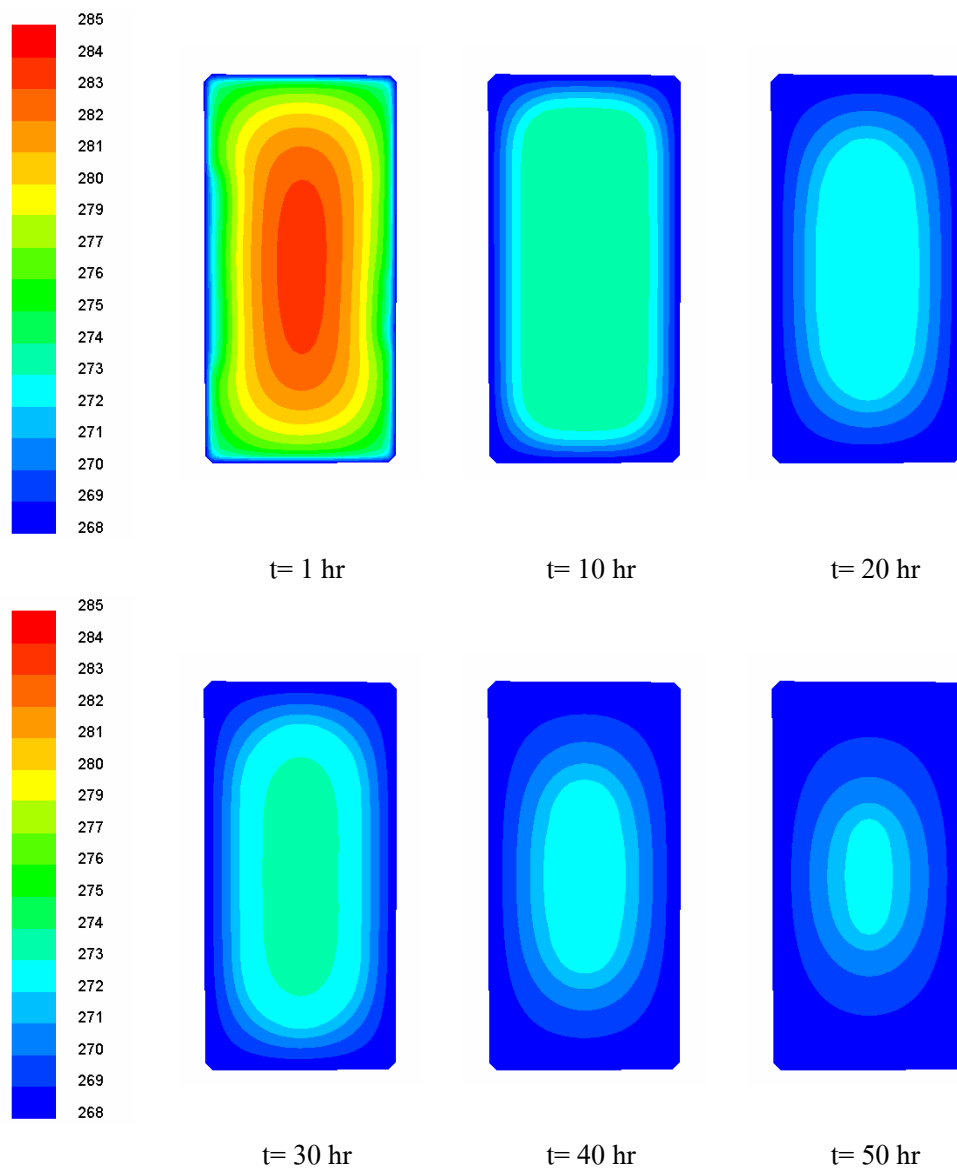
ภาพที่ 27 กราฟแสดงอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลาของระนาบ xy จากการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม fluent



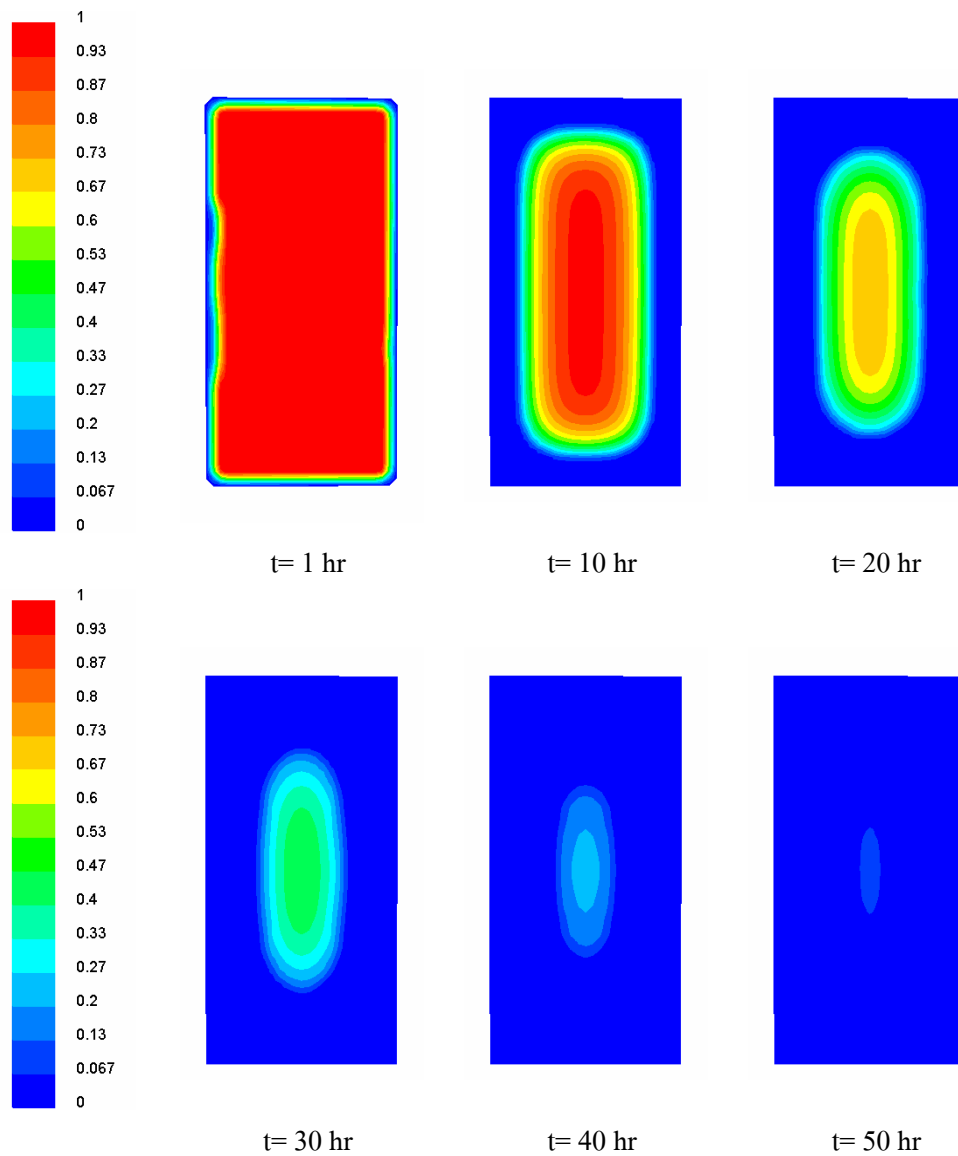
ภาพที่ 28 ระนาบ xy ที่ใช้ในการพิจารณาในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent

ภาพที่ 28 แสดงระนาบ xz ที่ความสูง $y = 65$ cm โดยมีความยาวแกน $x = 52$ cm และความยาวแกน $z = 26$ cm ซึ่งผลที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา และกราฟแสดงอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลาในการจำลองการทดลองที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 29 และ 30 ตามลำดับ

จากภาพที่ 29 พบว่าอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ 1 โดยเริ่มที่ตำแหน่งใกล้ผนังที่อุณหภูมิ 5°C และอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางเข้าสู่จุดกึ่งกลางในแกน x และ z เมื่อพิจารณาเวลาที่เพิ่มขึ้นพบว่าอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยบริเวณเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิประมาณ 1°C บริเวณกึ่งกลางระนาบ xz และชั้นของแข็งในบริเวณชิดผนังจะขยายเพิ่มขึ้นโดยมีทิศทางเข้าสู่กึ่งกลางระนาบ ซึ่งลักษณะดังกล่าวคล้ายกับกราฟแสดงอัตราส่วนของเหลว ดังแสดงในภาพที่ 30 ซึ่งในช่วงที่ 1 อัตราส่วนของเหลว = 1 ซึ่งแสดงว่า มีสถานะของเหลวในช่วงที่ 1 เมื่อพิจารณาจากเวลาที่เพิ่มขึ้นบริเวณของแข็งจะขยายตัวเพิ่มขึ้นโดยมีทิศทางเข้าสู่กึ่งกลางระนาบ ซึ่งในช่วงที่ 50 จะอยู่ในสถานะของแข็งทั้งหมด โดยบริเวณกึ่งกลางซึ่งเป็นบริเวณเปลี่ยนสถานะแข็งตัวช้าที่สุด

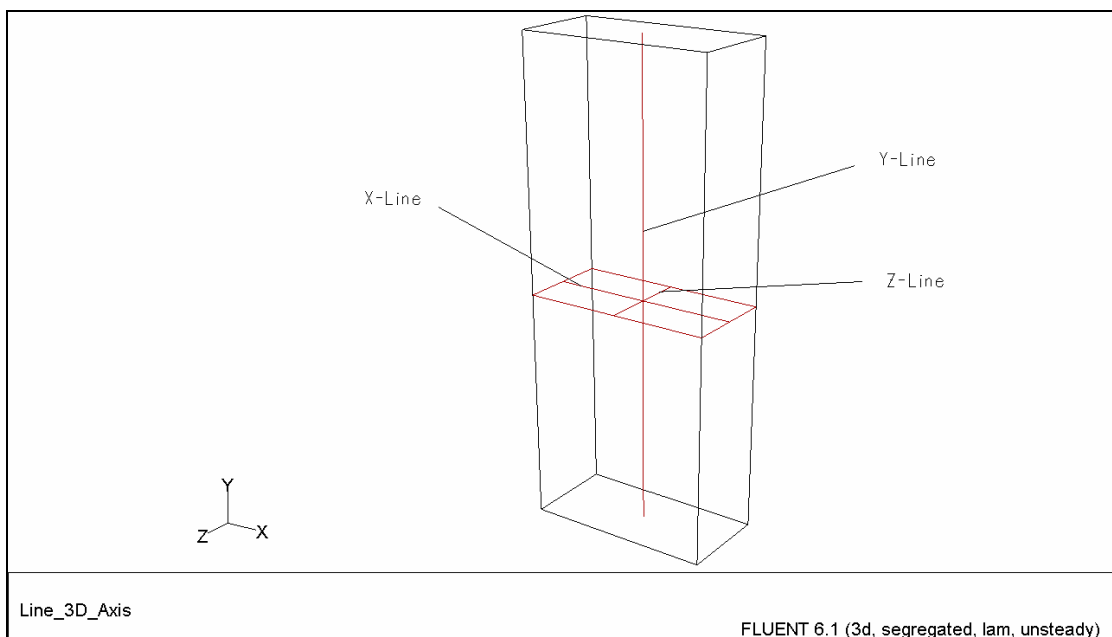


ภาพที่ 29 กราฟแสดงอุณหภูมิ เทียบกับเวลา ในระนาบ xz ของการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent

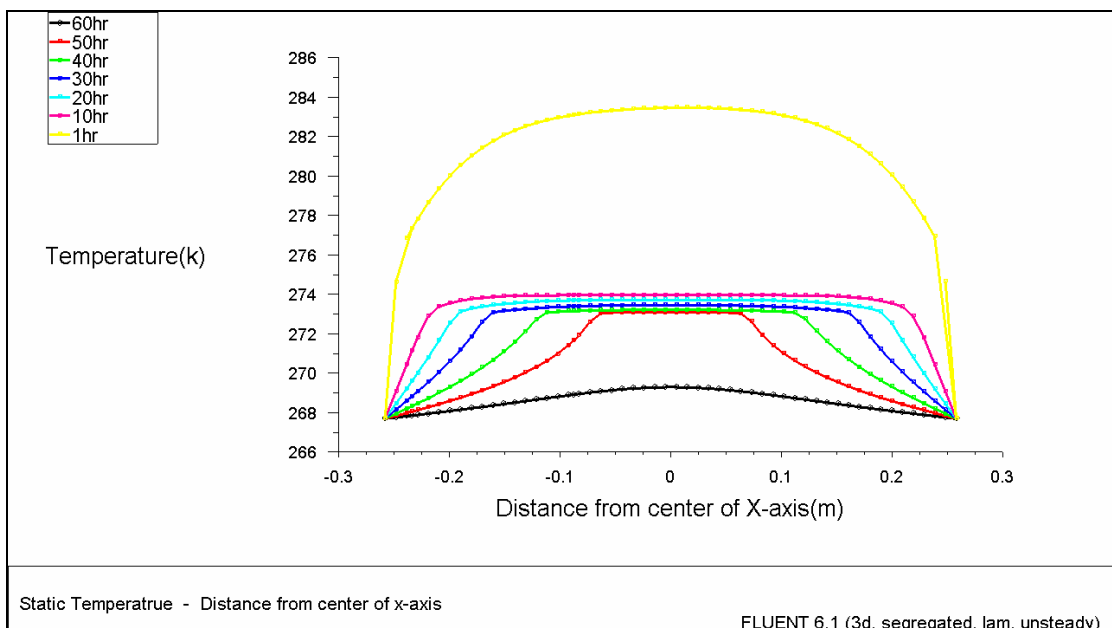


ภาพที่ 30 กราฟแสดงอัตราส่วนของเหลว ของระนาบ xz เทียบกับเวลา (hr) ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent จะถูกนำมาพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับระยะทางในแนวแกน x แกน y และแกน z ตามลำดับ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิตกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในภาพที่ 31



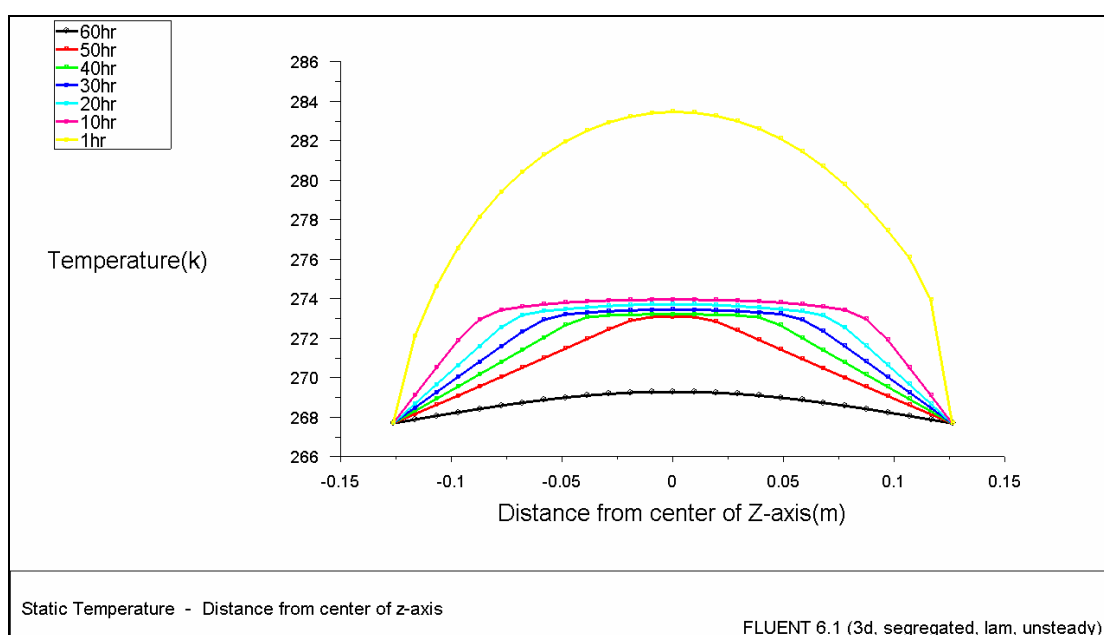
ภาพที่ 31 เส้นบอกระยะทางในแนวแกน x, y, z ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน x ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent

จากภาพที่ 32 พบว่าที่ $x=0$ m เป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงที่สุด และที่ระยะ $x=0.26$ m กับ $x=-0.26$ m จะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดเมื่อพิจารณาที่เวลาเดียวกัน โดยเวลาจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ เมื่อ

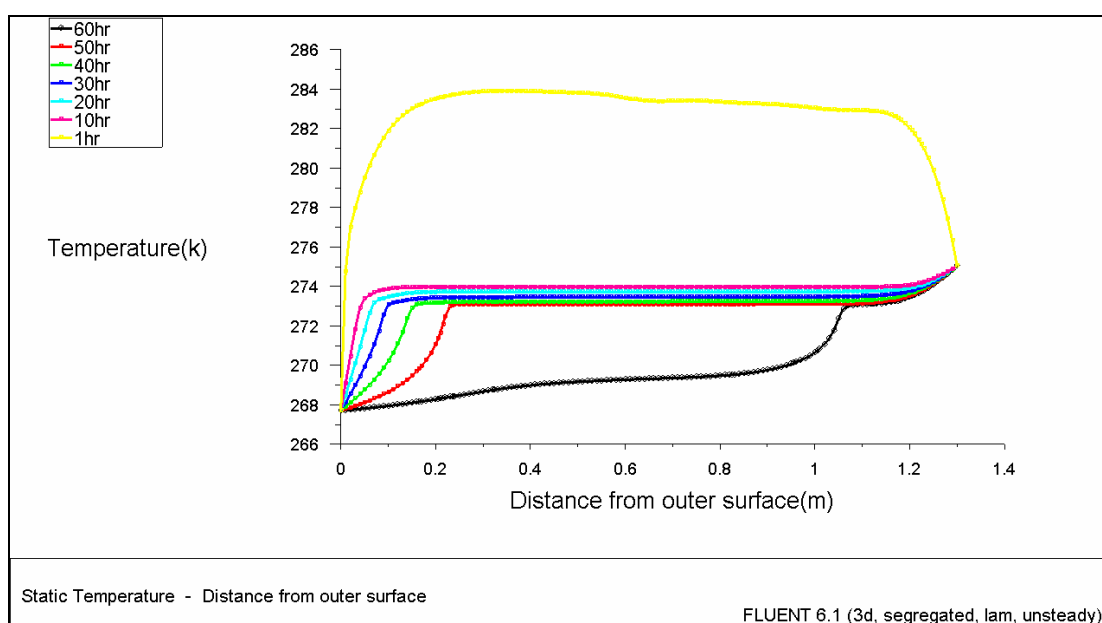
เวลาเพิ่มมากขึ้นอุณหภูมิจะลดลง โดยบริเวณเปลี่ยนสถานะจะอยู่กึ่งกลางที่อุณหภูมิประมาณ 1°C เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น พบว่าความยาวของช่วงบริเวณเปลี่ยนสถานะจะลดลง ซึ่งแสดงว่าบริเวณของผสมได้เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งมากขึ้น ที่เวลา 30 hr พบว่า ระยะบริเวณเปลี่ยนสถานะ ที่ $x=-0.16\text{ m}$ ถึง $x=-0.16\text{ m}$ และที่เวลา 40 hr มีระยะบริเวณเปลี่ยนสถานะ จาก $x=-0.12\text{ m}$ ถึง $x=-0.12\text{ m}$ ซึ่งระยะทางลดลง 0.08 m ดังนั้นกล่าวได้ว่าเวลาจะแปรผกผันกับขนาดบริเวณเปลี่ยนสถานะและที่ตำแหน่ง $x=0\text{ m}$ จะเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิลดช้าที่สุด



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน z ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent

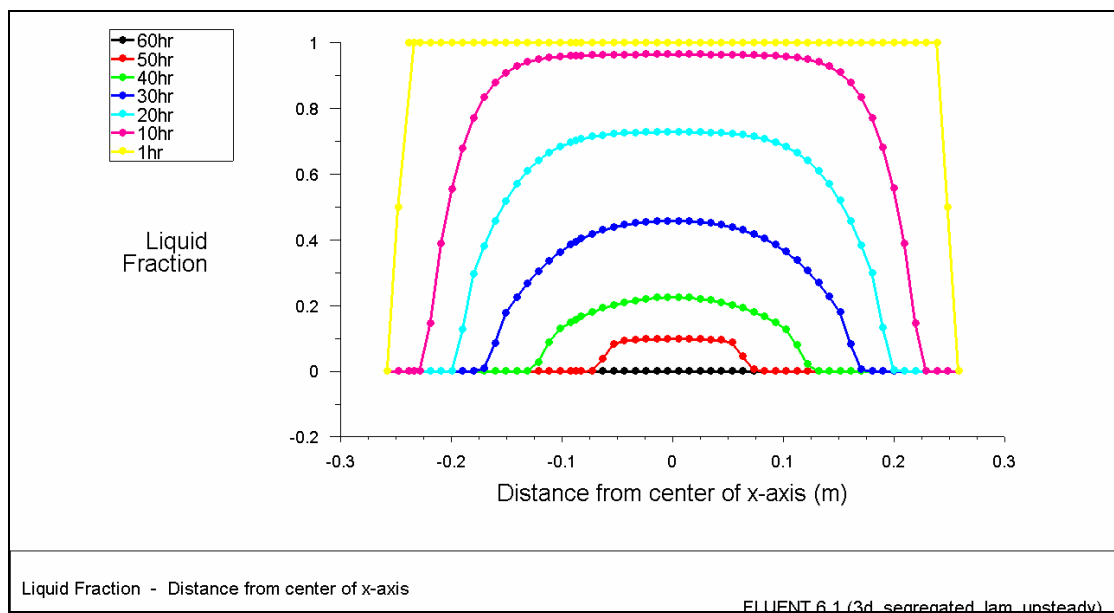
จากภาพที่ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียบกับระยะทางในแกน z พบว่ามีลักษณะเส้นกราฟคล้ายกับภาพที่ 32 แต่มีบริเวณเปลี่ยนสถานะสั้นกว่าเมื่อเทียบกับเวลาเดียวกัน โดยขนาดบริเวณเปลี่ยนสถานะจะลดลงเป็นสัดส่วนผกผันกับเวลาที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบแกน x ในภาพที่ 32 พบว่าช่วงบริเวณเปลี่ยนสถานะของแกน z สั้นกว่าแกน x โดยที่เวลา 30 hr ในแกน x มีระยะทางจาก $x=-0.16\text{ m}$ ถึง $x=-0.16\text{ m}$ และที่แกน z มีระยะทาง -0.06 m ถึง 0.06 m มีช่วงบริเวณเปลี่ยนสถานะสั้นกว่า 0.2 m โดยระยะทางจากผนังขอบมีความยาวประมาณ 0.52 m ในแกน x และมีความยาวประมาณ 0.26 m ในแกน z ดังนั้นกล่าวได้ว่าช่วงบริเวณเปลี่ยนสถานะแปรผกผันตรงกับความยาวแกน

ในภาพที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแกน y ซึ่งเป็นระยะทางจากพื้นของน้ำแข็งจนถึงตำแหน่งบนสุดในแนวตั้ง ที่ความสูงประมาณ 1.3 m พบว่าลักษณะเส้นกราฟชั่วโม่งที่ 1 เพิ่มขึ้นจาก $y = 0$ m ถึง $y = 0.2$ m และคงที่ต่อเนื่องจนถึงระยะ $y = 1.2$ แล้วจึงลดลงที่อุณหภูมิประมาณ 1°C ในชั่วโม่งที่ 10 ถึง 50 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นและคงที่ในช่วงกลางแกน y ที่อุณหภูมิประมาณ 1°C ซึ่งเป็นบริเวณเปลี่ยนสถานะและเส้นกราฟจะเพิ่มขึ้นที่ระยะ $y = 1.2$ m จากกราฟเห็นว่าระยะของบริเวณเปลี่ยนสถานะในแกน y จะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

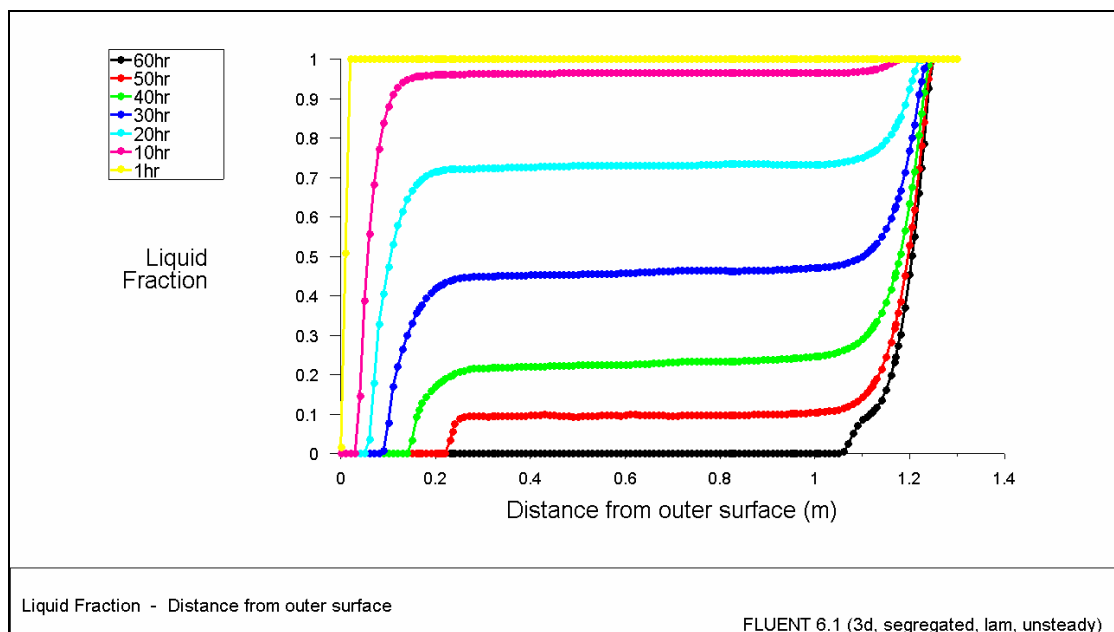


ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent

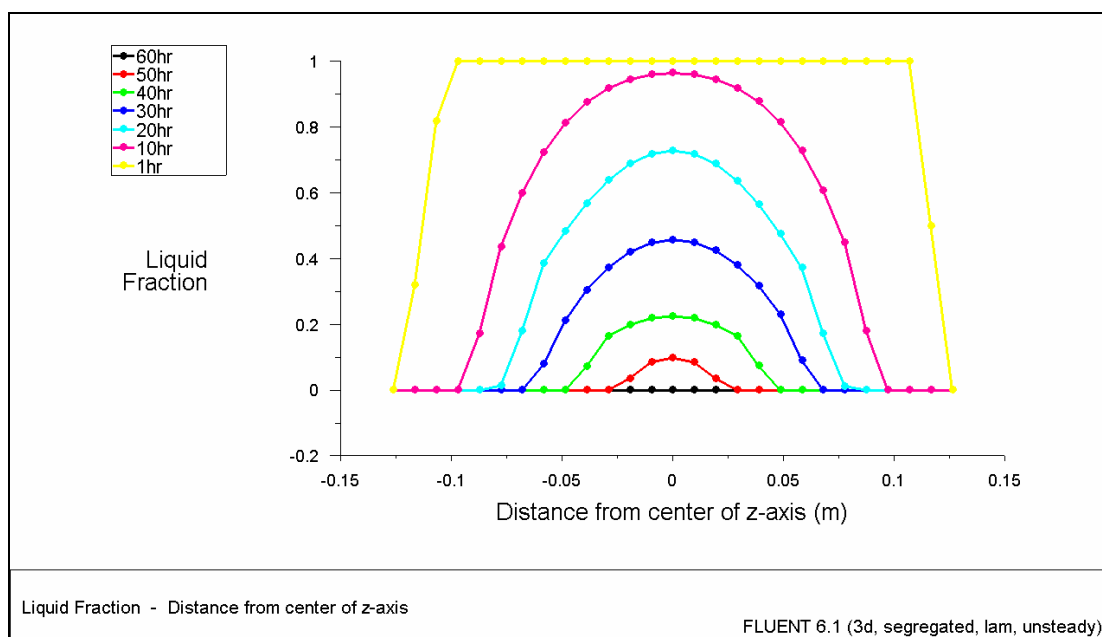
โดยภาพที่ 35 แสดงค่าอัตราส่วนของเหลวเทียบกับระยะทางในแกน x พบว่าเส้นกราฟอัตราส่วนของเหลวลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยในแกน x จะมีอัตราส่วนของเหลว=0 ในบริเวณชิดผนังและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นในทิศทางเข้าสู่ $x=0$ ซึ่งที่เวลา 30 hr จะมีค่าอัตราส่วนของเหลวประมาณ 0.5 บริเวณเปลี่ยนสถานะ แสดงว่าปริมาณของแข็งเท่ากับปริมาณของเหลวและเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของเหลวจะลดลง



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับระยะทางในแนวแกน x ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent



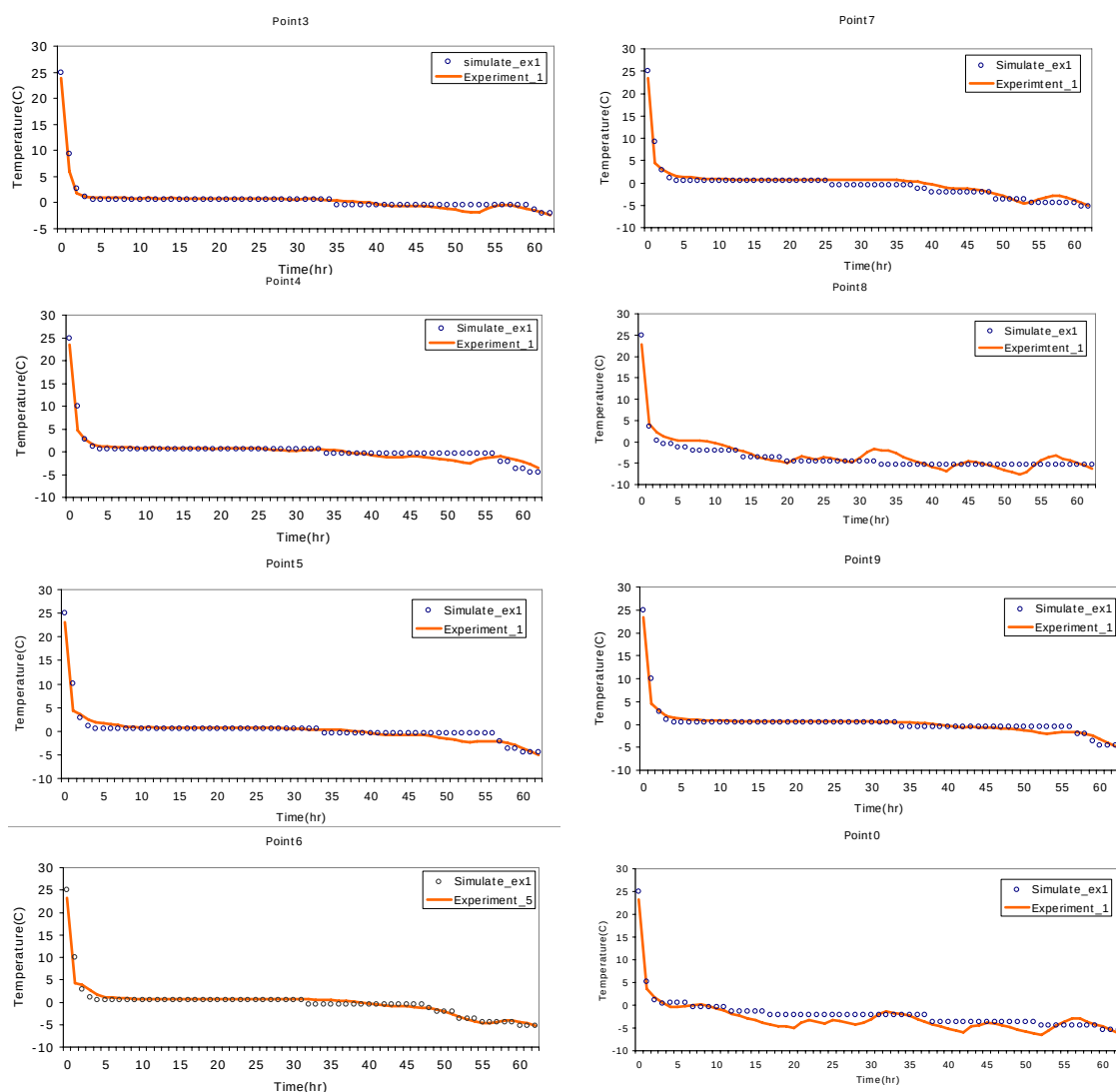
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับระยะทางในแนวแกน y ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับระยะทางในแนวแกน z ในการจำลองการทดลองที่ 1 ด้วยโปรแกรม Fluent

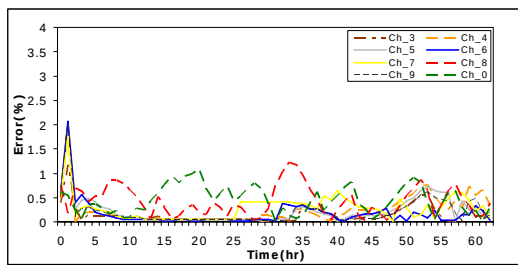
จากภาพที่ 36 และ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับระยะทางในแกน y และ z ตามลำดับ ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของเหลวจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยที่ $y = 130 \text{ cm}$ และ $z = 0 \text{ cm}$ จะเป็นจุดที่มีค่าสูงสุดที่เวลาเดียวกัน ซึ่งที่เวลา 60 hr พบว่าในแกน y และ z มีค่าอัตราส่วนของเหลว = 0 ซึ่งอยู่ในสถานะของแข็งทั้งหมด

จากภาพที่ 38 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิผลการทดลองกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม fluent ในจุดวัดภายใน 8 จุด ซึ่งพบว่าอุณหภูมิจุดวัดมีลักษณะเส้นอุณหภูมิต่อเวลาใกล้เคียงกัน โดยความแตกต่างของอุณหภูมิจะพบมากที่สุดที่จุด 8 และจุด 0 เนื่องจากโปรแกรมจำลองได้กำหนดสภาวะขอบเขตเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ซึ่งแตกต่างกับสภาวะจริงที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขอบเขต ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลองจะมีอุณหภูมิคงที่และต่อเนื่องกว่าผลจากการทดลอง จากภาพที่ 38 พบว่า จุดวัดที่ 8 และจุดวัดที่ 0 จะแสดงความแตกต่างของเส้นอุณหภูมิต่อเวลามากที่สุด เนื่องจากจุดวัดที่ 8 และ จุดวัดที่ 0 มีระยะใกล้กับผนังที่สุด โดยจุดวัดที่ 8 มีระยะห่าง 1.5 cm และจุดวัดที่ 0 มีระยะห่าง 2 cm

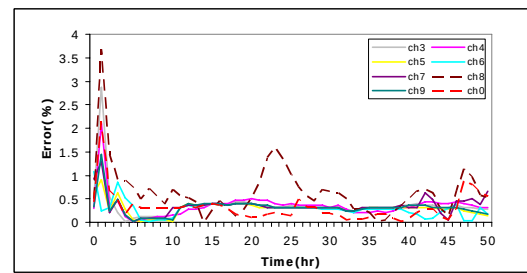


ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการทดลองที่ 1 เทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent

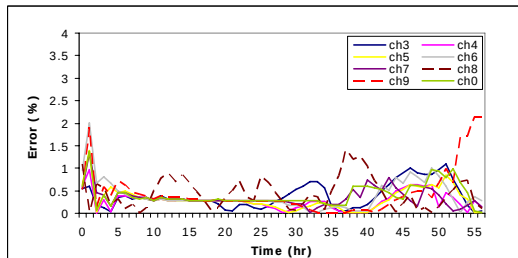
จากภาพที่ 39 ค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลาระหว่างผลการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent เทียบกับผลการทดลองทั้ง 6 การทดลอง ซึ่งความคลาดเคลื่อนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent ซึ่งพบว่าการทดลองที่ 4 มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดประมาณ 3.7 % และความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยใน 6 การทดลองมีค่าประมาณ 1 %



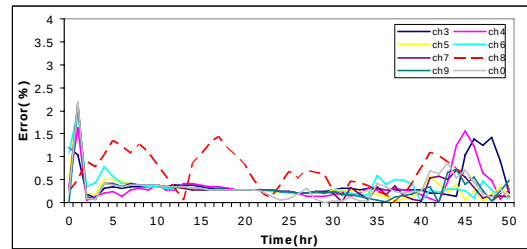
การทดลองที่ 1



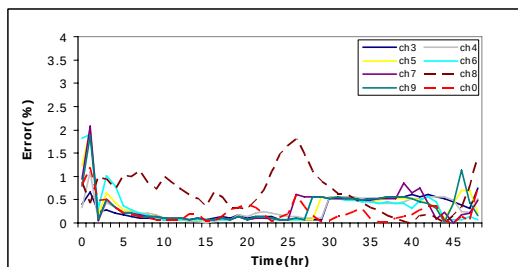
การทดลองที่ 4



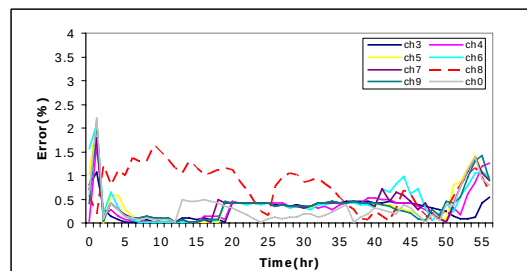
การทดลองที่ 2



การทดลองที่ 5



การทดลองที่ 3



การทดลองที่ 6

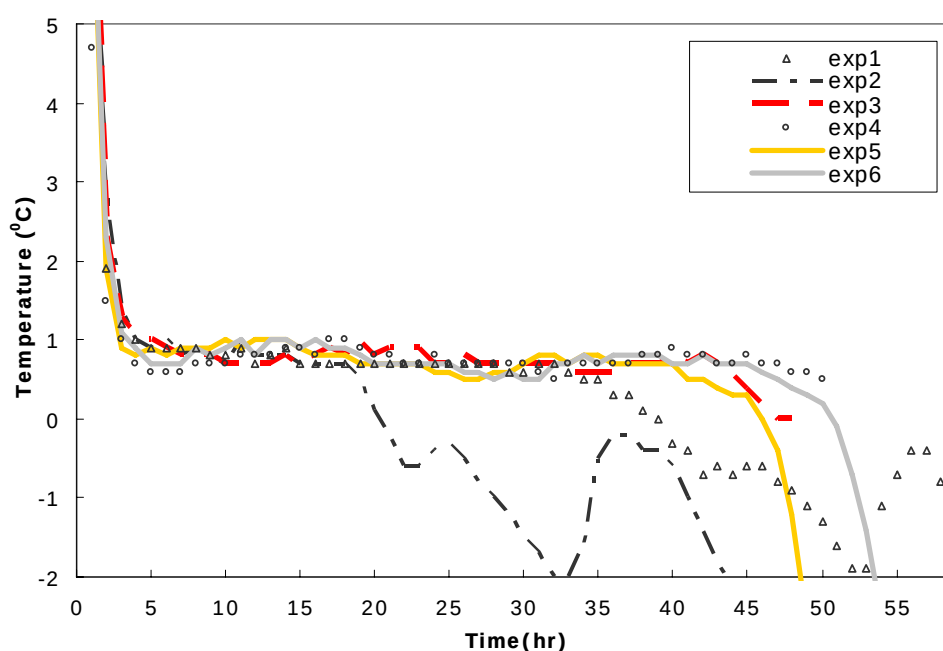
ภาพที่ 39 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลาระหว่างผลการจำลองด้วยโปรแกรม fluent
เทียบกับผลการทดลองทั้ง 6 การทดลอง

จากภาพที่ 39 ที่แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองเทียบกับผลการจำลองด้วย
โปรแกรม fluent พบว่าผลการเปรียบเทียบมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกัน โดยผลการจำลองด้วย
โปรแกรม fluent สามารถอธิบายสภาวะการเปลี่ยนแปลงในน้ำแข็งช่องได้ใกล้เคียงกับผลการ
ทดลองจริง ดังนั้นรูปแบบการจำลองนี้จะถูกนำมากำหนดเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูป
น้ำแข็งช่องต่อไป

3. ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปน้ำแข็งของ

3.1 กรณีศึกษาปัจจัยจากสภาวะอุณหภูมิขอบเขต

ผลการเก็บข้อมูลจากโรงงานทั้ง 6 พบว่าสภาวะขอบเขตมีความแตกต่างกัน ซึ่งมีผลให้เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งแตกต่างกันไปด้วย เมื่อพิจารณาที่จุดวัดที่ 3 (Ch 3) ซึ่งเป็นจุดวัดบนสุดในแกน y โดยมีความสูง 1.1 m พบว่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะของแข็งต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 39



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของช่องสัญญาณที่ 3 แยกตามการทดลองทั้ง 6

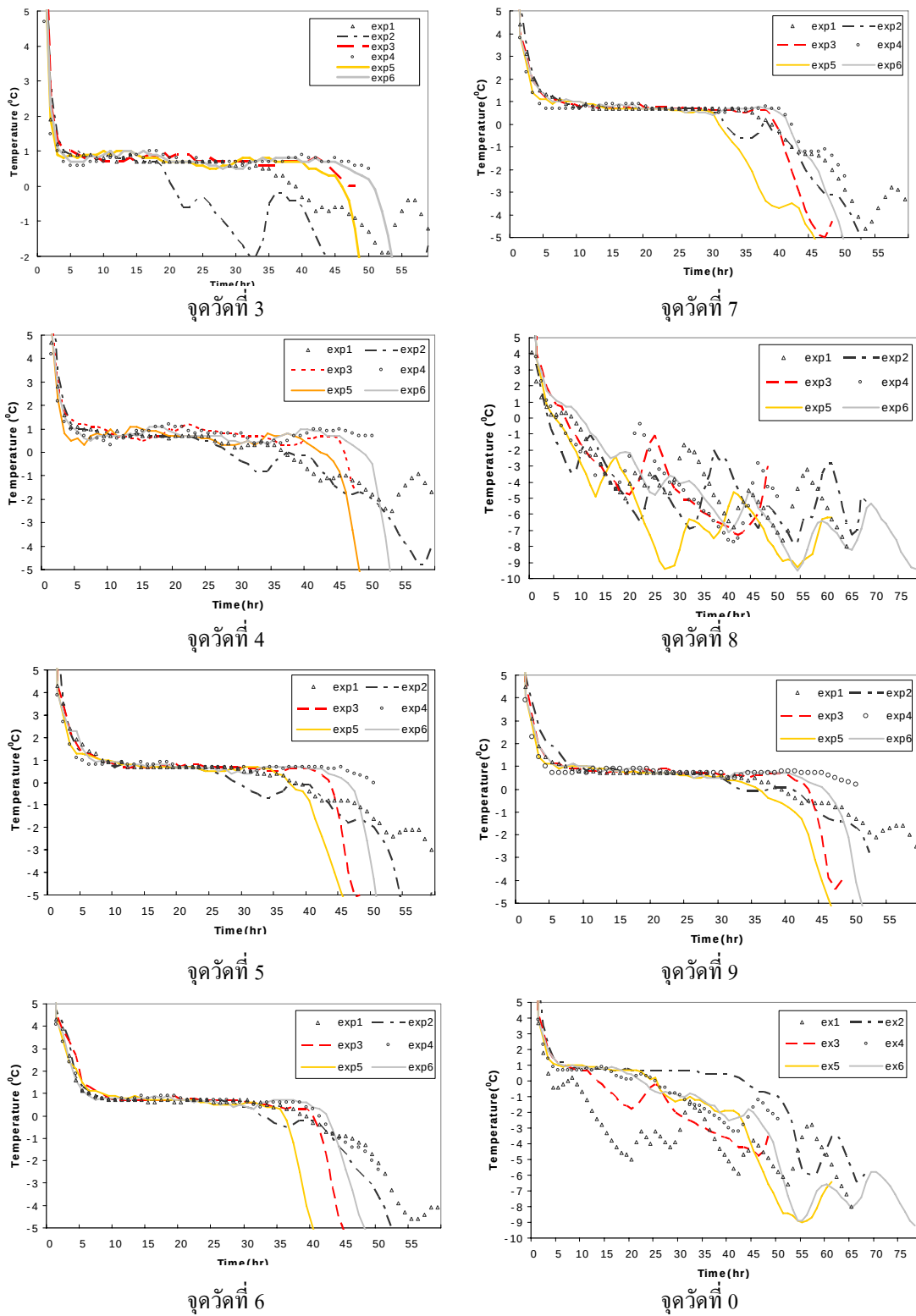
จากภาพที่ 40 พบว่าช่วงเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิประมาณ 1°C และอุณหภูมิจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เพื่อเข้าสู่สถานะของแข็ง ซึ่งในการทดลองที่ 2 จะใช้เวลาน้อยที่สุดที่ 20 hr และในการทดลองที่ 4 ใช้เวลานานที่สุดที่ 50 hr เมื่อพิจารณาในตารางที่ 9 จะพบว่าอุณหภูมิขอบเขตที่แตกต่างกัน จะทำให้เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสภาวะการขึ้นรูปน้ำแข็งของแตกต่างกันด้วย โดยอุณหภูมิของน้ำเกลือและอุณหภูมิอากาศที่ลดลงจะทำให้ใช้เวลาที่ใช้ในการผลิตน้อยลง

ตารางที่ 9 ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะของแข็งในช่องสัญญาณที่ 3 ในการทดลองทั้ง 6

การทดลอง	อุณหภูมิอากาศ โดยเฉลี่ย($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิน้ำเกลือ โดยเฉลี่ย($^{\circ}\text{C}$)	เวลาที่เข้าสู่สภาวะของแข็งใน ช่องสัญญาณที่ 3 (hr)
1	2.04	-5.30	39
2	2.59	-5.82	20
3	1.22	-6.06	44
4	0.47	-5.85	50
5	1.44	-7.54	40
6	2.50	-6.62	46

จากภาพที่ 41 เมื่อแยกพิจารณาแต่ละจุดวัดซึ่งมีตำแหน่งบนช่องน้ำแข็งแตกต่างกัน พบว่าเวลาที่เข้าสู่สถานะของแข็งในแต่ละจุดวัดที่ทำการทดลองจะใช้เวลาแตกต่างกัน แต่ลักษณะของเส้นอุณหภูมิจะคล้ายกัน โดยการทดลองที่ 2 จะใช้เวลาน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองทั้งหมด ซึ่งผลที่ปรากฏแสดงถึงอิทธิพลของสภาวะขอบเขตที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อเวลาที่ใช้แตกต่างกันไปด้วย

ในกรณีศึกษาปัจจัยจากสภาวะอุณหภูมิขอบเขต จะทำการศึกษาผลที่เกิดจากสภาวะขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงไป โดยยึดสภาวะขอบเขตในการทดลองที่ 6 เป็นหลัก ซึ่งในการศึกษาจะทำการเพิ่มและลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิขอบเขตของการทดลองที่ 6 ที่มีอุณหภูมิอากาศ 2.50°C และอุณหภูมิน้ำเกลือ -6.62°C โดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิออก 2 กรณี คือกรณีแรกคือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ โดยกำหนดให้อุณหภูมิน้ำเกลือคงที่ และกรณีที่ 2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือโดยกำหนดให้อุณหภูมิอากาศคงที่ ซึ่งผลจากการจำลองจะถูกแสดงเทียบกับเวลา ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผนังด้านบน 15 และ 10 cm ตามลำดับ



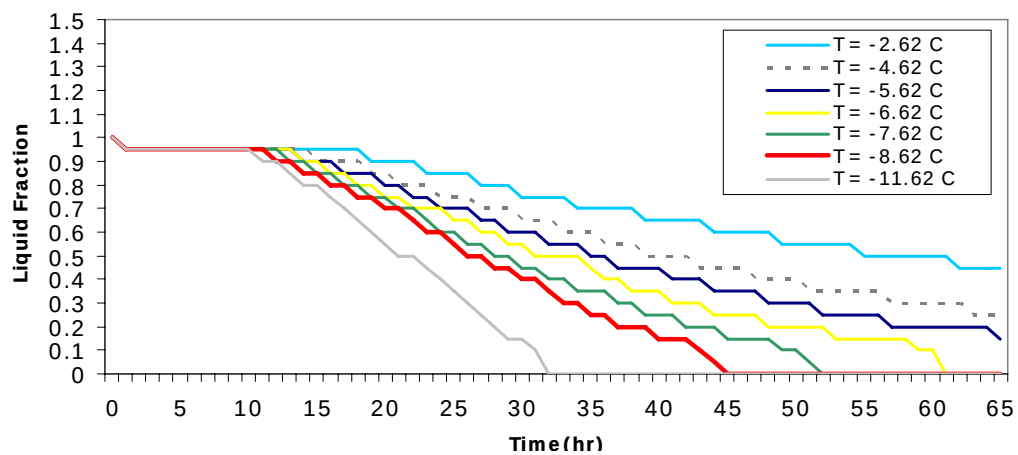
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาแยกตามจุดวัดในการทดลองทั้ง 6

3.1.1 พิจารณาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ที่อุณหภูมิอากาศคงที่

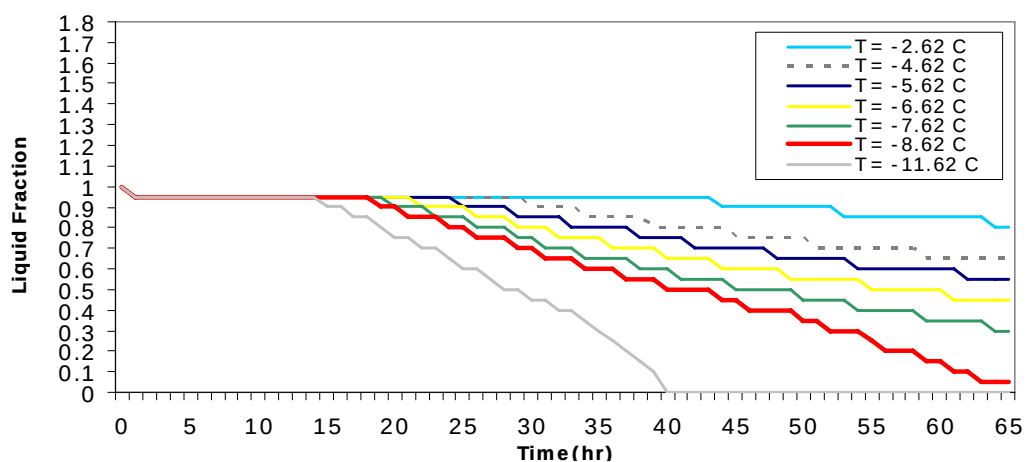
ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในการทดลองที่ 6 โดยกำหนดคุณสมบัติที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent ดังแสดงในตารางที่ 10 ที่มีอุณหภูมิอากาศคงที่ที่ 2.5°C ผลการจำลองจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลา เพื่อศึกษาเวลาที่ใช้เมื่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 10 แสดงคุณสมบัติที่ใช้ในการจำลองสถานะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

Material Properties	Water Conditions Using in Fluent Program
Initial Temperature	298 k
Nacl Temperature	Adjust Wall Temperature
Air Temperature	Wall Temperature Constant 275 k
Time Step Size	1 s
Melting Heat	334 kJ/kg
Viscosity	Constant 0.001003 kg/ms
Molecular Weight	Constant 18.0152 kg/kgmol
Solidus Temperature	273 k
Liquidus Temperature	274 k
Thermal Conductivity	Piecewise-Polynomial $y = 4\text{E-}05x^2 + 0.0079x + 0.5582$ (Liquidus) $y = -2\text{E-}07x^2 - 0.0588x + 2.7619$ (Solidus)
Cp	Piecewise-Polynomial $y = 0.0018x^4 - 0.1337x^3 + 2.6766x^2 - 20.834x + 4231.8$ (Liquidus) $y = 0.0423x^3 - 0.6339x^2 + 55.808x + 1618.5$ (Solidus)
Density	Piecewise-Polynomial $y = -0.0001x^4 + 0.0082x^3 - 0.2629x^2 + 0.8758x + 999.09$ (Liquidus) $y = -0.0001x^4 - 0.0017x^3 + 0.0443x^2 - 0.6884x + 924.39$ (Solidus)



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับเวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือ ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผนังด้านบน 15 cm ในกรณีศึกษาสภาวะขอบเขต



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับเวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเกลือ ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผนังด้านบน 10 cm ในกรณีศึกษาสภาวะขอบเขต

จากภาพที่ 42 เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิน้ำเกลือ -6.62°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิจริงของการทดลองที่ 6 เทียบกับอุณหภูมิ -5.62°C และ -7.62°C ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและลดลง 1°C ตามลำดับ ที่ตำแหน่งอัตราส่วนของเหลว = 0 พบว่าอุณหภูมิ -6.62°C ใช้เวลา 33 hr ที่อุณหภูมิ -5.62°C ใช้เวลาประมาณ 36 hr และอุณหภูมิ -7.62°C ใช้เวลา 30 hr จะเห็นว่าอุณหภูมิน้ำเกลือ -7.62°C ใช้เวลาน้อยที่สุดโดยเวลาที่ใช้เปลี่ยนไปประมาณ 3 hr ดังนั้นกล่าวได้ว่าอุณหภูมิน้ำเกลือที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง 1°C ทำให้เวลาที่ใช้เปลี่ยนแปลงไปประมาณ 3 hr

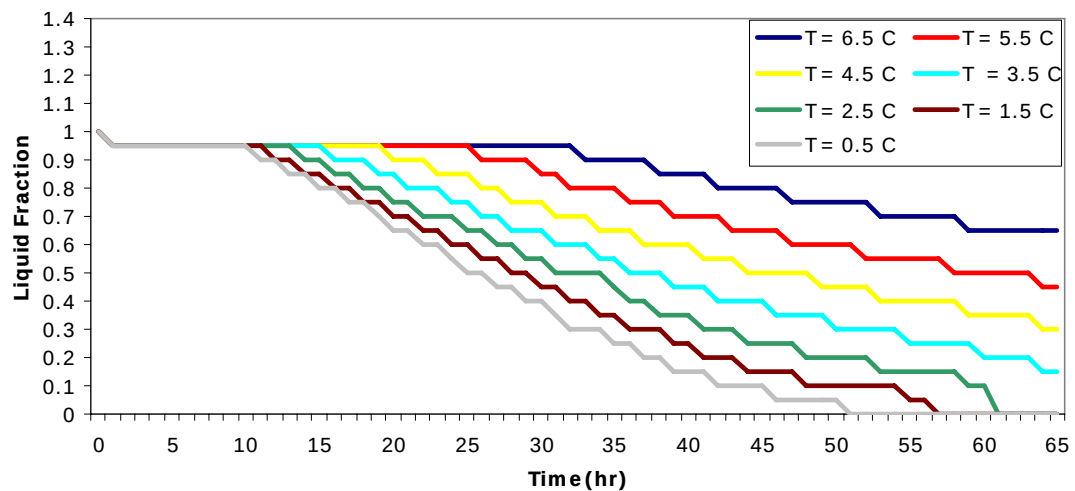
จากภาพที่ 42 และ 43 พิจารณาอัตราส่วนของเหลว= 0.5 ที่อุณหภูมิ -11.62 °C พบว่าใช้เวลาประมาณ 20 hr ที่ระยะห่างผิวบน 15 cm และ 27 hr ที่ระยะห่างผิวบน 10 cm ตามลำดับ โดยเวลาที่มีความแตกต่างกันประมาณ 7 hr กล่าวได้ว่าที่สภาวะขอบเขตเดียวกัน ตำแหน่งที่พิจารณาในแนวแกน y มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิ โดยระยะจากผิวบนที่มากขึ้น เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิจำนวนน้อยลงตามไปด้วย

ตารางที่ 11 แสดงคุณสมบัติที่ใช้ในการจำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ

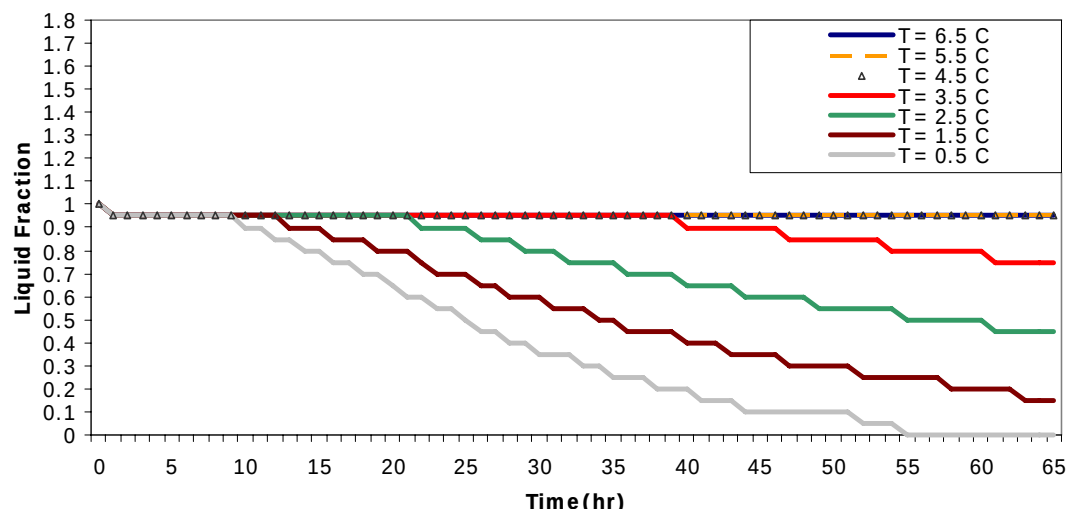
Material Properties	Water Conditions Using in Fluent Program
Initial Temperature	298 k
Nacl Temperature	Wall Temperature Constant 266.38 k
Air Temperature	Adjust Wall Temperature
Grid size	0.5 cm
Time Step Size	1 s
Melting Heat	334 kj/kg
Viscosity	Constant 0.001003 kg/ms
Molecular Weight	Constant 18.0152 kg/kgmol
Solidus Temperature	273 k
Liquidus Temperature	274 k
Thermal Conductivity	Piecewise-Polynomial $y = 4E-05x^2 + 0.0079x + 0.5582$ (Liquidus) $y = -2E-07x^2 - 0.0588x + 2.7619$ (Solidus)
Cp	Piecewise-Polynomial $y = 0.0018x^4 - 0.1337x^3 + 2.6766x^2 - 20.834x + 4231.8$ (Liquidus) $y = 0.0423x^3 - 0.6339x^2 + 55.808x + 1618.5$ (Solidus)
Density	Piecewise-Polynomial $y = -0.0001x^4 + 0.0082x^3 - 0.2629x^2 + 0.8758x + 999.09$ (Liquidus) $y = -0.0001x^4 - 0.0017x^3 + 0.0443x^2 - 0.6884x + 924.39$ (Solidus)

3.1.2 พิจารณาอุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง ที่อุณหภูมิน้ำเกลือคงที่

ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศในการทดลองที่ 6 โดยกำหนดคุณสมบัติที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม fluent ในตารางที่ 11 ที่มีอุณหภูมิน้ำเกลือคงที่ -6.62°C



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับเวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่ำกว่าผนังด้านบน 15 cm ในกรณีศึกษาภาวะขอบเขต



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวกับเวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่ำกว่าผนังด้านบน 10 cm ในกรณีศึกษาภาวะขอบเขต

จากภาพที่ 44 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิอากาศที่ 2.5°C ซึ่งเป็นสภาวะขอบเขตจริงของการทดลองที่ 6 เทียบกับอุณหภูมิ 1.5°C และ 3.5°C ที่เปลี่ยนแปลงไป 1°C พบว่าอุณหภูมิ 2.5°C ใช้เวลาประมาณ 31 hr อุณหภูมิ 1.5°C ใช้เวลาประมาณ 27 hr และอุณหภูมิ 3.5°C ใช้เวลาประมาณ 35 hr ที่ตำแหน่งอัตราส่วนของเหลว = 0.5 พบว่าอุณหภูมิอากาศ 1.5°C ใช้เวลาน้อยที่สุดโดยเวลาที่ใช้น้อยกว่า 2.5 , 3.5 ประมาณ 4 และ 8 hr ตามลำดับ ดังนั้นกล่าวได้ว่าอุณหภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง 1°C ทำให้เวลาที่ใช้เปลี่ยนแปลงไป 4 hr

จากภาพที่ 44 และ 45 เมื่อกำหนดอุณหภูมิน้ำเกลือคงที่และทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศพบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศลดลงจะทำให้เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสภาวะของแข็งลดลงด้วย เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนของเหลว = 0.5 อุณหภูมิ 2.5°C ใช้เวลาประมาณ 30 ที่ระยะห่างผิวบน 15 cm และ 55 hr ที่ระยะห่างผิวบน 10 cm ตามลำดับ ซึ่งเวลาที่ใช้แตกต่างกันประมาณ 15 hr กล่าวได้ว่าที่สภาวะขอบเขตเดียวกัน ระยะห่างจากผิวบนมากขึ้นจะให้ใช้น้ำเวลาน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิน้ำเกลือที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ตำแหน่งห่างจากผิวบน 10 cm และ 15 cm พบว่า อุณหภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงทุกๆ 1°C จะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปมากกว่าอุณหภูมิน้ำเกลือที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 1°C

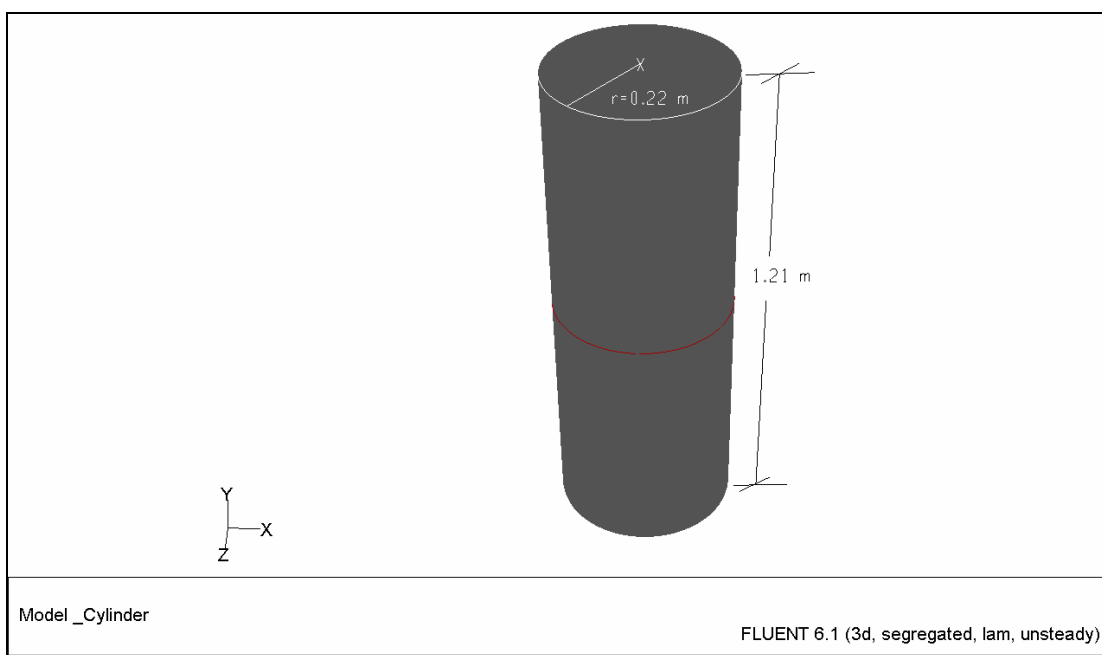
3.2 กรณีศึกษาปัจจัยจากรูปทรงภาชนะบรรจุ

ในการศึกษาปัจจัยจากรูปทรงภาชนะบรรจุจะพิจารณาที่สภาวะขอบเขตเดียวกันโดยเปลี่ยนรูปทรงภาชนะบรรจุในรูปทรงที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งของ โดยสภาวะขอบเขตที่พิจารณาจะใช้การทดลองที่ 6 ที่มีอุณหภูมิอากาศโดยเฉลี่ยประมาณ 2.50°C และ อุณหภูมิน้ำเกลือประมาณ -6.62°C ผลที่ได้ในแต่ละรูปทรงจะถูกแสดงกราฟของอุณหภูมิเทียบกับเวลา และ อุณหภูมิเทียบกับระยะทางในแนวแกน y คุณสมบัติที่กำหนดในทุกรูปทรงจะแสดงดังตารางที่ 12 โดยผลที่ได้จากการจำลองจะถูกนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งรูปทรงที่ทำการพิจารณาได้แก่ รูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมมุมฉาก, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, ห้าเหลี่ยม, หกเหลี่ยม, แปดเหลี่ยม, ทรงกระบอก และทรงกรวยทรงกลม ผลจากการจำลองจะศึกษาเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง และปัจจัยที่เกี่ยวข้องเวลาที่ใช้ เพื่อหารูปทรงที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปน้ำแข็งของ

ตารางที่ 12 แสดงคุณสมบัติที่ใช้ในการจำลองสภาวะกรณีเปลี่ยนรูปทรงภาชนะบรรจุ

Material Properties	Water Conditions Using in Fluent Program
Initial Temperature	298 k
Nacl Temperature	Wall Temperature Constant 266.38 k
Air Temperature	Wall Temperature Constant 275.5 k
Grid Size	0.5 cm
Time Step Size	1 s
Melting Heat	334 kJ/kg
Viscosity	Constant 0.001003 kg/ms
Molecular Weight	Constant 18.0152 kg/kgmol
Solidus Temperature	273 k
Liquidus Temperature	274 k
Thermal Conductivity	Piecewise-Polynomial $y = 4E-05x^2 + 0.0079x + 0.5582$ (Liquidus) $y = -2E-07x^2 - 0.0588x + 2.7619$ (Solidus)
Cp	Piecewise-Polynomial $y = 0.0018x^4 - 0.1337x^3 + 2.6766x^2 - 20.834x + 4231.8$ (Liquidus) $y = 0.0423x^3 - 0.6339x^2 + 55.808x + 1618.5$ (Solidus)
Density	Piecewise-Polynomial $y = -0.0001x^4 + 0.0082x^3 - 0.2629x^2 + 0.8758x + 999.09$ (Liquidus) $y = -0.0001x^4 - 0.0017x^3 + 0.0443x^2 - 0.6884x + 924.39$ (Solidus)

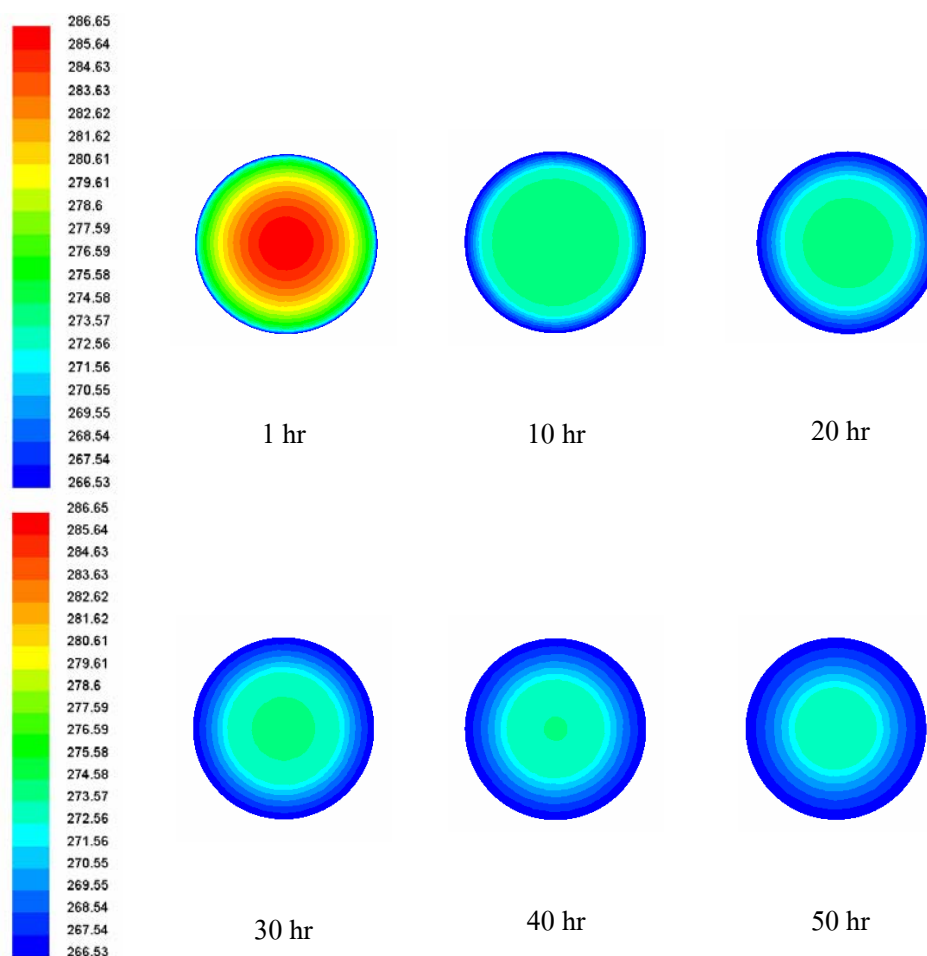
ในการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งของแต่ละรูปทรงจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลา ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวบน 15 cm ซึ่งเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนของเหลวเดียวกันรูปทรงที่ใช้เวลาน้อยที่สุดจะมีความเหมาะสมที่สุด โดยปัจจัยที่มีผลต่อเวลาจะเปรียบเทียบจากความยาวประสิทธิผล



ภาพที่ 46 รูปทรงภาชนะทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.44 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษา
รูปทรงภาชนะบรรจุ

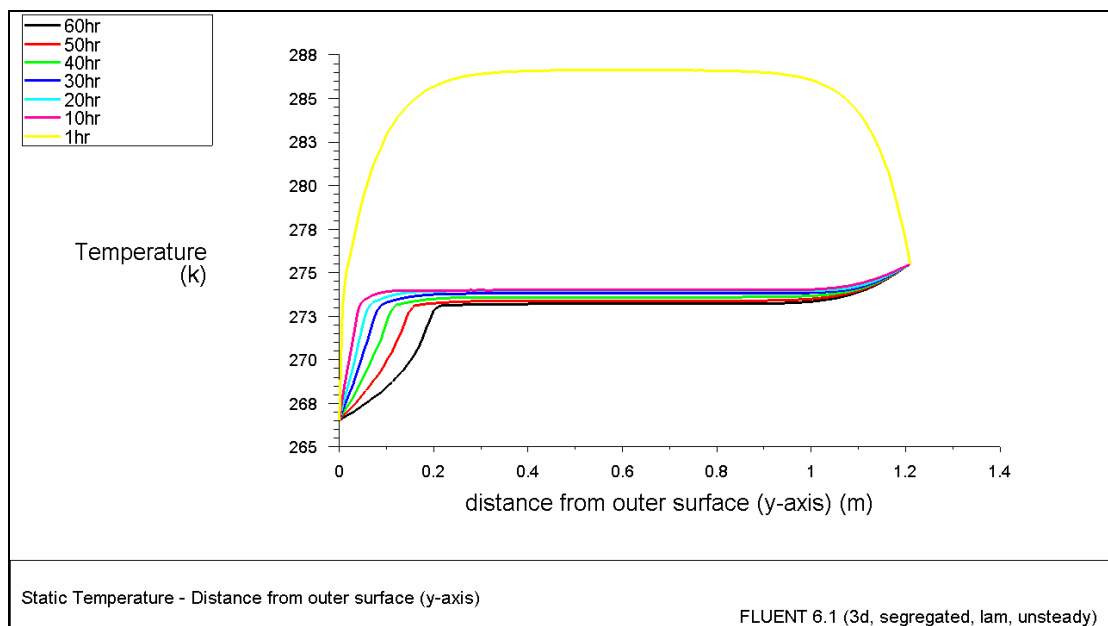
ภาพที่ 46 แสดงรูปทรงภาชนะทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.44 m ความสูง 1.21 m มีปริมาตร 0.183 m^3 ซึ่งจะเป็นปริมาตรเดียวกันกับปริมาตรที่ใช้ในการผลิตน้ำแข็งซอง ซึ่งจะถูกกำหนดเท่ากันทุกรูปทรง และมีพื้นที่สัมผัสอากาศ 0.151 m^2 โดยผลที่ได้จากการจำลองจะแสดงผลที่ระนาบ xz ตำแหน่งความสูง $y = 0.65 \text{ m}$ ในความสัมพันธ์ระหว่างกราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลา

เมื่อพิจารณาสภาวะขอบเขตจะพบว่าสภาวะขอบเขตจากน้ำเกลืออยู่บริเวณผนัง ด้านข้างและด้านล่าง ส่วนสภาวะขอบเขตจากอากาศบริเวณผนังด้านบนที่ตำแหน่ง $y = 1.21 \text{ m}$ ซึ่งเป็นระดับความสูงของน้ำ เมื่อพิจารณาหน้าตัดในระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0.65 \text{ m}$ พบว่าสภาวะขอบเขตด้านข้างของระนาบ xz จะเป็นสภาวะขอบเขตที่เกิดจากอุณหภูมิ น้ำเกลือทั้งหมด ดังนั้นผลที่ได้จะมีความสมมาตร โดยที่จุดกึ่งกลางระนาบจะเป็นตำแหน่งที่มีระยะห่างจากผนังขอบมากที่สุด ในระนาบ xz ผลที่ได้จะนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y เพื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการจำลองรูปทรงที่เปลี่ยนไป

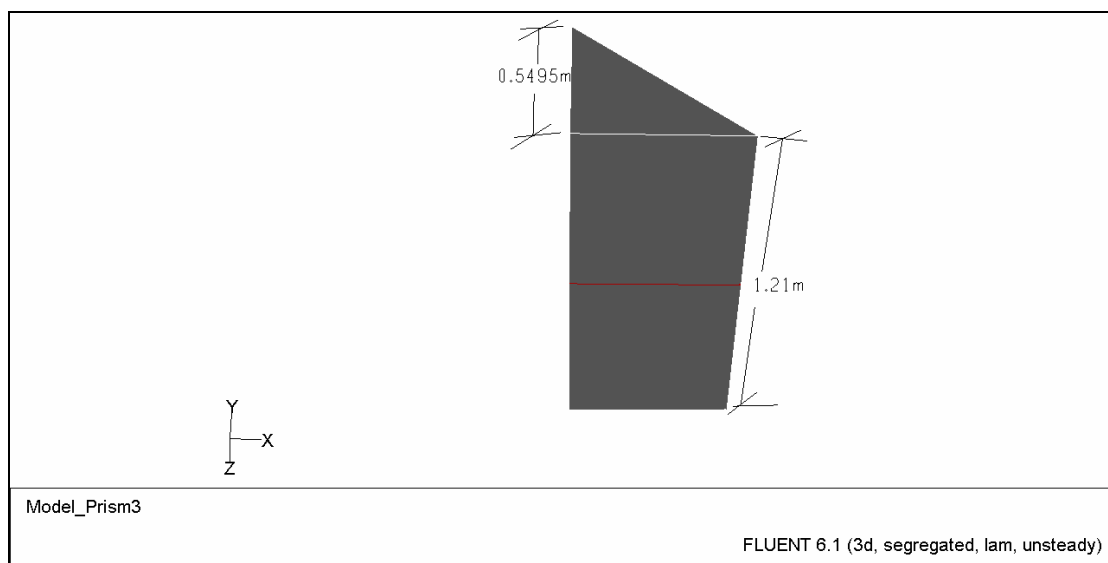


ภาพที่ 47 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงกระบอก
ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

ภาพที่ 47 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในระนาบ xz ที่ความสูง $y=0.65$ m พบว่าที่ 1 hr บริเวณใกล้ผนังขอบเขตจะมีอุณหภูมิค่าที่สุด และมีลักษณะของชั้นอุณหภูมิเป็นวงกลมเคลื่อนที่เข้าหาจุดกึ่งกลาง เมื่อเข้าสู่เวลา 10 hr จะมีช่วงเปลี่ยนสถานะที่มีอุณหภูมิประมาณ 1°C เป็นวงกลมรอบกึ่งกลางระนาบ โดยมีชั้นอุณหภูมิชัดเจนเข้าสู่สภาวะของแข็งก่อนและที่กึ่งกลางระนาบจะใช้เวลามากที่สุด โดยที่เวลา 50 hr อุณหภูมิของระนาบ xz ต่ำกว่า 0°C ซึ่งอยู่ในสถานะของแข็งทั้งหมด โดยมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ -1°C ที่ตำแหน่งกลางระนาบ ในภาพที่ 48 พบว่าอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วจากชั่วโมงที่ 1 ถึงชั่วโมงที่ 10 โดยมีช่วงเปลี่ยนสถานะอุณหภูมิ 1°C ที่ $y=0.07$ m ถึง 1.1 m ซึ่งความยาวของช่วงเปลี่ยนสถานะจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะ $y=1.21$ m มีอุณหภูมิสูงที่สุดประมาณ 1°C ที่เวลา 60 hr ซึ่งเป็นสถานะของเหลว

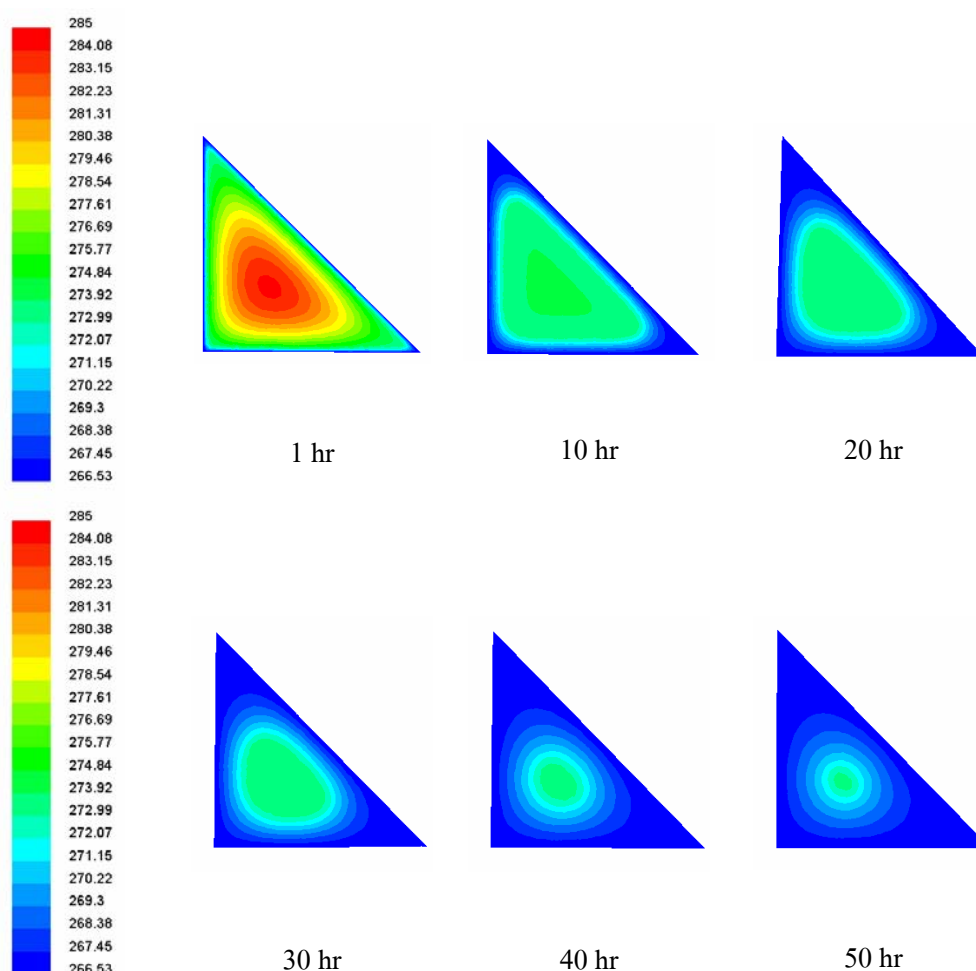


ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแกน y ในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงกระบอก ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

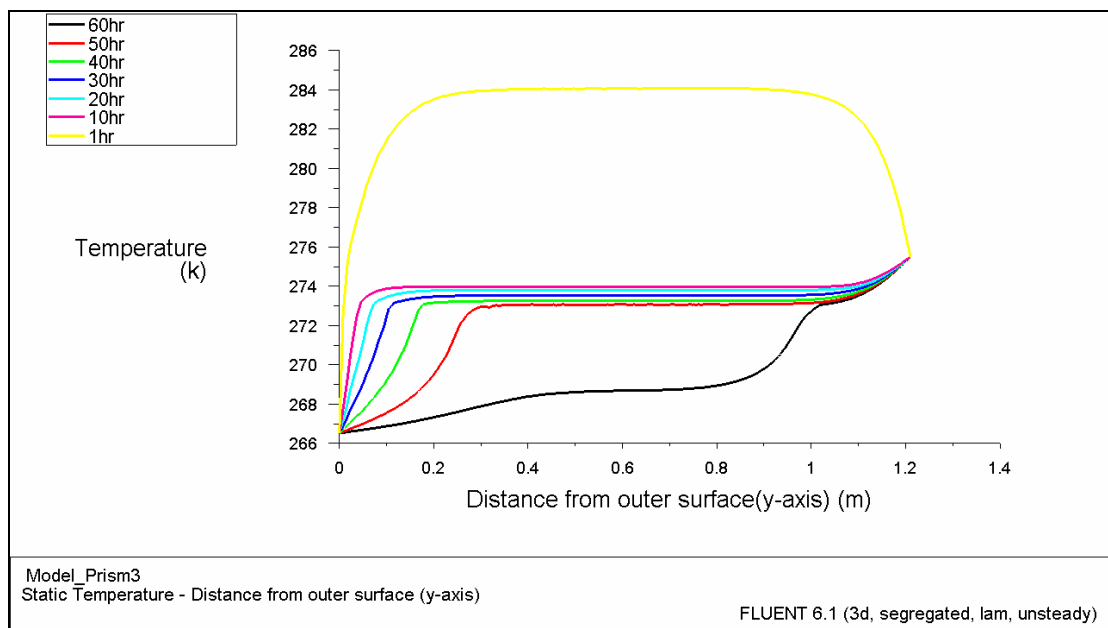


ภาพที่ 49 แสดงภาชนะบรรจุรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมความยาวด้าน 0.5495 m ความสูง 1.21m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

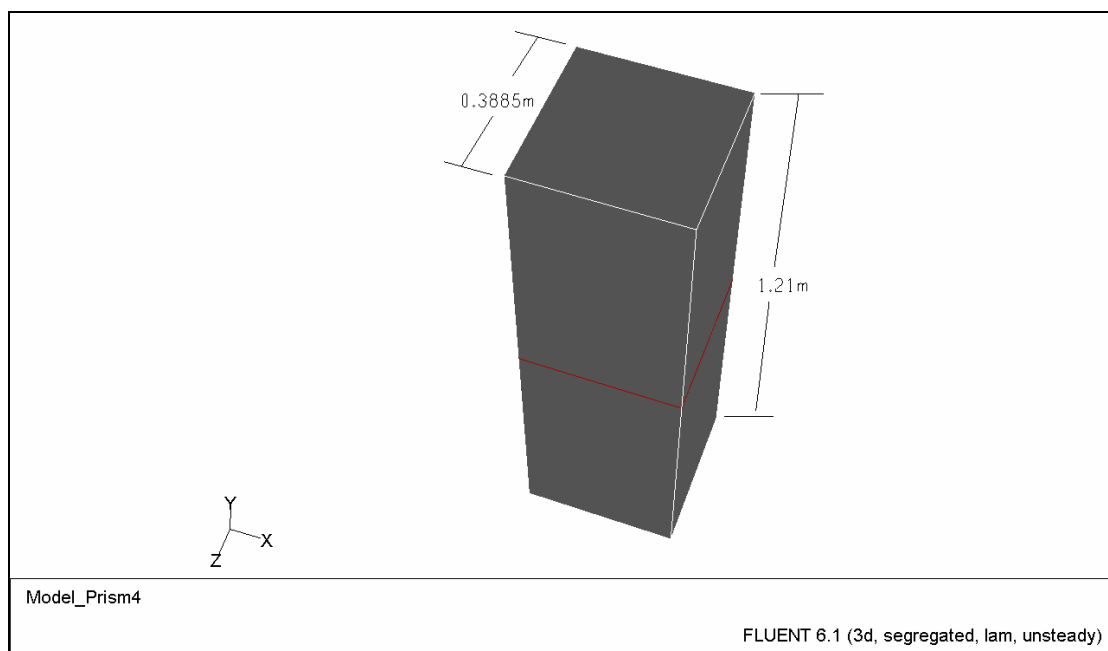
ภาพที่ 49 แสดงรูปทรงภาชนะทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมที่มีความยาวด้าน 0.5495 m ความสูง 1.21 m มีปริมาตร 0.183 m^3 ผลจากการจำลองถูกแสดงในภาพที่ 50 ในระนาบ xz ที่ความสูง $y=0.65 \text{ m}$ พบว่าจะมีลักษณะคล้ายกับรูปทรงกระบอกคือมีการลดลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในช่วง 1 hr และจะลดลงอย่างต่อเนื่องโดยเริ่มจากระยะชิดผนังโดย บริเวณเปลี่ยนสถานะมีลักษณะสามเหลี่ยมเคลื่อนเข้าสู่จุดกึ่งกลางและเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะเปลี่ยนรูปร่างเป็นวงกลม ซึ่งที่เวลา 30 hr มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C เป็นสถานะของแข็งทั้งระนาบ ในภาพที่ 51 พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะคล้ายกับกราฟของทรงกระบอกแต่จะมีระยะห่างของช่วงบริเวณเปลี่ยนสถานะกว้างกว่าที่เวลาเดียวกันและใช้เวลาในการเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่า โดยที่เวลา 60 hr บริเวณเปลี่ยนสถานะมีความกว้างเพียง 10 cm



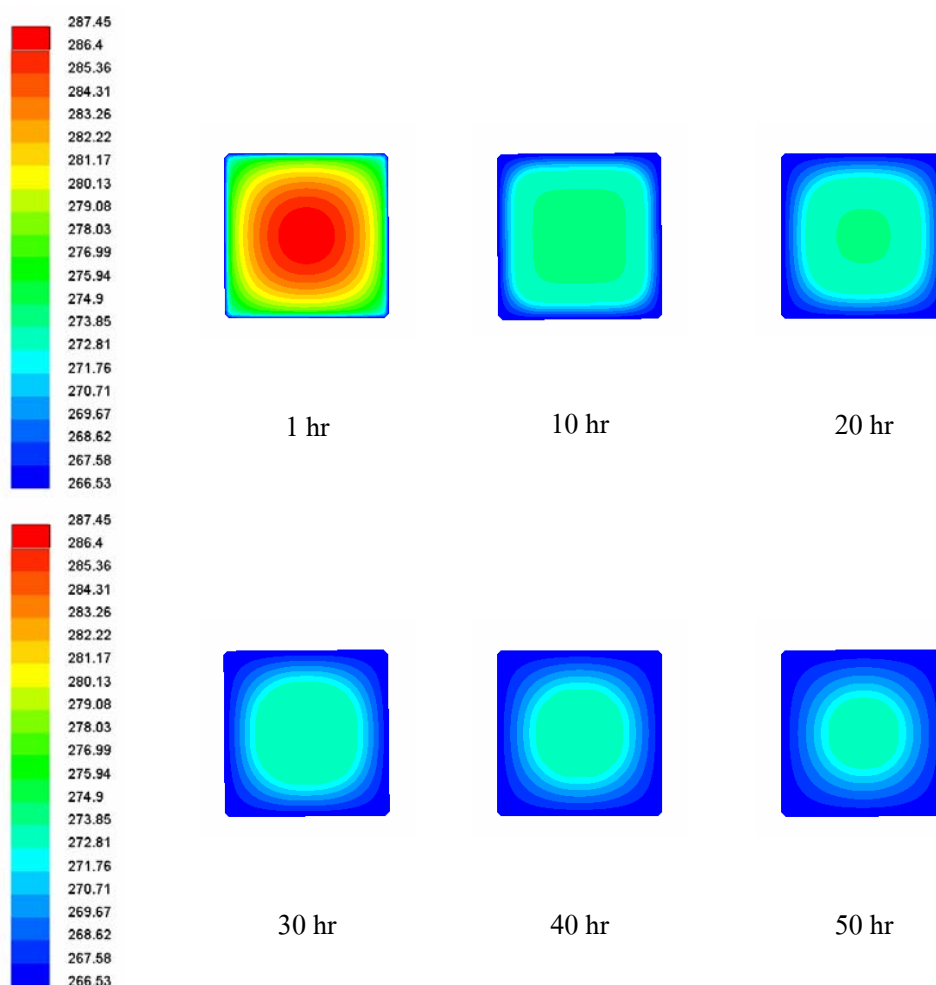
ภาพที่ 50 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ



ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแกน y ในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

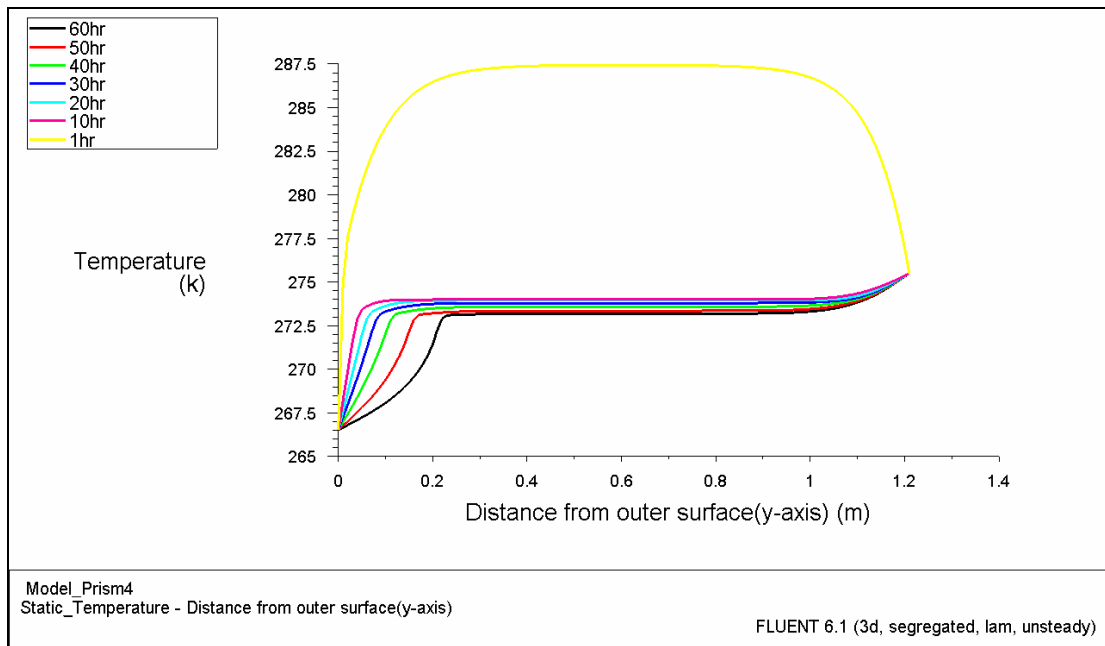


ภาพที่ 52 รูปทรงภาชนะบรรจุปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความยาวด้าน 0.3885 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

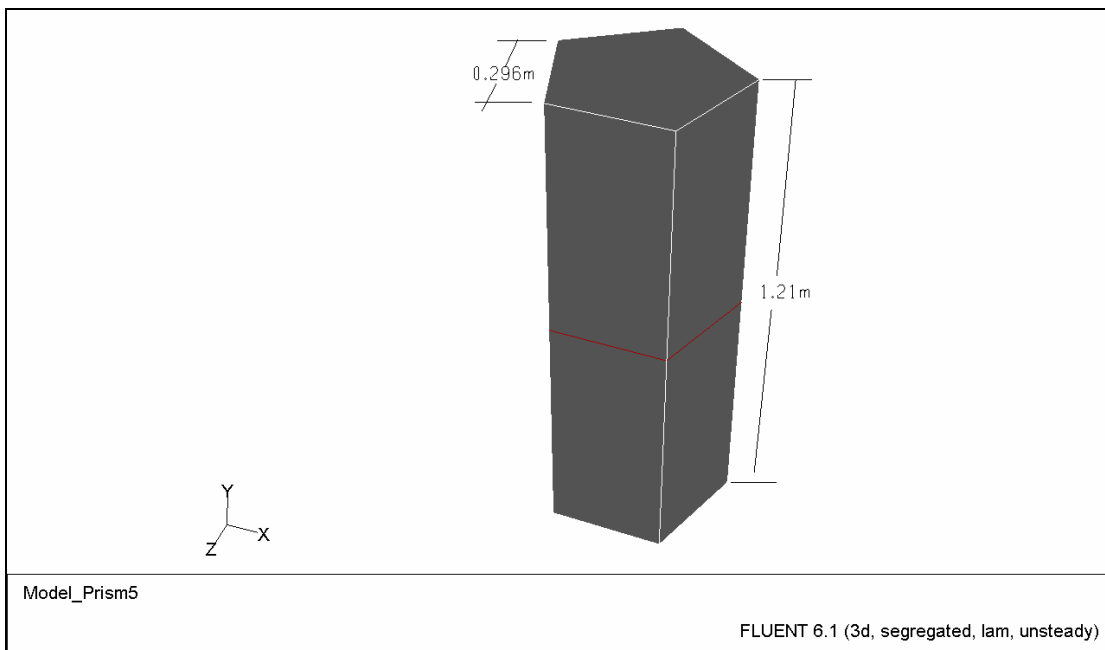


ภาพที่ 53 กราฟแสดงอุณหภูมิกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

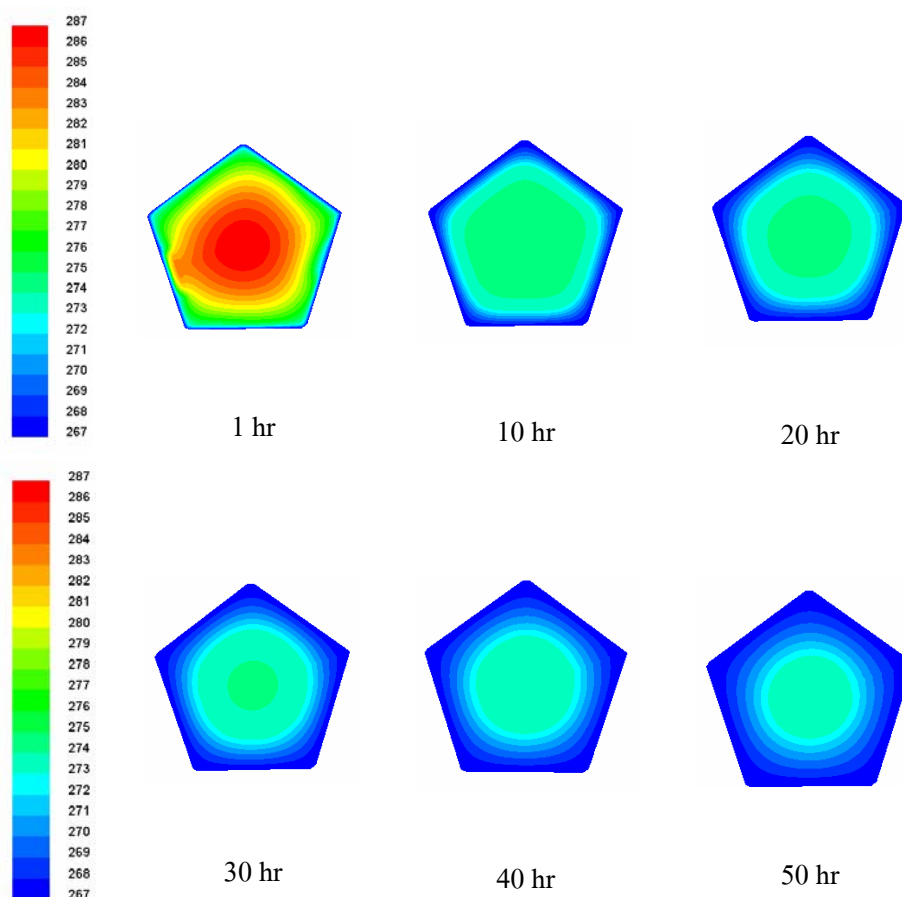
ภาพที่ 52 แสดงรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความยาวด้าน 0.3885 m ความสูง 1.21 m ผลการจำลองภาพที่ 53 ในระนาบ xz ความสูง $y=0.65$ m พบว่าลักษณะคล้ายกับรูปทรงกระบอกและทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม โดยที่เวลา 30 hr จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C บริเวณกึ่งกลางระนาบที่เป็นบริเวณเปลี่ยนสถานะซึ่งแสดงว่าอยู่ในสถานะของแข็งทั้งหมดแล้ว โดยมีบริเวณเปลี่ยนสถานะรูปสี่เหลี่ยมและเปลี่ยนเป็นวงกลมเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ภาพที่ 54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y พบว่าที่เวลา 60 hr ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุด คือ 1.21 m และช่วงเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิประมาณ 1°C ซึ่งช่วงเปลี่ยนสถานะจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นแสดงว่าได้เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งไปบางส่วนโดยยังเหลือสถานะของเหลวบางส่วนที่ตำแหน่ง $y=1$ m ถึง 1.21 m



ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแกน y ในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

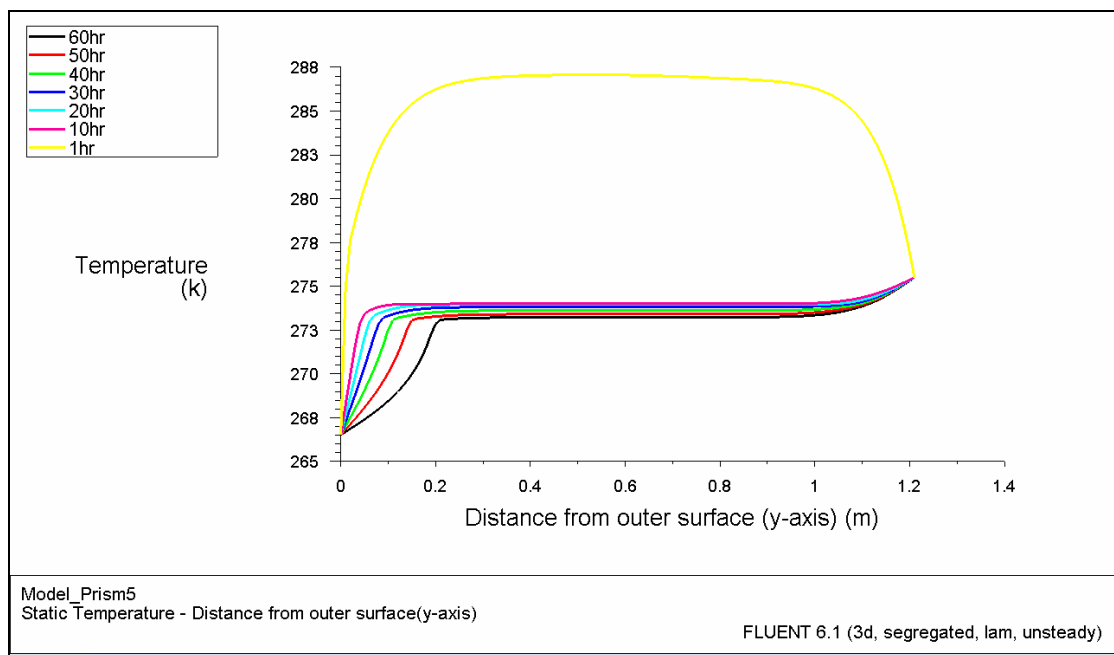


ภาพที่ 55 รูปทรงภาชนะบรรจุปริซึมฐานสี่เหลี่ยม ความยาวด้าน 0.296 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

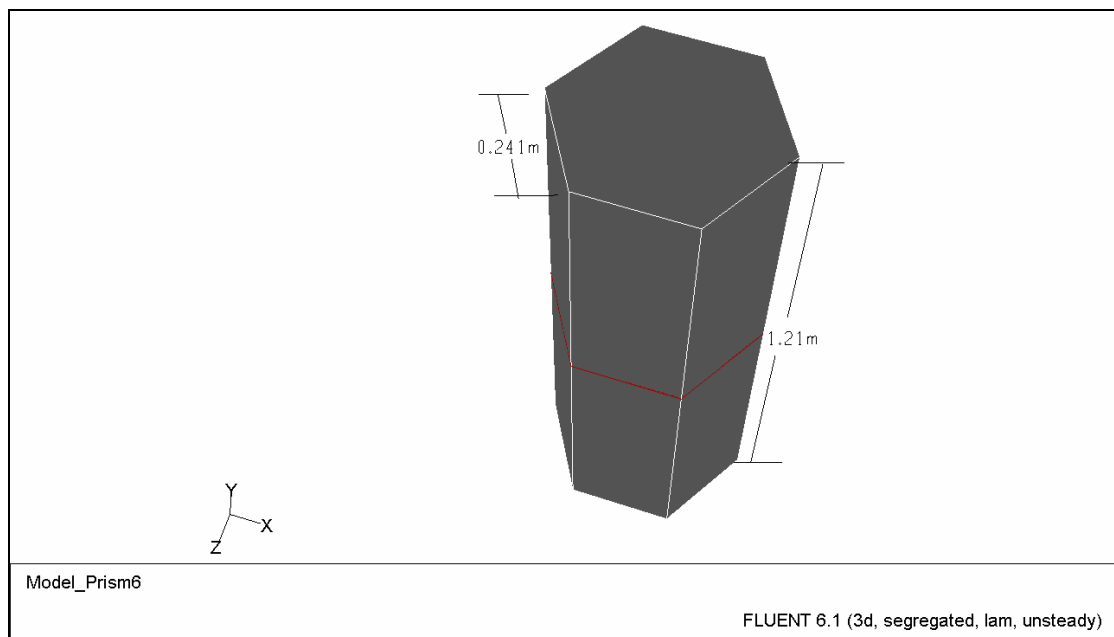


ภาพที่ 56 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

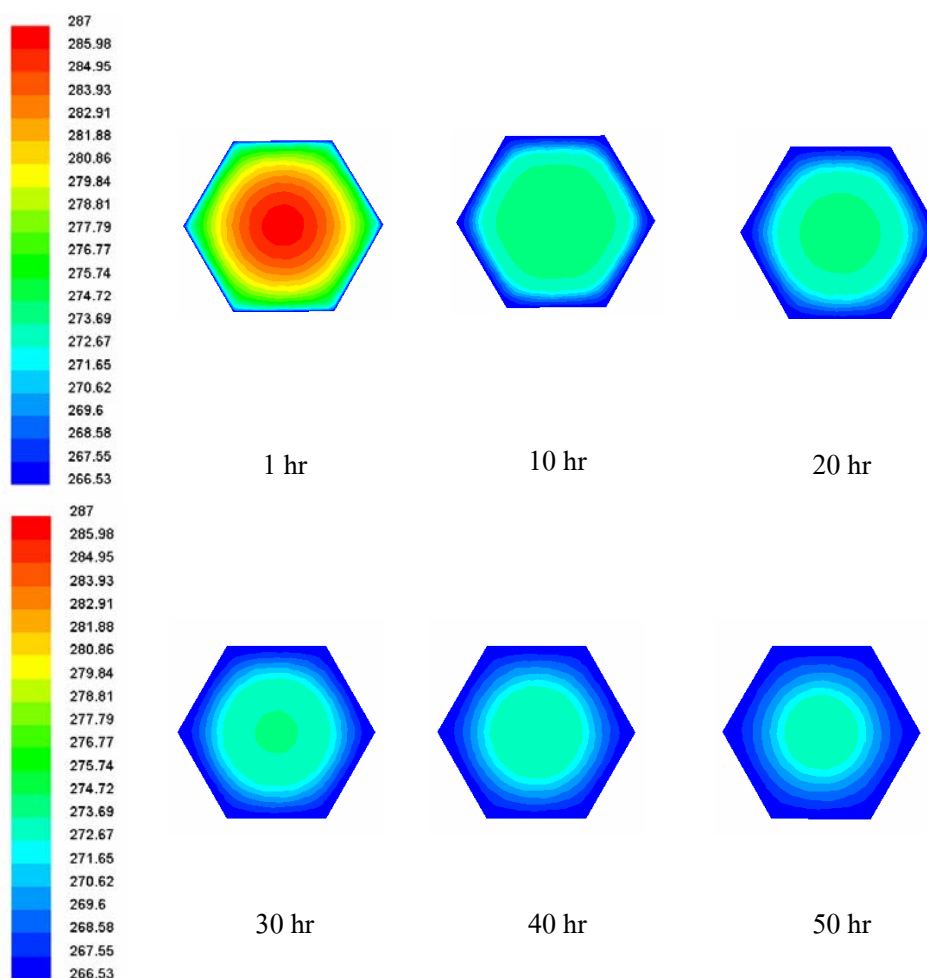
ภาพที่ 55 แสดงรูปทรงแบบจำลองทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยม ความยาวด้าน 0.296 m ความสูง 1.21 m ซึ่งผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 56 ในลักษณะกราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในระนาบ xz ที่ความสูง $y=0.65$ m ซึ่งลักษณะดังกล่าวคล้ายกับรูปทรงที่ทำการจำลองที่ผ่านมาโดยที่เวลาประมาณ 40 hr อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ซึ่งอยู่ในสถานะของแข็งทั้งระนาบและรูปทรงของชั้น อุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นห้าเหลี่ยมและเปลี่ยนเป็นวงกลมเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดกึ่งกลางระนาบ ภาพที่ 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียบกับระยะทางในแนวแกน y พบว่าลักษณะเส้นกราฟคล้ายกับรูปทรงที่ทำการจำลอง แต่ช่วงเปลี่ยนสถานะจะมีความยาวมากกว่าโดยมีตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงสุดที่ $y=1.21$ m



ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแกน y ในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

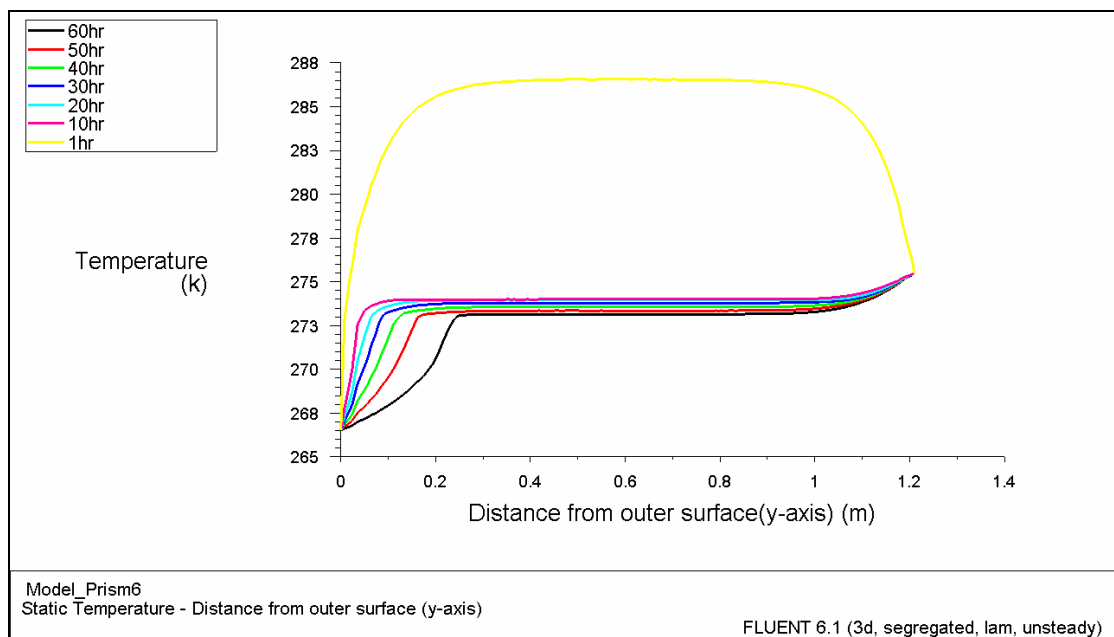


ภาพที่ 58 รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม ความยาวด้าน 0.241 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

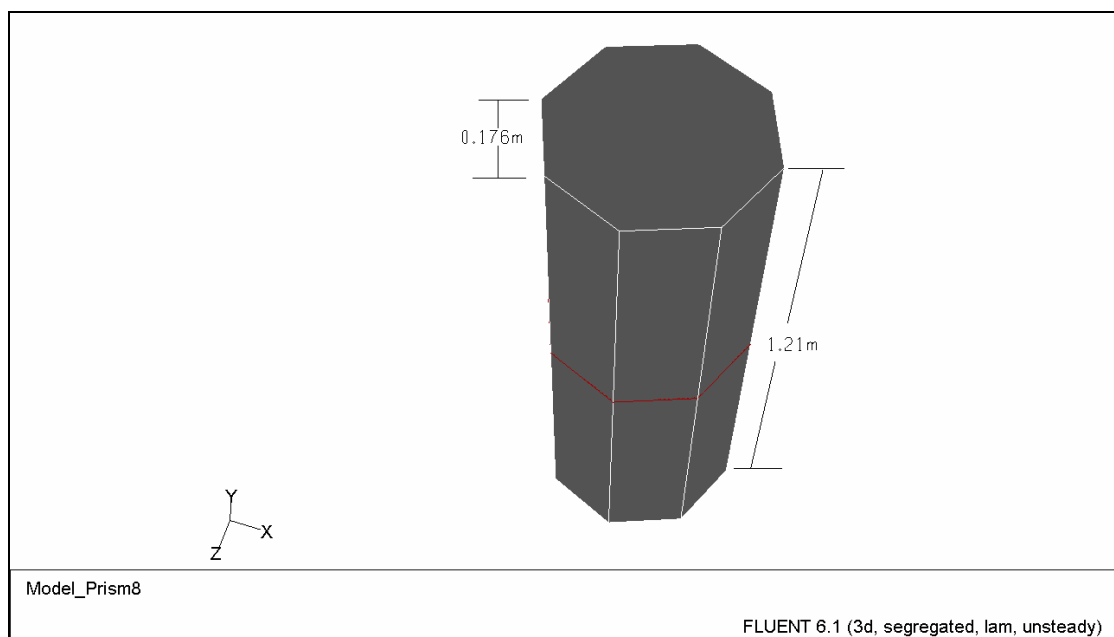


ภาพที่ 59 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

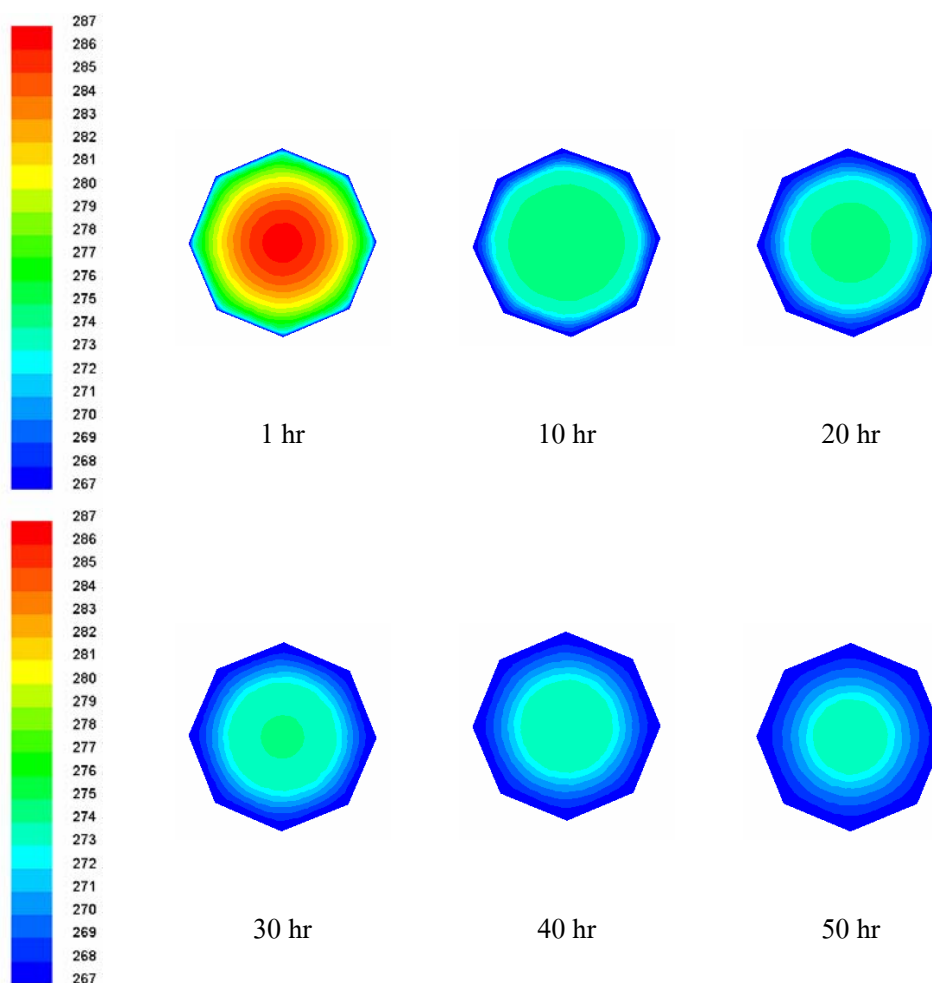
ภาพที่ 58 แสดงรูปทรงแบบจำลอง ปริซึมฐานหกเหลี่ยม ความยาวด้าน 0.241 m ความสูง 1.21 m ซึ่งผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 59 ความสัมพันธ์กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในระนาบ xz ที่ $y=0.65$ m ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับรูปทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยม โดยรูปทรงของชั้นอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นหกเหลี่ยมและเปลี่ยนเป็นวงกลมเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดกึ่งกลางระนาบ และมีสถานะของแข็งทั้งหมดที่เวลา 40 hr จากภาพที่ 60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียบกับระยะทางในแนวแกน y ซึ่งมีลักษณะเส้นกราฟคล้ายรูปทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยม ที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางในแนวแกน y เพิ่มขึ้นโดยตำแหน่ง $y=1.21$ m มีอุณหภูมิสูงที่สุด และยังมีสถานะเป็นของเหลว



ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

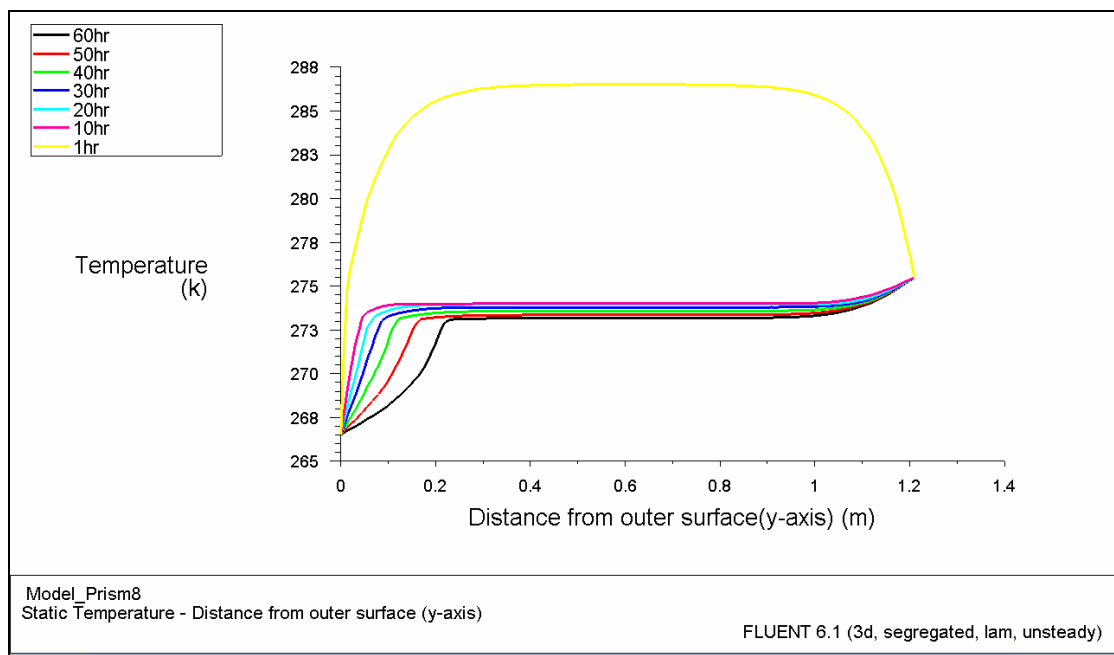


ภาพที่ 61 รูปทรงภาชนะบรรจุปริซึมฐานแปดเหลี่ยม ความยาวด้าน 0.176 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

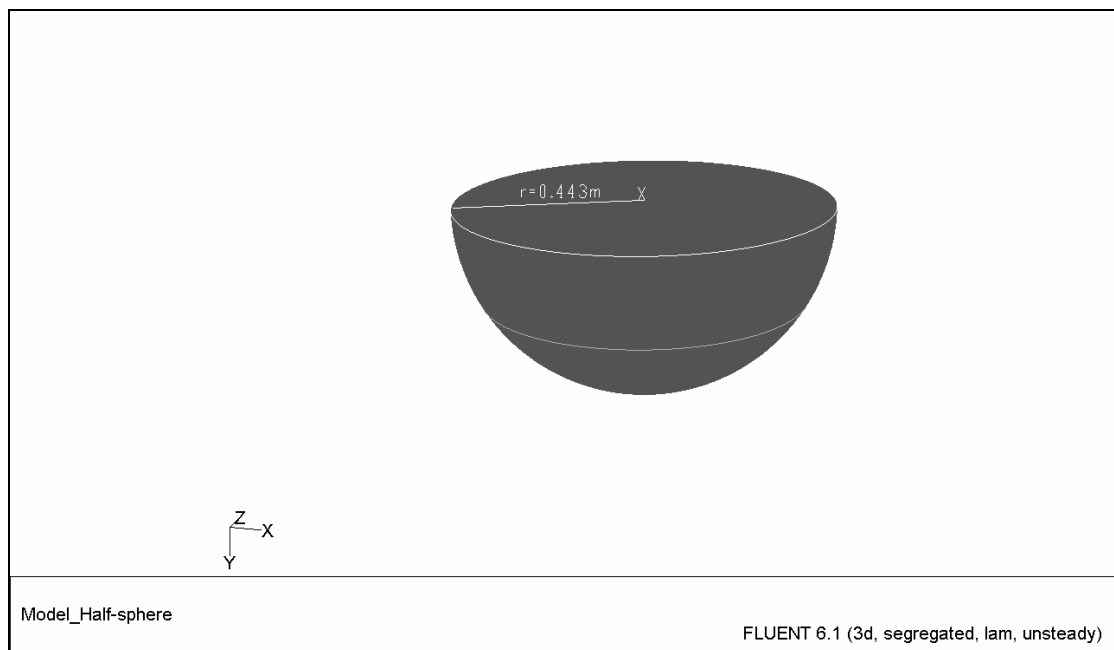


ภาพที่ 62 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานแปดเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

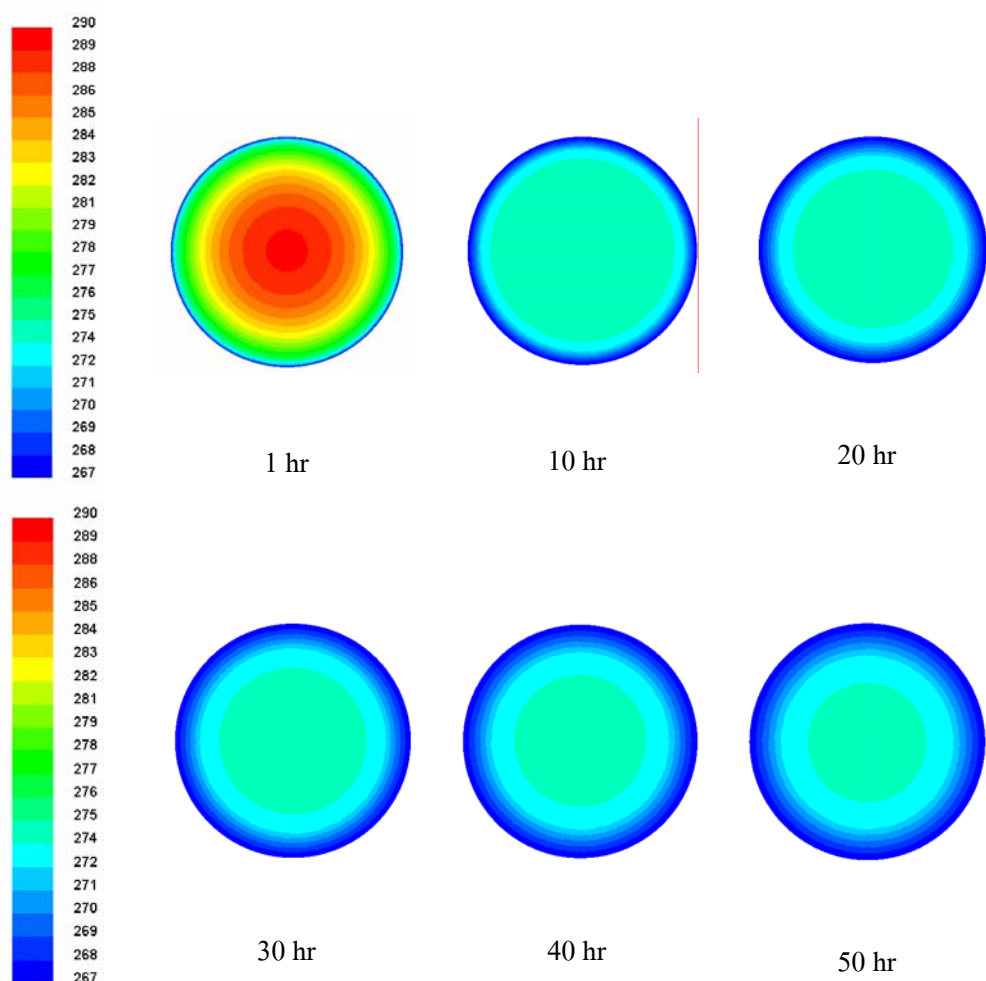
ภาพที่ 61 แสดงรูปทรงแบบจำลอง ปริซึมฐานแปดเหลี่ยม ความยาวด้าน 0.176 m ความสูง 1.21 m ซึ่งผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 62 รูปกราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลา ในระนาบ xz ที่ความสูง $y=0.65$ m ซึ่งมีลักษณะรูปทรงของชั้นอุณหภูมิเป็นแปดเหลี่ยมและเปลี่ยนเป็นวงกลมเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นมีทิศทางการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดกึ่งกลาง โดยที่เวลา 40 hr จะมีสถานะของแข็งทั้งระนาบ ภาพที่ 63 เส้นกราฟดังกล่าวมีความคล้ายกับรูปทรงปริซึมฐานห้าและหกเหลี่ยมมาก เนื่องจากรูปทรงของระนาบมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นคือตำแหน่งที่สูงสุดในแกน y ที่สัมผัสกับผนังขอบเขตที่เป็นอุณหภูมิอากาศ



ภาพที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานแปดเหลี่ยม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

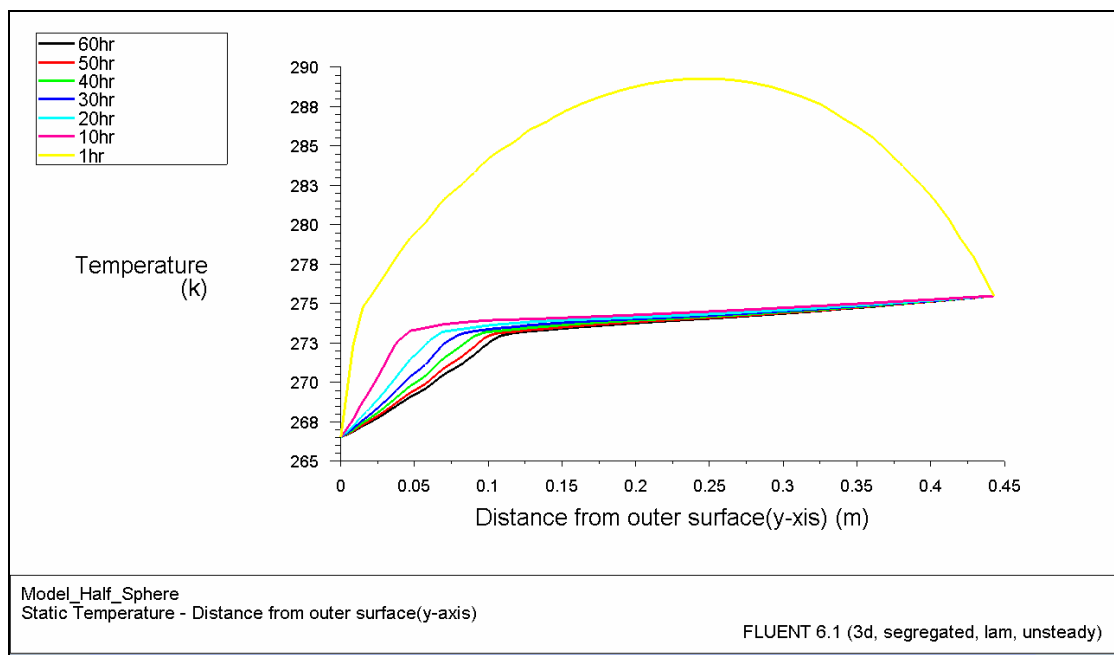


ภาพที่ 64 รูปทรงภาชนะบรรจุครึ่งทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.884 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

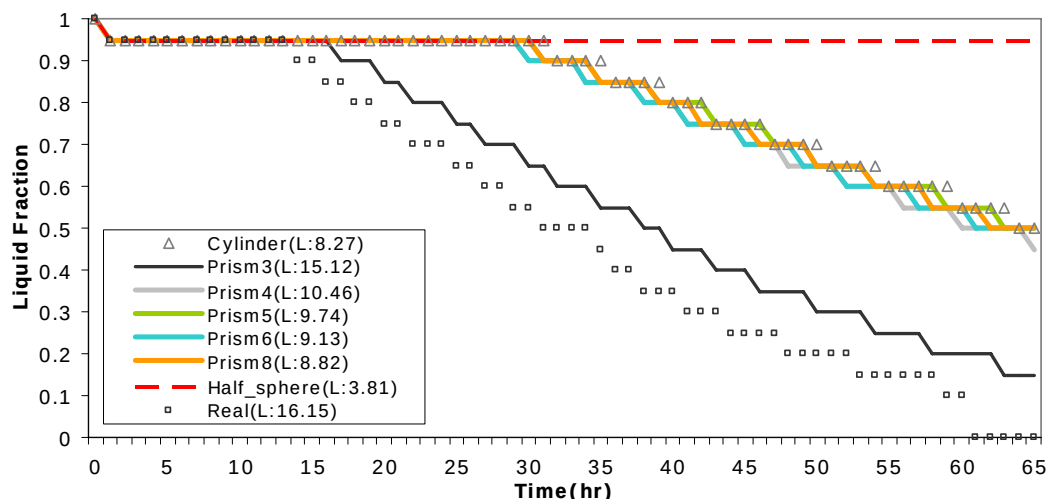


ภาพที่ 65 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของครึ่งทรงกลม
ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ

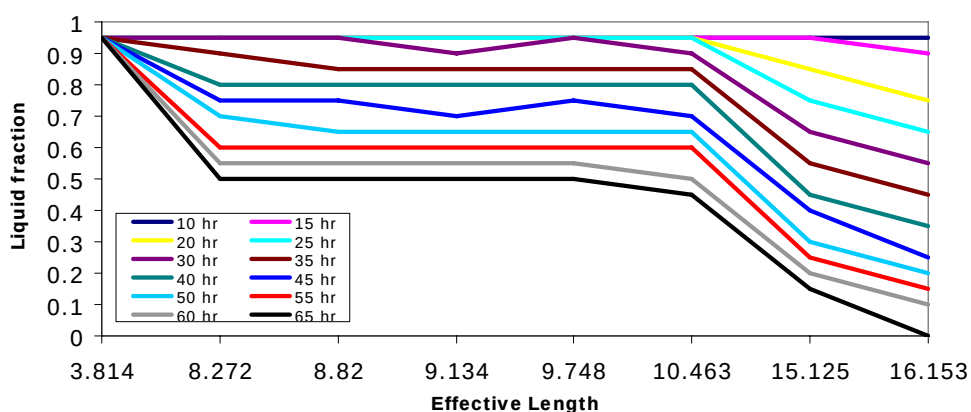
ภาพที่ 64 แสดงรูปทรงแบบจำลอง ครึ่งทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.884 m ความสูง 0.443 m ซึ่งผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 65 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในระนาบ xz ที่ความสูง $y=0.293$ m ซึ่งรูปทรงของชั้นอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นวงกลมมีทิศทางการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดกึ่งกลาง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของชั้นอุณหภูมิเกิดขึ้นช้ากว่ารูปทรงที่ผ่านมาโดยชั้นขีดผนังมีช่วงความกว้างไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ที่ 50 hr ยังคงมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 1°C บริเวณรอบจุดกึ่งกลาง ภาพที่ 66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียบกับระยะทางในแนวแกน y เมื่อเวลาเปลี่ยนไป ซึ่งเส้นกราฟในเวลา 10 hr เป็นต้นไปมีลักษณะความชันเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศ เนื่องจากตำแหน่งจุดที่พิจารณาอยู่ใกล้กับผนังด้านบนมากกว่าผนังด้านล่าง



ภาพที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของครึ่งทรงกลม ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ



ภาพที่ 67 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลา ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวขอบเขตบน 15 cm ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ



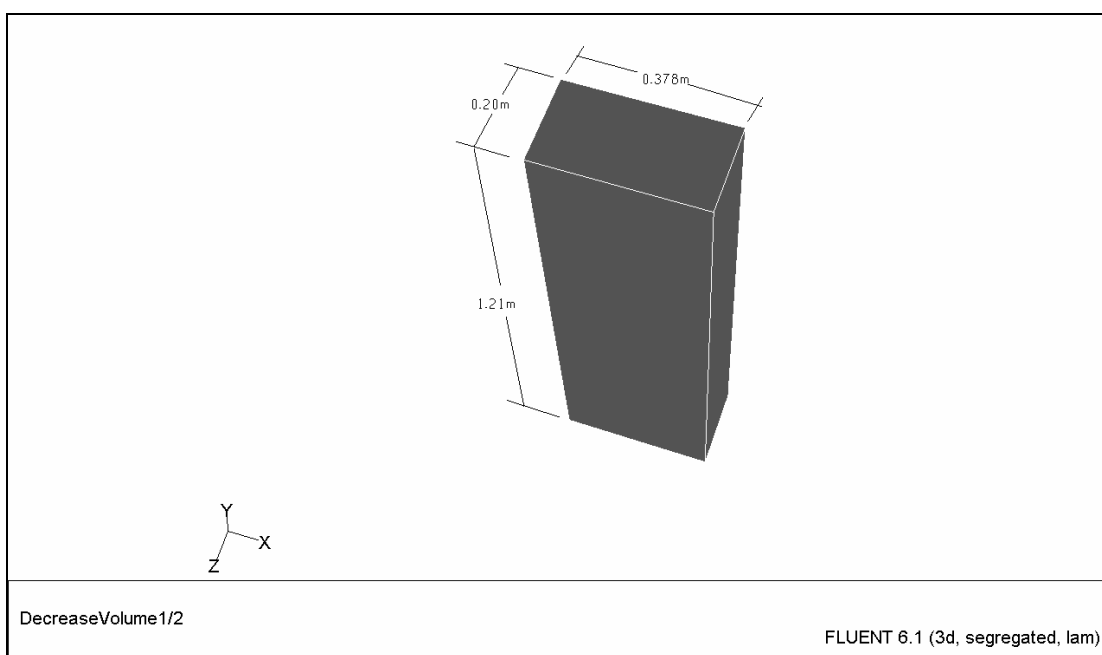
ภาพที่ 68 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวกับความยาวประสิทธิผล ในกรณีศึกษารูปทรง
ภาชนะบรรจุ ปริมาตร 0.183 m^3

ภาพที่ 67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลา ในรูปทรง
ภาชนะที่ต่างกัน ณ ตำแหน่งต่ำกว่าขอบบน 0.15 m พบว่า เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนของเหลว = 0.5
ในรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยม, ห้าเหลี่ยม, หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม จะใช้เวลาใกล้เคียงกันคือ
ประมาณ 60 hr โดยรูปทรงครึ่งทรงกลมมีอัตราส่วนของเหลวคงที่ $=1$ ตลอดช่วงซึ่งแสดงว่ามี
สถานะเป็นของเหลวตลอดช่วงที่พิจารณา โดยรูปทรงจริง(รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า)ใช้เวลาน้อยที่สุด
คือ 31 hr และปริซึมฐานสามเหลี่ยมด้านเท่าใช้เวลาประมาณ 38 hr ซึ่งเมื่อพิจารณาความยาว
ประสิทธิผลรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีค่ามากที่สุดคือ 16.153 m และรูปทรงปริซึมฐาน
สามเหลี่ยม คือ 15.125 m ดังนั้นกล่าวได้ว่ารูปทรงที่มีความยาวประสิทธิผลมากจะใช้เวลาในการขึ้น
รูปน้อยเมื่อพิจารณารูปทรงที่มีปริมาตรเท่ากัน

ภาพที่ 68 เปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวกับความยาวประสิทธิผล ในกรณีศึกษา
รูปทรงภาชนะบรรจุที่มีปริมาตร 0.183 m^3 พบว่าความยาวประสิทธิผลแปรผกผันกับเวลาที่ใช้ในการ
เปลี่ยนสถานะเมื่อพิจารณาที่เวลาเดียวกันพบว่าอัตราส่วนของเหลวจะลดลงเมื่อความยาว
ประสิทธิผลเพิ่มขึ้น โดยที่ 16.153 m มีอัตราส่วนของเหลวน้อยที่สุดที่เวลาเดียวกัน สรุปได้ว่าปัจจัยที่
มีผลต่อการเปลี่ยนสถานะที่มีปริมาตรและพื้นที่สัมผัสอากาศเท่ากัน คือความยาวประสิทธิผลโดย
ความยาวประสิทธิผลที่มากขึ้นจะทำให้ใช้เวลาในการขึ้นรูปน้อยลง ซึ่งรูปทรงปริซึมฐาน
สี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาวประสิทธิผลมากที่สุด จึงทำให้ใช้เวลาน้อยที่สุด

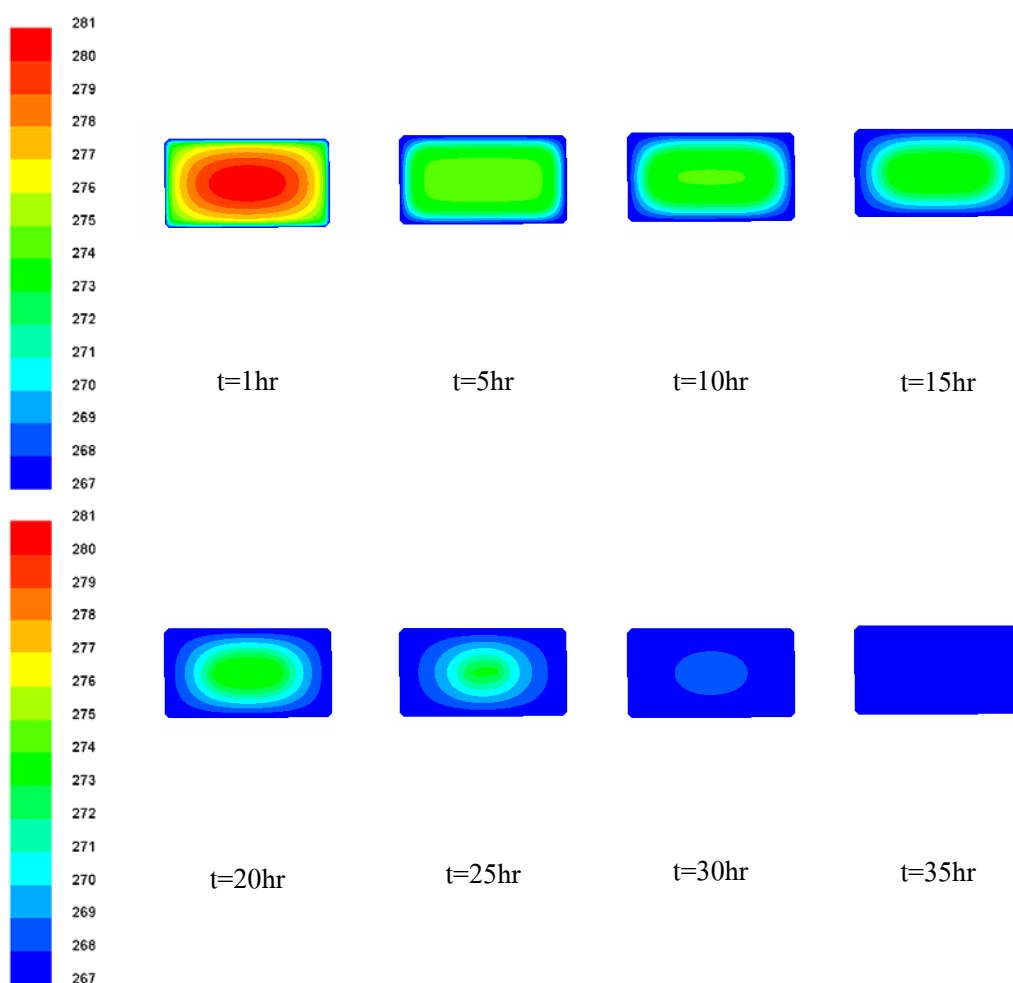
3.3 กรณีศึกษาปัจจัยจากการลดปริมาตร

ในกรณีนี้ได้ทำการศึกษารูปน้ำแข็งซองในภาชนะรูปทรงต่างๆ โดยกำหนดให้ปริมาตรที่ใช้ในการจำลองลดลงจากเดิมครึ่งหนึ่ง เดิมมีปริมาตร 0.183 m^3 ดังนั้นจึงทำการลดปริมาตรเป็น 0.0915 m^3 โดยให้พื้นที่สัมผัสอากาศลดลงครึ่งหนึ่งที่ 0.07561 m^2 ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่สัมผัสอากาศเดิม และส่วนสูงเท่าเดิมที่ 1.21 m โดยกำหนดสภาวะขอบเขตเดียวกันกับกรณีปริมาตร 0.183 m^3



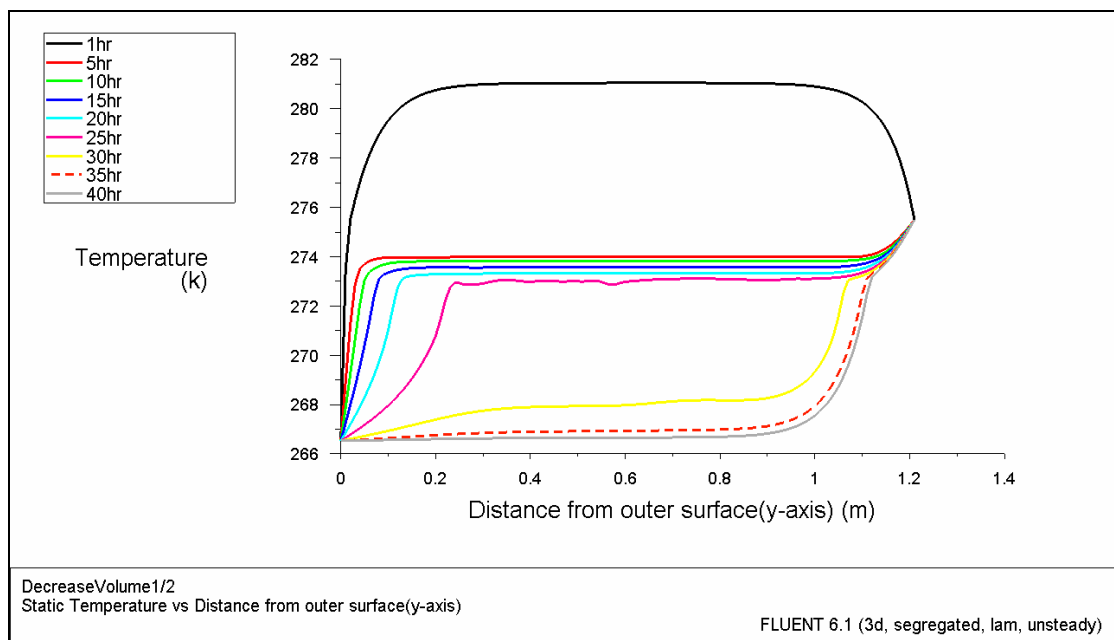
ภาพที่ 69 รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $0.2 \text{ m} \times 0.78 \text{ m}$ ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

ในภาพที่ 69 แสดงรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $0.2 \text{ m} \times 0.78 \text{ m}$ ความสูง 1.21 m ซึ่งเป็นรูปทรงที่ลดจากรูปทรงจริงจากการทดลอง โดยใช้สภาวะเดิมในการจำลอง ซึ่งผลจะถูกแสดงในระนาบ xz ที่ความสูง $y = 0.65 \text{ m}$ ในภาพที่ 70 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะคล้ายกับปริมาตรเดิมแต่เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปลดลง โดยที่เวลา 35 hr อุณหภูมิได้ลดลงเท่ากับอุณหภูมิขอบเขตที่ประมาณ -6°C ในสถานะของแข็ง โดยตำแหน่งสุดท้ายที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้าที่สุดคือจุดกึ่งกลางระนาบ xz

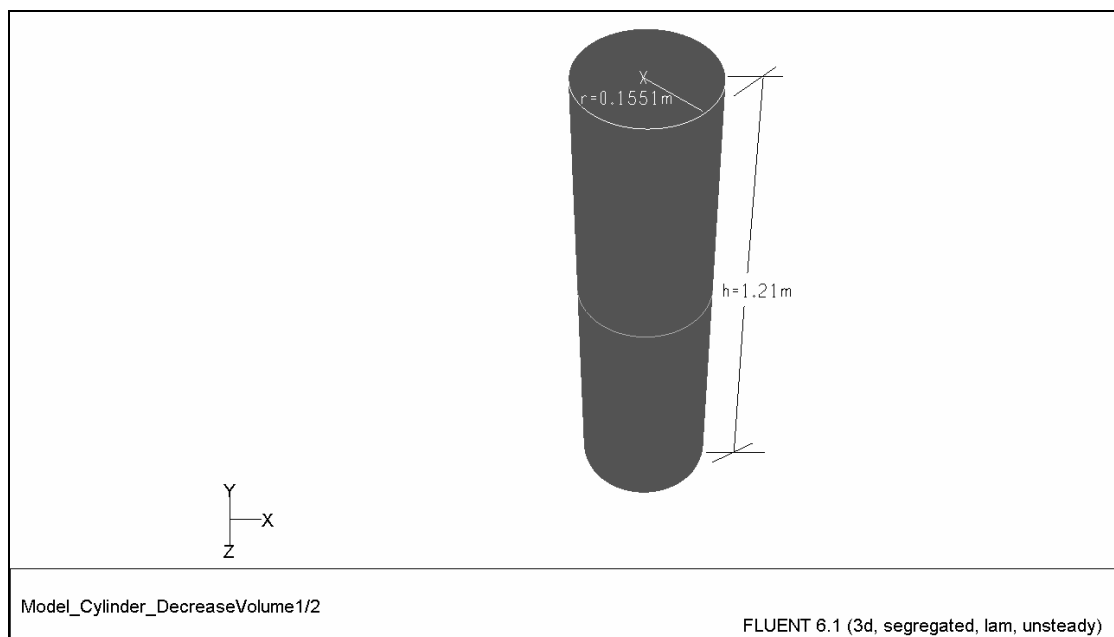


ภาพที่ 70 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

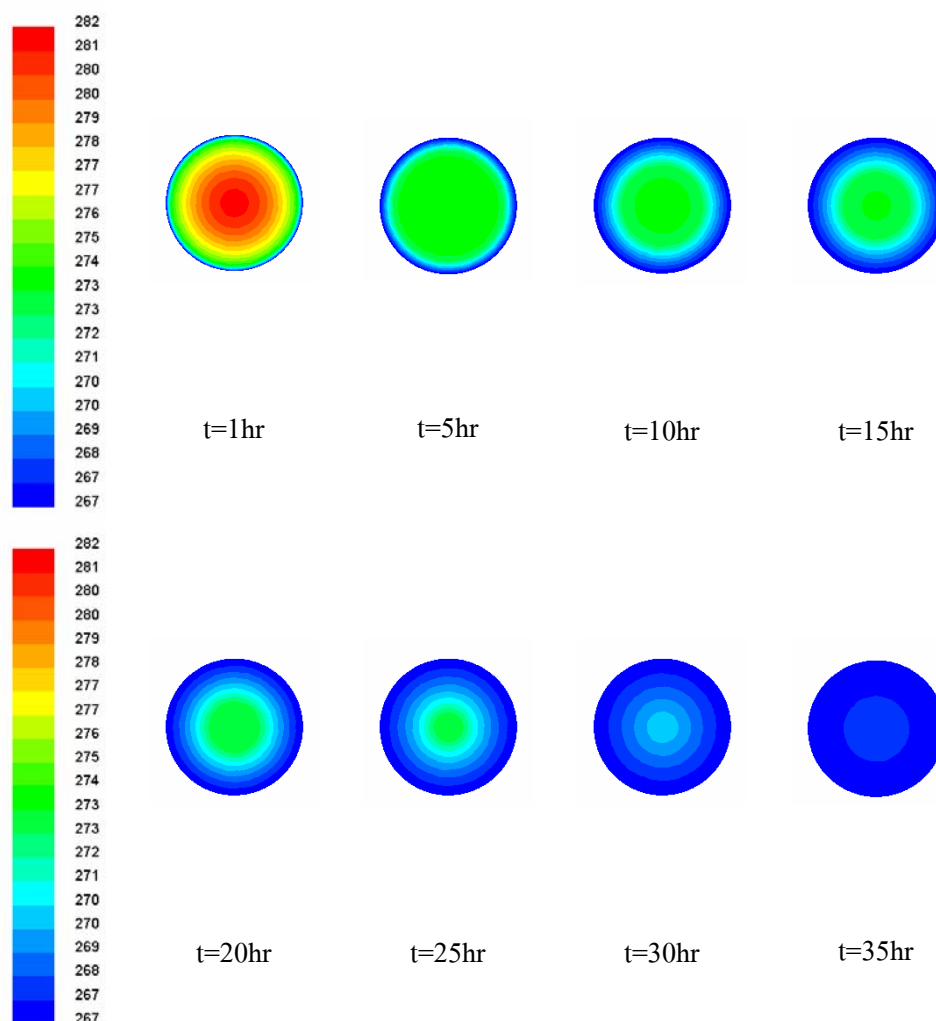
จากภาพที่ 71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y พบว่าที่เวลา 1 hr อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก $y=0$ ถึง $y=0.2\text{m}$ และคงที่ประมาณ 8°C จนถึงระยะ $y=1.1\text{ m}$ และเมื่อพิจารณาเวลาที่ 5 hr พบว่าเส้นกราฟเปลี่ยนไปโดยช่วงเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 1°C โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง $y=1.21\text{ m}$ เมื่อเวลา 30 hr ช่วงเปลี่ยนสถานะได้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเข้าสู่สถานะของแข็งทั้งหมดที่ระยะ $y=1.1\text{ m}$ โดยยังมีสถานะของเหลวที่ระยะ $y=1.2\text{ m}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนสุดของรูปทรง



ภาพที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

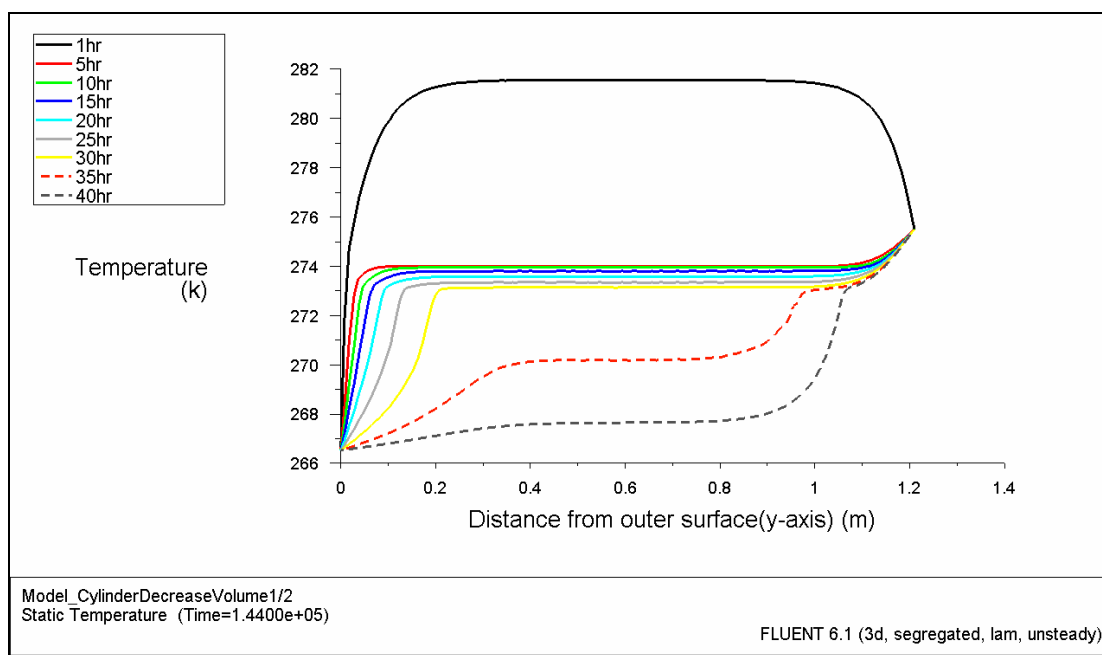


ภาพที่ 72 รูปทรงภาชนะบรรจุทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2102 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร



ภาพที่ 73 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงกระบอก ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

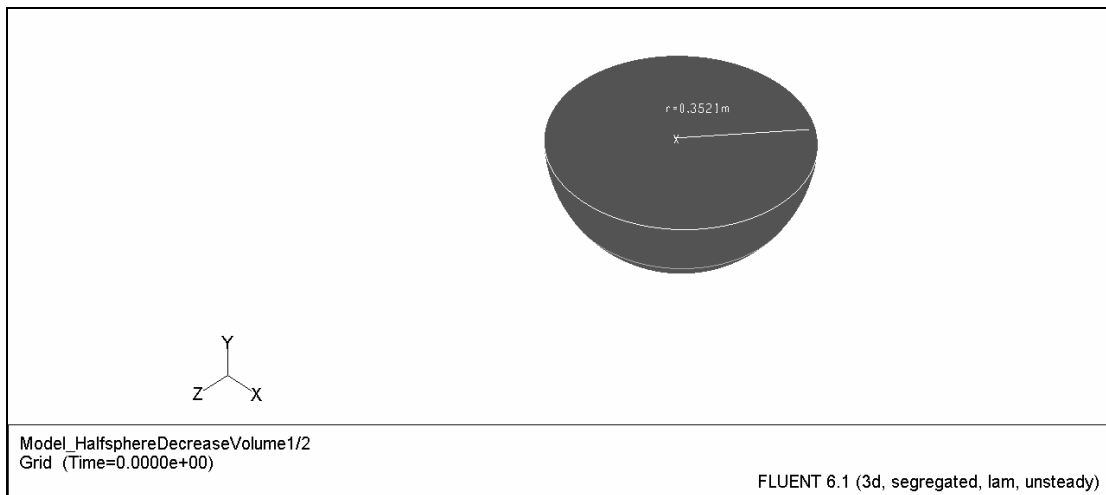
ในภาพที่ 72 แสดงรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.2 m x 0.78 m ความสูง 1.21 m ซึ่งเป็นรูปทรงที่ลดปริมาตรจากทรงกระบอกในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ โดยทำการจำลองที่สภาวะเดียวกัน ซึ่งผลจะถูกแสดงในระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0.65$ m จากภาพที่ 73 พบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะคล้ายกับปริมาตรเดิมแต่เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปจะลดลง โดยที่เวลา 35 hr อุณหภูมิได้ลดลงเท่ากับอุณหภูมิขอบเขตที่ประมาณ -6°C ซึ่งอยู่ในสถานะของแข็ง โดยตำแหน่งสุดท้ายที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้าที่สุดคือจุดกึ่งกลางระนาบ xz



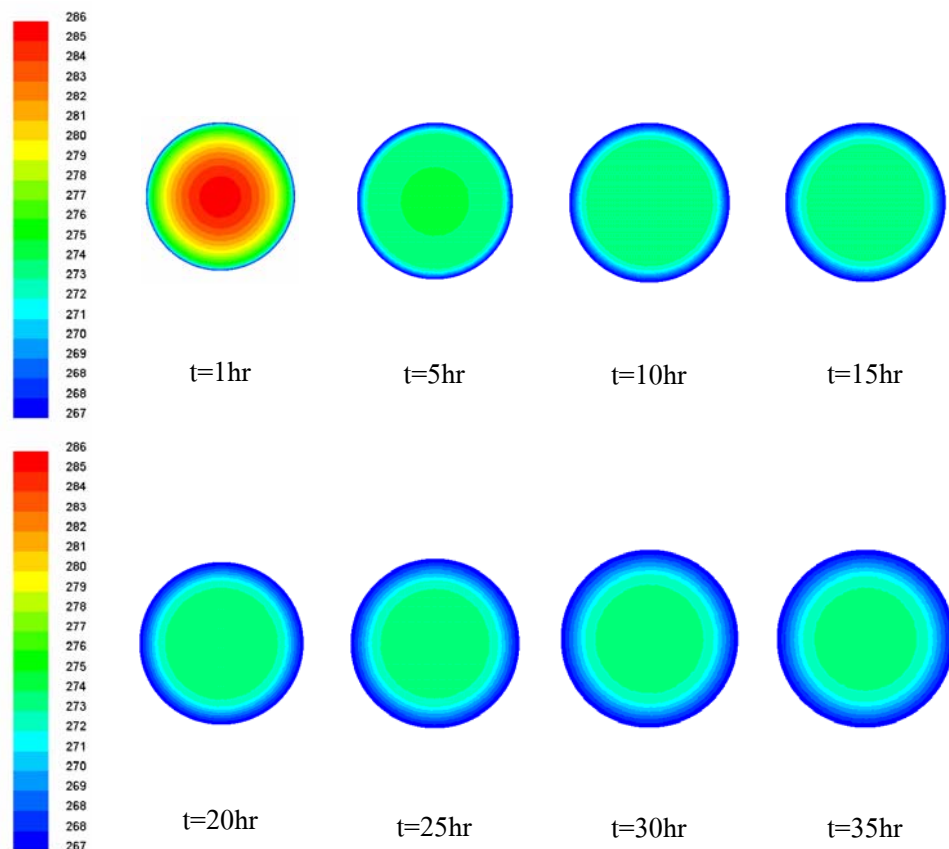
ภาพที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของ
ทรงกระบอก ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

จากภาพที่ 74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y พบว่าที่เวลา 1 hr อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก $y=0$ ถึง $y=0.2\text{ m}$ และคงที่ประมาณ 10°C จนถึงระยะ $y=1.1\text{ m}$ และเมื่อพิจารณาเวลาที่ 5 hr พบว่าเส้นกราฟเปลี่ยนไปโดยช่วงเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 1°C โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง $y=1.21\text{ m}$ เมื่อเวลา 35 hr ช่วงเปลี่ยนสถานะได้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเข้าสู่สถานะของแข็งทั้งหมดที่ระยะ $y=1.1\text{ m}$ โดยยังมีสถานะของเหลวที่ระยะ $y=1.2\text{ m}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนสุดของรูปทรง

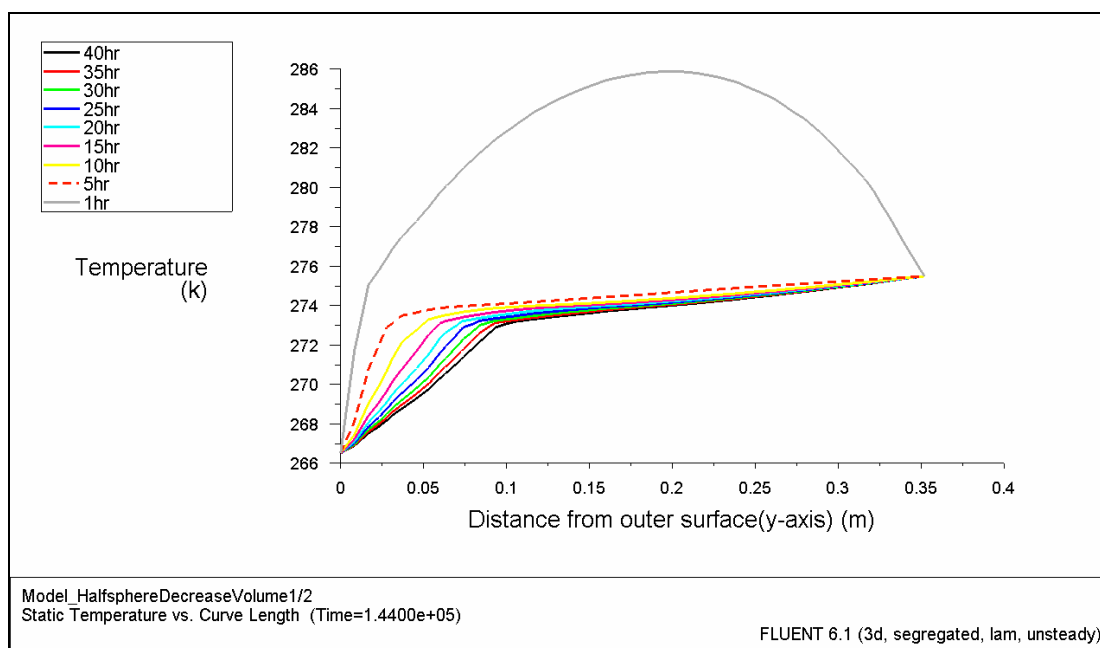
จากภาพที่ 75 แสดงรูปทรงครึ่งทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.404 m ความสูง 0.2021 m ซึ่งเป็นรูปทรงที่ลดปริมาตรจากครึ่งทรงกลมในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ โดยทำการจำลองที่สภาวะขอบเขตเดียวกัน ซึ่งผลจะถูกแสดงในระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y=0.65\text{ m}$ ในภาพที่ 76 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะคล้ายกับปริมาตรเดิม แต่เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปจะลดลง โดยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นชั้นอุณหภูมิต่ำกว่าจะขยายเข้าสู่กึ่งกลางระนาบ xz มากขึ้น ซึ่งพบว่าหลังจากเวลา 20 hr ชั้นอุณหภูมิและอุณหภูมิก่อนข้างคงที่ ทำให้ช่วงเปลี่ยนสถานะยังคงมีอุณหภูมิมากกว่า 0°C ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวอยู่ เกิดจากตำแหน่งที่พิจารณาใกล้กับผนังอากาศมากกว่าผนังน้ำเกลือ



ภาพที่ 75 รูปทรงภาชนะบรรจุทรงครึ่งทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.404 m ความสูง 0.202 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร



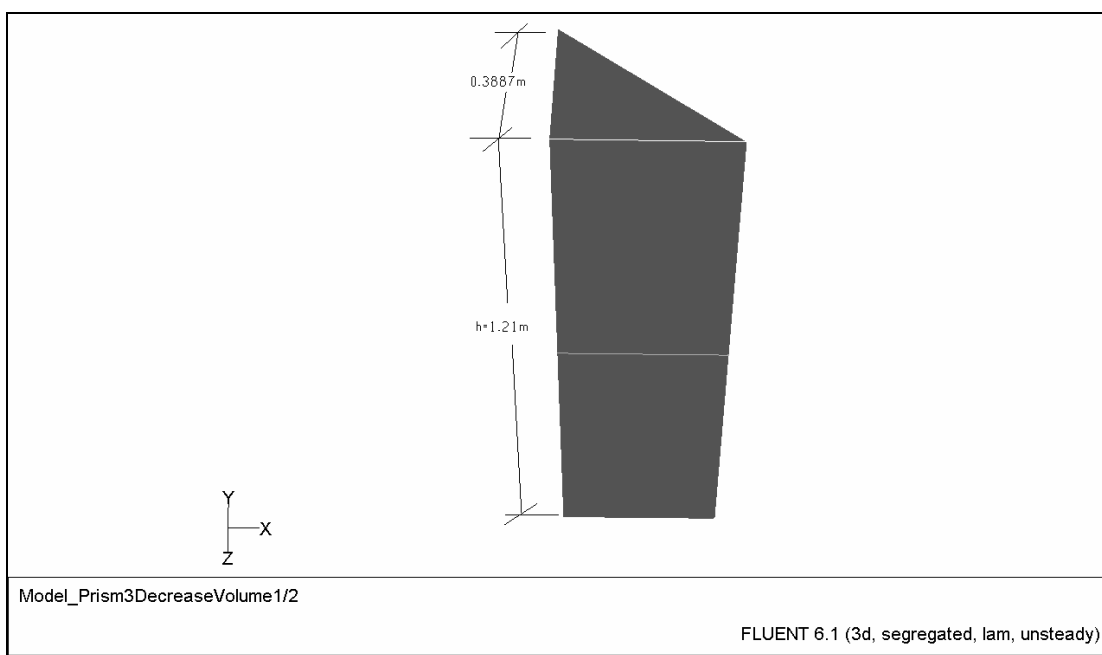
ภาพที่ 76 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของครึ่งทรงกลม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร



ภาพที่ 77 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของครึ่งทรงกลม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

จากภาพที่ 77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y พบว่าที่เวลา 10 hr อุณหภูมิจะลดต่ำกว่า 0°C ที่ระยะ $y=0$ ถึง $y=0.05$ m และเส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเพิ่มขึ้นจนถึงระยะ $y=0.35$ m เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นพบว่าลักษณะเส้นกราฟเพิ่มขึ้นต่อเนื่องและมีช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C เพิ่มขึ้นซึ่งมีสถานะเป็นของแข็ง ที่เวลา 40 hr สถานะของแข็งจะมีความสูงในแกน $y=0.09$ m

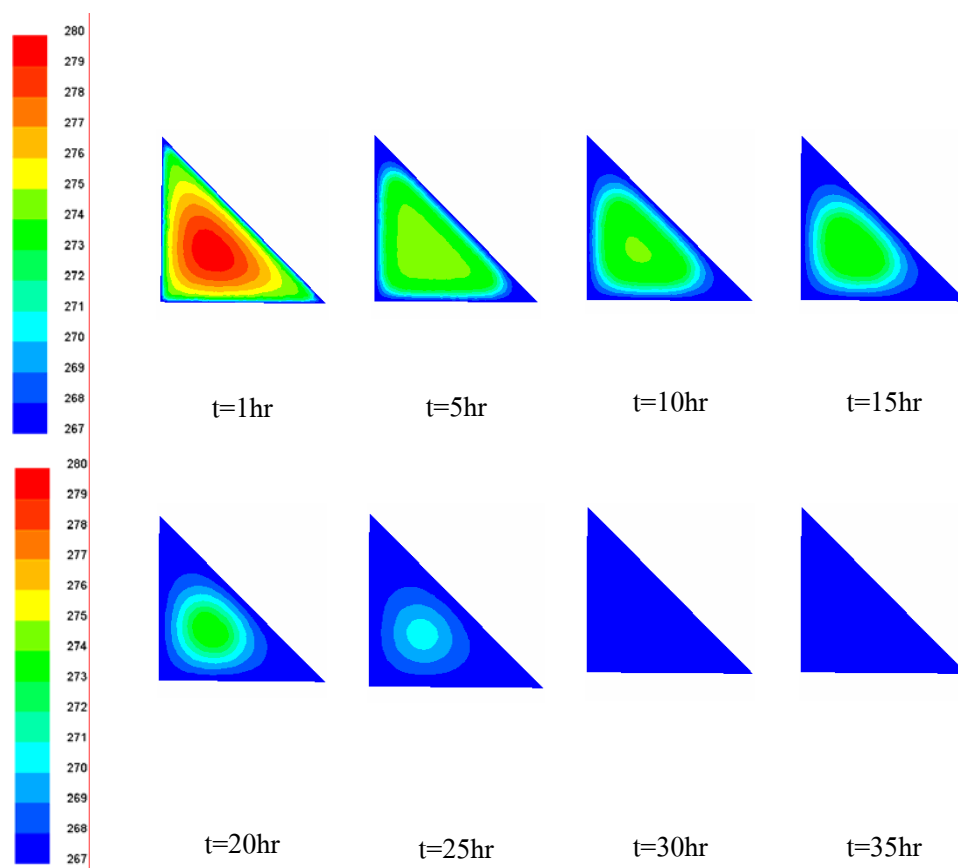
ซึ่งกล่าวได้ว่ารูปทรงครึ่งทรงกลมที่พิจารณาตำแหน่งต่ำกว่าผิวบน 0.15 m จะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยจะยังคงมีอุณหภูมิมากกว่า 0°C มากกว่าอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ซึ่งเป็นสถานะของแข็ง ทำให้รูปทรงครึ่งทรงกลมต้องใช้เวลาอย่างมากในการเปลี่ยนสถานะ เนื่องจากตำแหน่งที่พิจารณาอยู่ใกล้กับผนังอากาศมากกว่าผนังน้ำเกลือ จึงส่งผลให้อิทธิพลจากน้ำเกลือน้อยกว่าอิทธิพลจากอากาศ



ภาพที่ 78 รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมความยาวด้าน 0.3887 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

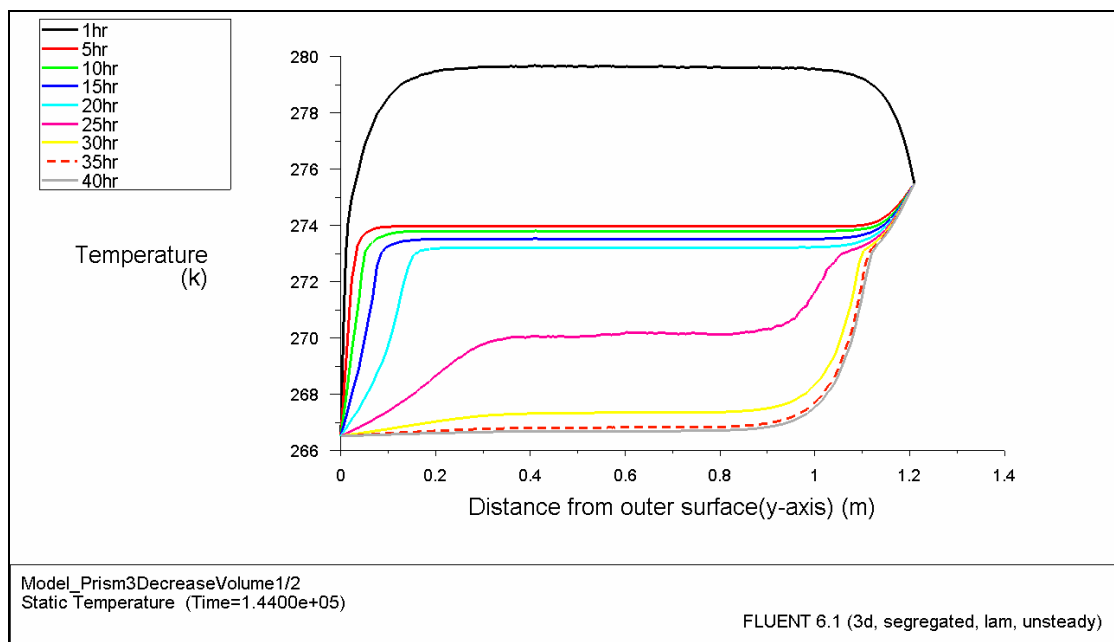
ในภาพที่ 78 แสดงรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมความยาวด้าน 0.3887 m ความสูง 1.21 m ซึ่งเป็นรูปทรงที่ลดปริมาตรจากปริซึมฐานสามเหลี่ยมในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ โดยทำการจำลองที่สภาวะเดียวกัน ซึ่งผลจะถูกแสดงในระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0.65$ m

ในภาพที่ 79 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะคล้ายกับปริมาตรเดิมแต่เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปจะลดลง ซึ่งที่เวลา 5 hr มีอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะอุณหภูมิกึ่งที่ 0°C และชั้นอุณหภูมิต่ำจะขยายตัวเข้าสู่กึ่งกลางระนาบ xz โดยที่เวลา 30 hr อุณหภูมิได้ลดลงเท่ากับอุณหภูมิขอบเขตที่ประมาณ -6°C โดยตำแหน่งสุดท้ายที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้าที่สุดคือจุดกึ่งกลางระนาบ xz โดยช่วงเปลี่ยนสถานะมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมและจะเปลี่ยนเป็นวงกลมเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าที่เวลา 15 hr ช่วงเปลี่ยนสถานะได้เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ทั้งหมด

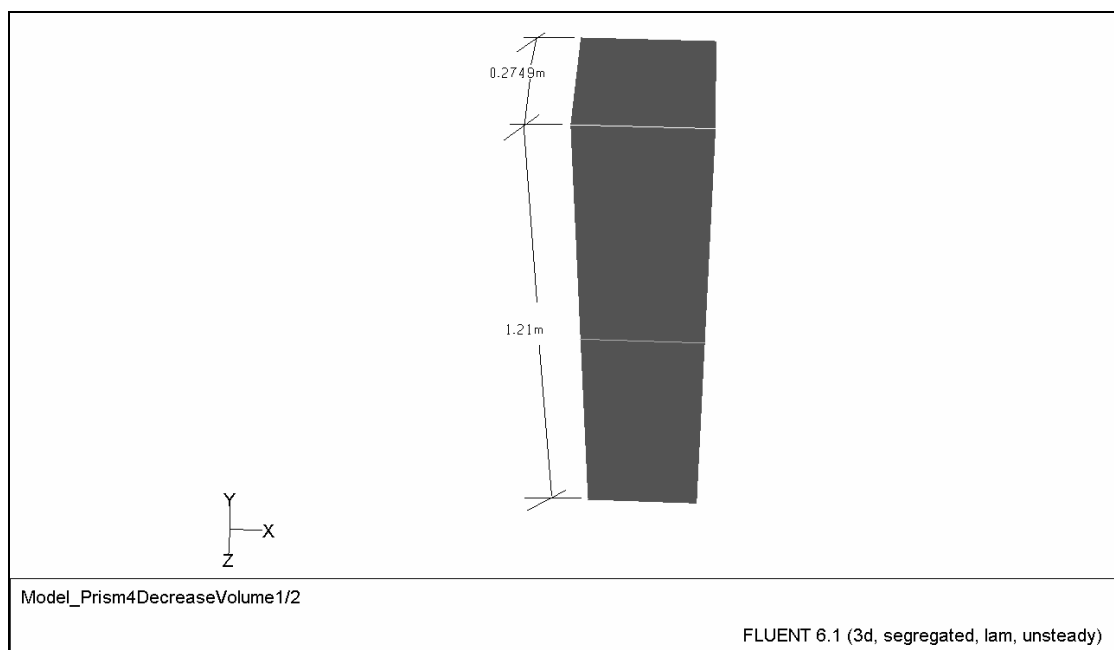


ภาพที่ 79 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

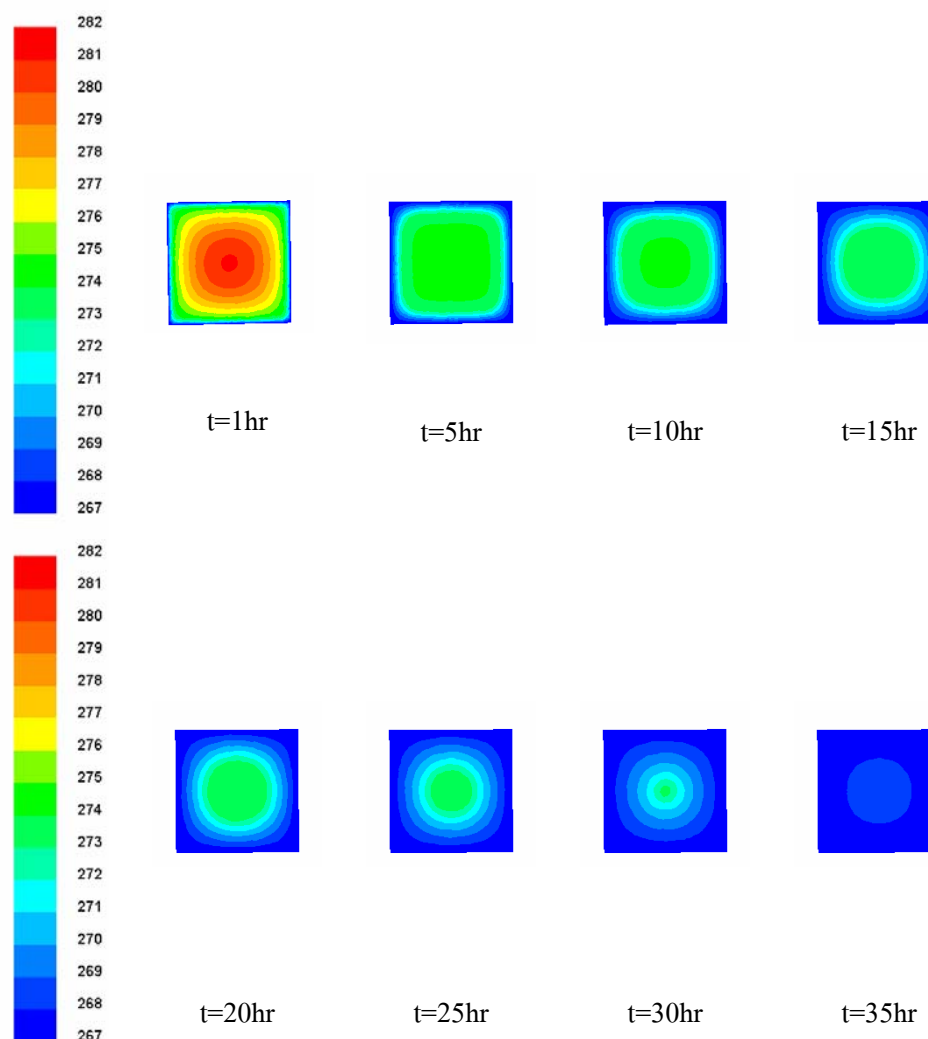
จากภาพที่ 80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y พบว่าที่เวลา 1 hr อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก $y=0$ ถึง $y=0.2\text{m}$ และคงที่ประมาณ 9°C จนถึงระยะ $y=1.1\text{ m}$ และเมื่อพิจารณาเวลาที่ 5 hr พบว่าเส้นกราฟเปลี่ยนไปโดยช่วงเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 1°C โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง $y=1.21\text{ m}$ เมื่อเวลา 25 hr ช่วงเปลี่ยนสถานะได้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเข้าสู่สถานะของแข็งทั้งหมดที่ระยะ $y=1.1\text{ m}$ โดยยังมีสถานะของเหลวที่ระยะ $y=1.2\text{ m}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนสุดของรูปทรง



ภาพที่ 80 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

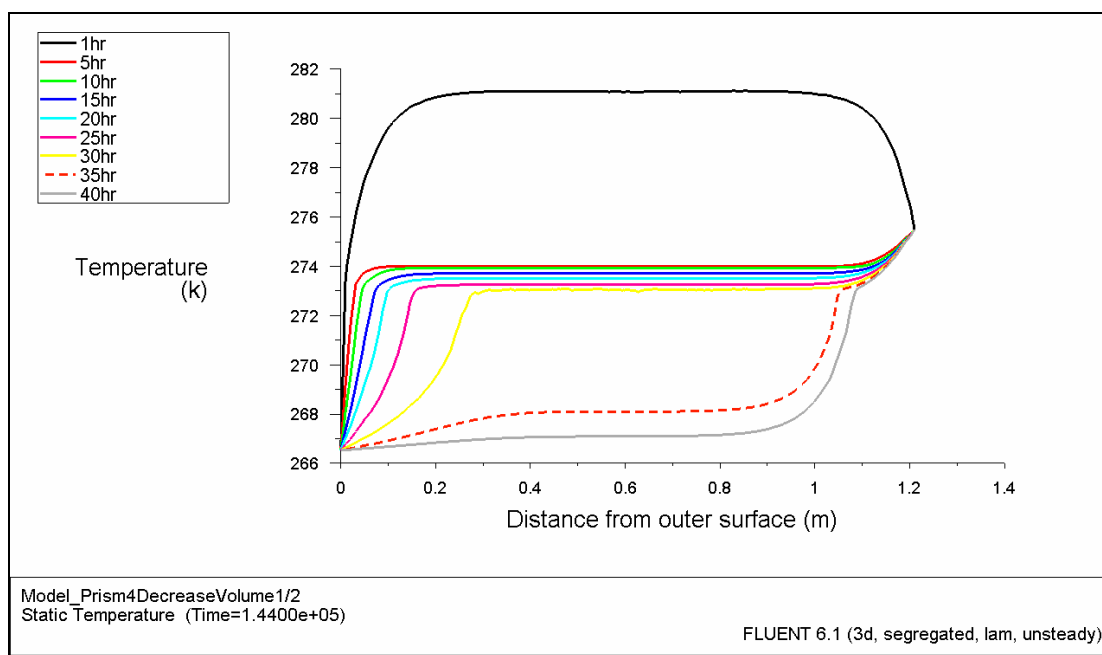


ภาพที่ 81 รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสความยาวด้าน 0.2749 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร



ภาพที่ 82 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

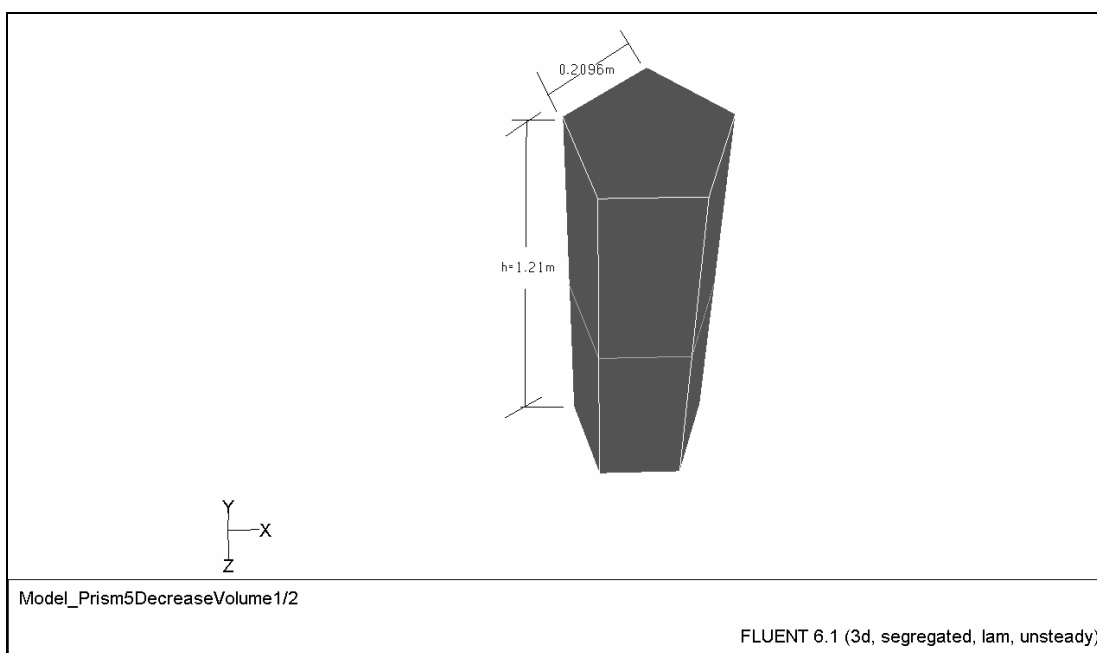
ในภาพที่ 81 แสดงรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสความยาวด้าน 0.3887 m ความสูง 1.21 m ซึ่งเป็นรูปทรงที่ลดปริมาตรจากปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ โดยทำการจำลองที่สภาวะเดียวกัน ซึ่งผลจะถูกแสดงในระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0.65\text{ m}$ จากภาพที่ 82 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะคล้ายกับปริมาตรเดิมแต่เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปจะลดลง ซึ่งที่เวลา 5 hr มีช่วงเปลี่ยนสถานะอุณหภูมิ 1°C บริเวณกึ่งกลางระนาบ โดยช่วงเปลี่ยนสถานะจะมีขนาดลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ที่เวลา 35 hr อุณหภูมิได้ลดลงเท่ากับอุณหภูมิขอบเขตที่ประมาณ -6°C อยู่ในสถานะของแข็ง โดยตำแหน่งสุดท้ายที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้าที่สุดคือจุดกึ่งกลางระนาบ xz



ภาพที่ 83 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

จากภาพที่ 83 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y พบว่าที่เวลา 1 hr อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก $y=0$ ถึง $y=0.2\text{ m}$ และคงที่ประมาณ 9°C จนถึงระยะ $y=1.1\text{ m}$ และเมื่อพิจารณาเวลาที่ 5 hr พบว่าเส้นกราฟเปลี่ยนไปโดยช่วงเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 1°C โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง $y=1.21\text{ m}$ เมื่อเวลา 35 hr ช่วงเปลี่ยนสถานะได้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเข้าสู่สถานะของแข็งทั้งหมดที่ระยะ $y=1.1\text{ m}$ โดยยังมีสถานะของเหลวที่ระยะ $y=1.2\text{ m}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนสุดของรูปทรง

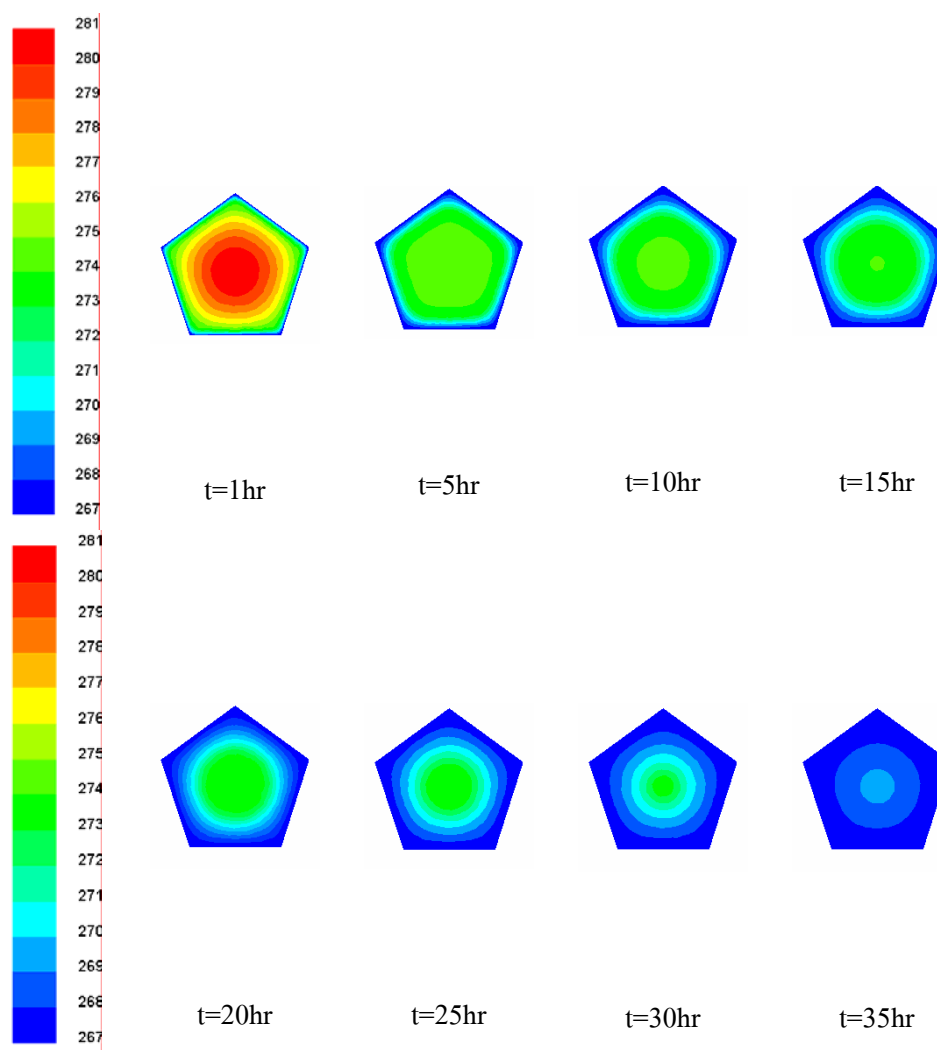
เวลาที่ใช้เมื่อเปรียบเทียบกับรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมพบว่ารูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมใช้เวลามากกว่าที่ตำแหน่งความสูงเดียวกัน โดยรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะประมาณ 25 hr โดยที่รูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสใช้เวลาประมาณ 35 hr ดังนั้นกล่าวได้ว่ารูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมเหมาะสมมากกว่ารูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส



ภาพที่ 84 รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยมความยาวด้าน 0.2096 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

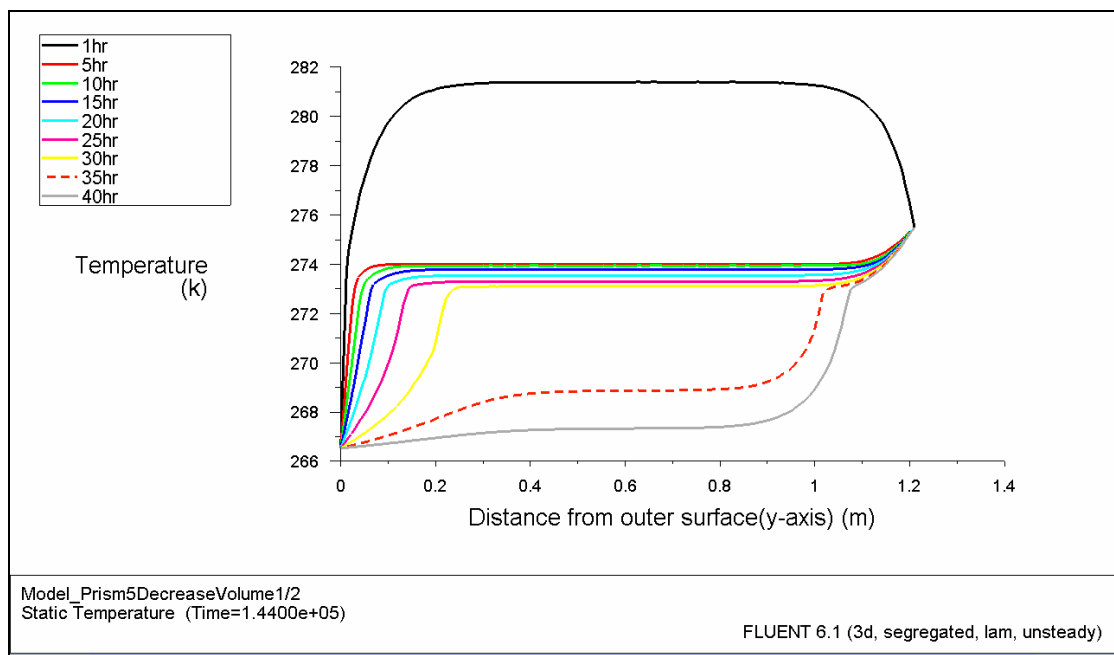
ในภาพที่ 84 แสดงรูปทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยมความยาวด้าน 0.2096 m ความสูง 1.21 m ซึ่งเป็นรูปทรงที่ลดปริมาตรจากปริซึมฐานห้าเหลี่ยมในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ โดยทำการจำลองที่สภาวะเดียวกัน ซึ่งผลจะถูกแสดงในระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0.65$ m จากภาพที่ 85 พบว่าที่เวลา 5 hr มีช่วงเปลี่ยนสถานะอุณหภูมิ 1°C บริเวณกึ่งกลางระนาบ โดยช่วงเปลี่ยนสถานะจะมีขนาดลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ที่เวลา 35 hr อุณหภูมิได้ลดลงประมาณ -6°C บริเวณอุณหภูมิชั้นนอกโดยมีอุณหภูมิจุดกึ่งกลางประมาณ -4°C ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้าที่สุดในระนาบ xz

เมื่อเปรียบเทียบรูปทรงที่ผ่านมาพบว่ารูปทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยมใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะมากกว่ารูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมและฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่วงเปลี่ยนสถานะเป็นรูปห้าเหลี่ยมและจะเปลี่ยนรูปเป็นวงกลมเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น โดยมีทิศทางเข้าสู่จุดกึ่งกลางระนาบ xz

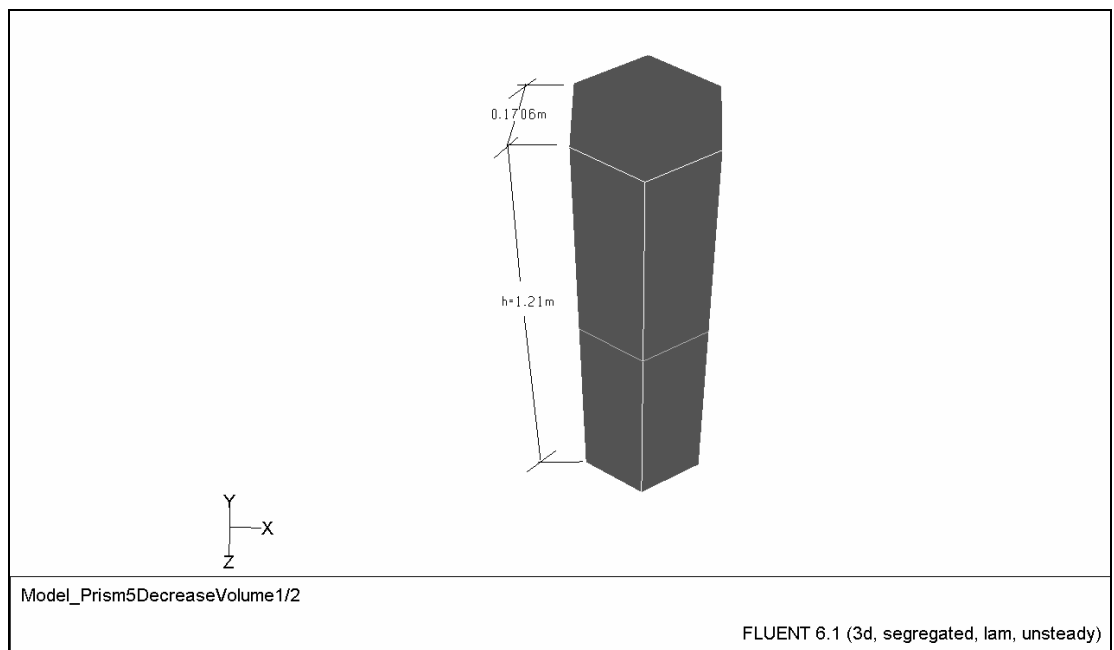


ภาพที่ 85 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

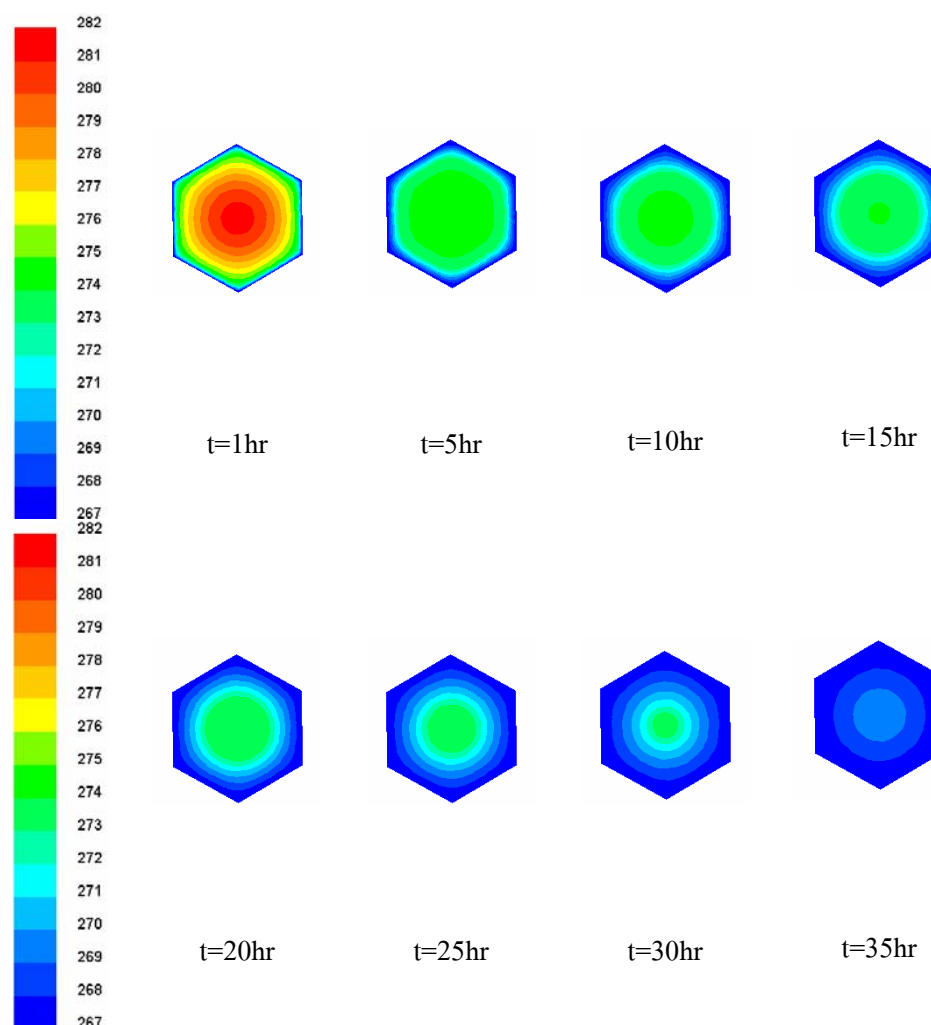
จากภาพที่ 86 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y พบว่าที่เวลา 1 hr อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก $y=0$ ถึง $y=0.2\text{ m}$ และคงที่ประมาณ 11°C จนถึงระยะ $y=1.1\text{ m}$ และเมื่อพิจารณาเวลาที่ 5 hr พบว่าเส้นกราฟเปลี่ยนไปโดยช่วงเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 1°C โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง $y=1.21\text{ m}$ เมื่อเวลา 35 hr ช่วงเปลี่ยนสถานะได้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเข้าสู่สถานะของแข็งทั้งหมดที่ระยะ $y=1.1\text{ m}$ โดยยังมีสถานะของเหลวที่ระยะ $y=1.2\text{ m}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนสุดของรูปทรง โดยลักษณะเส้นกราฟจะคล้ายกับรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส



ภาพที่ 86 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

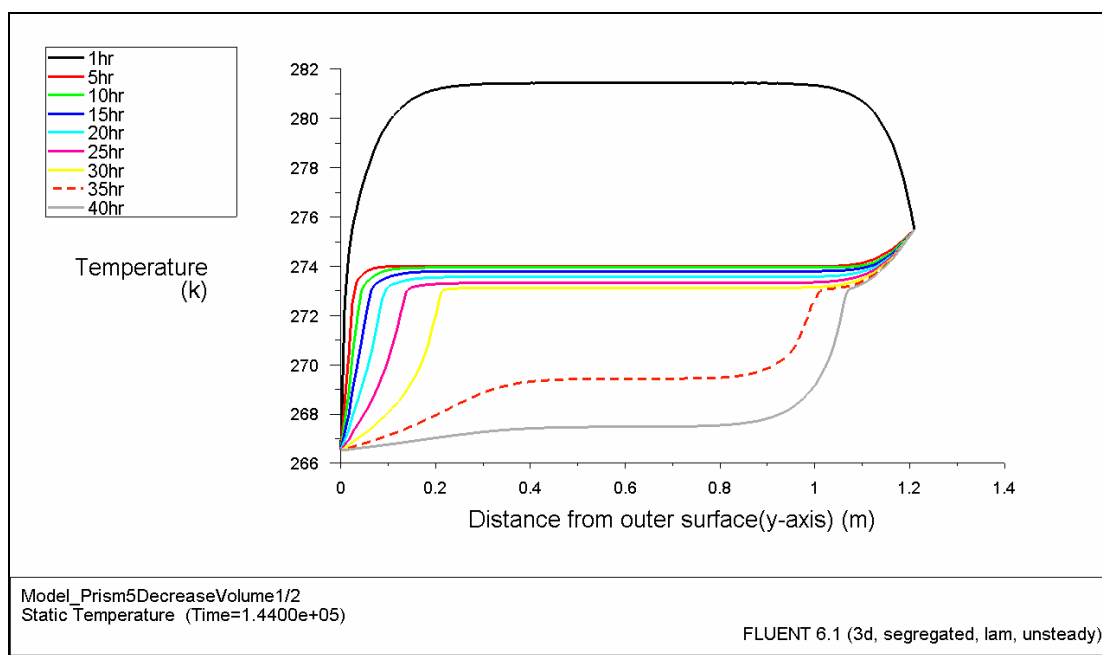


ภาพที่ 87 รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยมความยาวด้าน 0.1706 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร



ภาพที่ 88 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

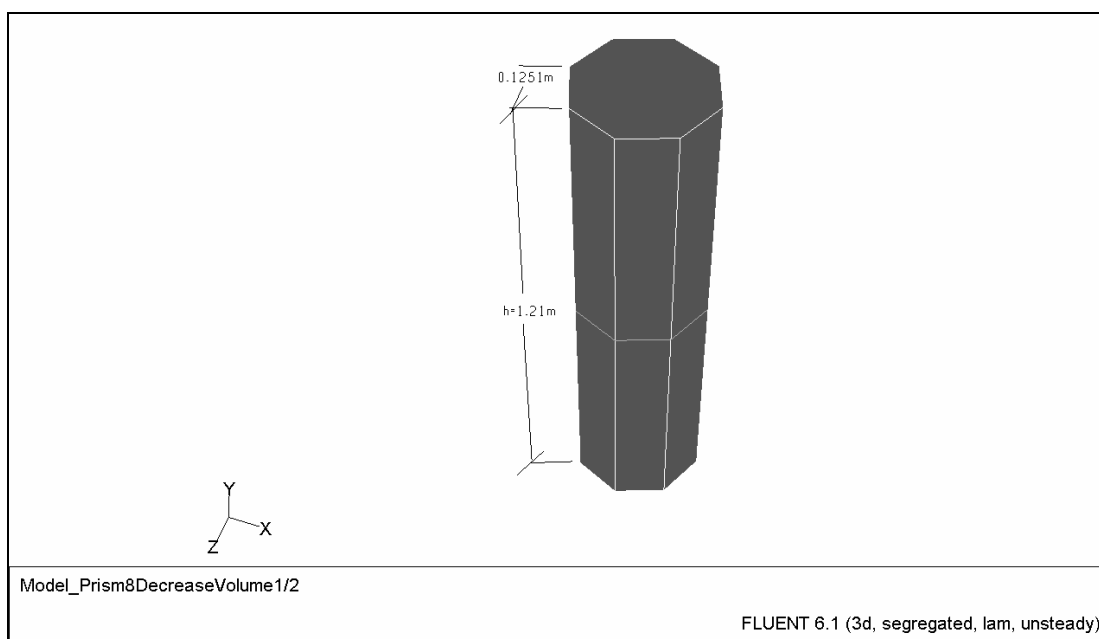
ในภาพที่ 87 แสดงรูปทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยมความยาวด้าน 0.1706 m ความสูง 1.21 m ซึ่งเป็นรูปทรงที่ลดปริมาตรจากปริซึมฐานหกเหลี่ยมในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ โดยทำการจำลองที่สภาวะเดียวกัน ซึ่งผลจะถูกแสดงในระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0.65$ m จากภาพที่ 88 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะคล้ายกับปริมาตรเดิมแต่เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปลดลง ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับรูปทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยม ซึ่งเวลา 5 hr มีช่วงเปลี่ยนสถานะอุณหภูมิ 1°C บริเวณกึ่งกลางระนาบ โดยช่วงเปลี่ยนสถานะจะมีขนาดลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ที่เวลา 35 hr อุณหภูมิได้ลดลงประมาณ -6°C บริเวณอุณหภูมิชั้นนอกโดยมีอุณหภูมิจุดกึ่งกลางประมาณ -4°C ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้าที่สุดในระนาบ xz



ภาพที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

จากภาพที่ 89 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y พบว่าที่เวลา 1 hr อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก $y=0$ ถึง $y=0.2\text{m}$ และคงที่ประมาณ 11°C จนถึงระยะ $y=1.1\text{ m}$ และเมื่อพิจารณาเวลาที่ 5 hr พบว่าเส้นกราฟเปลี่ยนไปโดยช่วงเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 1°C โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง $y=1.21\text{ m}$ เมื่อเวลา 35 hr ช่วงเปลี่ยนสถานะได้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเข้าสู่สถานะของแข็งทั้งหมดที่ระยะ $y=1.1\text{ m}$ โดยยังมีสถานะของเหลวที่ระยะ $y=1.2\text{ m}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนสุดของรูปทรง

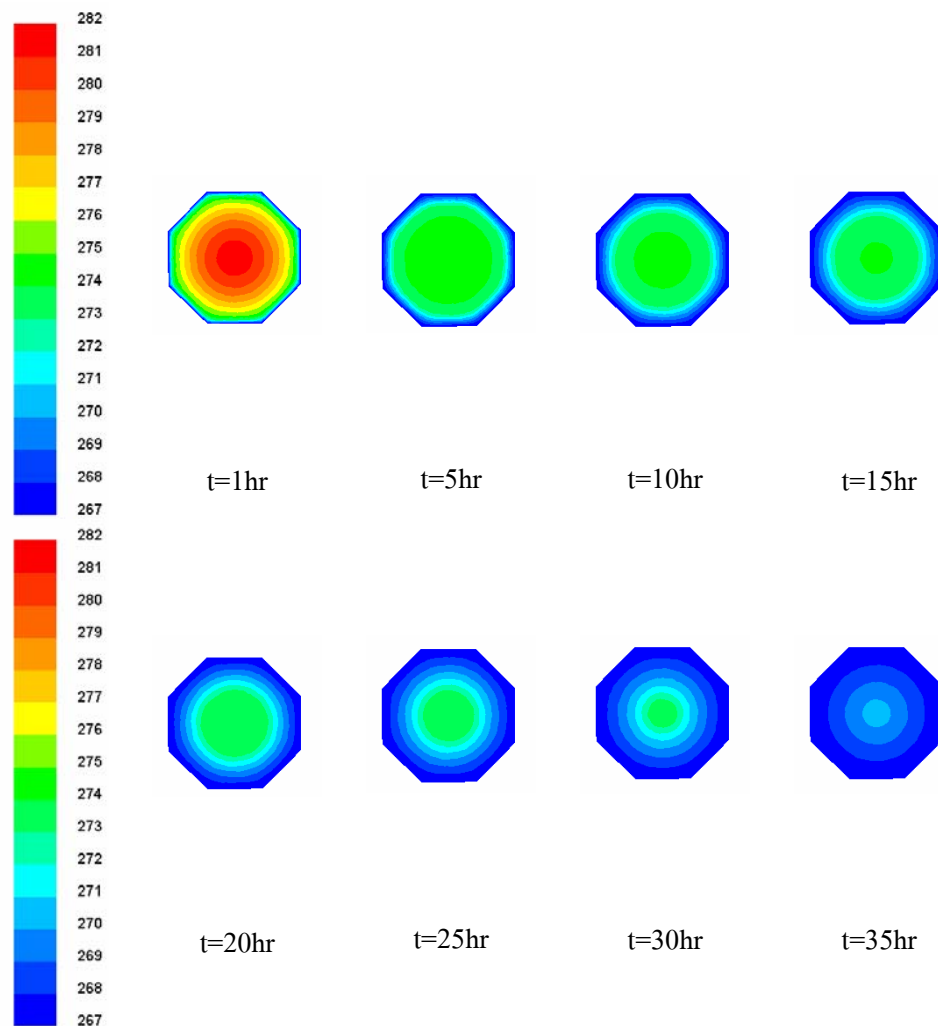
โดยลักษณะเส้นกราฟจะคล้ายกับรูปทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยมเนื่องจากลักษณะของพื้นที่หน้าตัดรูปร่างใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาจากพื้นที่ผิวโดยรอบของรูปทรงแล้วมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะพบว่ารูปทรงปริซึมฐานหกเหลี่ยมจะใช้เวลามากกว่ารูปทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยมเล็กน้อย



ภาพที่ 90 รูปทรงภาชนะบรรจุทรงปริซึมฐานแปดเหลี่ยมความยาวด้าน 0.1251 m ความสูง 1.21 m ในกรณีศึกษาการปริมาตร

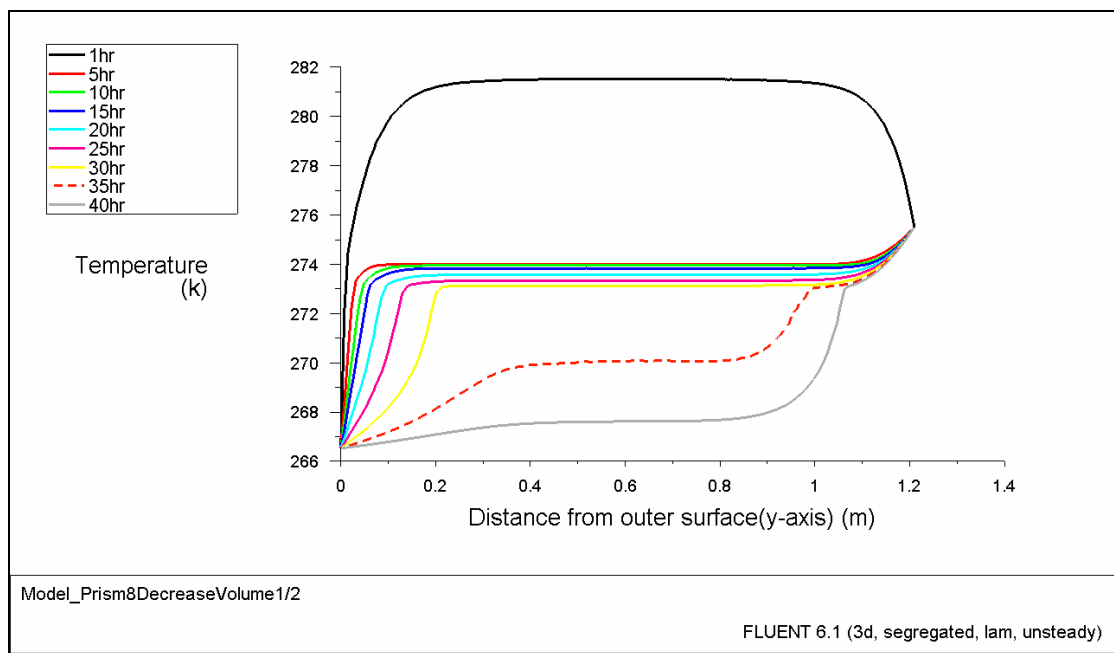
ในภาพที่ 90 แสดงรูปทรงปริซึมฐานแปดเหลี่ยมที่มีความยาวด้าน 0.1706 m ความสูง 1.21 m ซึ่งเป็นรูปทรงที่ลดปริมาตรจากปริซึมฐานแปดเหลี่ยมในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุ โดยทำการจำลองที่สภาวะเดียวกัน ซึ่งผลจะถูกแสดงในระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0.65$ m

จากภาพที่ 91 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะคล้ายกับปริมาตรเดิมแต่เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปลดลง ซึ่งเวลา 5 hr มีช่วงเปลี่ยนสถานะอุณหภูมิ 1°C บริเวณกึ่งกลางระนาบ โดยช่วงเปลี่ยนสถานะจะมีขนาดลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ที่เวลา 35 hr อุณหภูมิได้ลดลงประมาณ -6°C ในบริเวณอุณหภูมิชั้นนอก โดยมีอุณหภูมิจุดกึ่งกลางประมาณ -4°C ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้าที่สุดในระนาบ xz ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีความคล้ายกับรูปทรงปริซึมฐานห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยม โดยจะมีช่วงเปลี่ยนสถานะเป็นรูปพื้นที่หน้าตัดและเปลี่ยนรูปเป็นวงกลม เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่กลางระนาบ xz

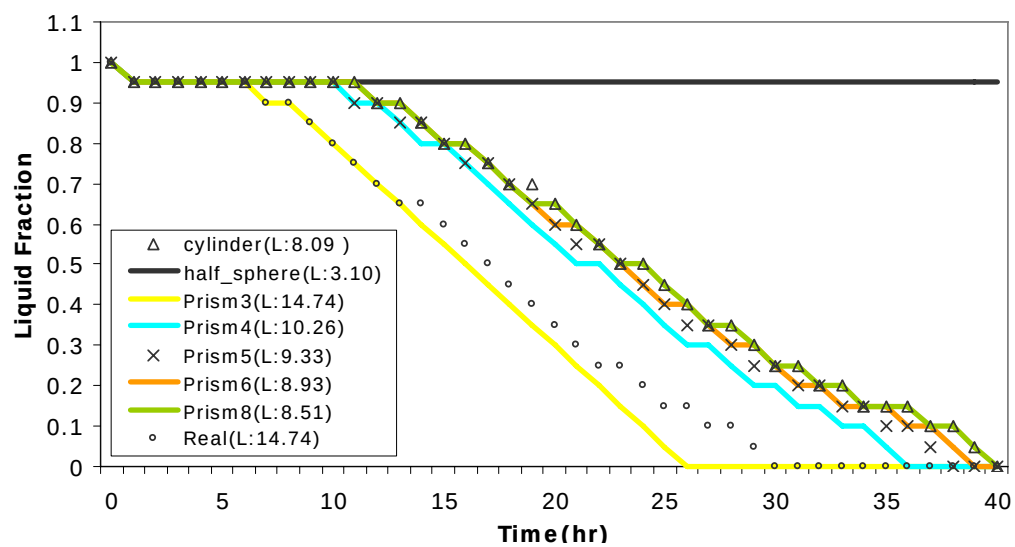


ภาพที่ 91 กราฟแสดงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานแปดเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

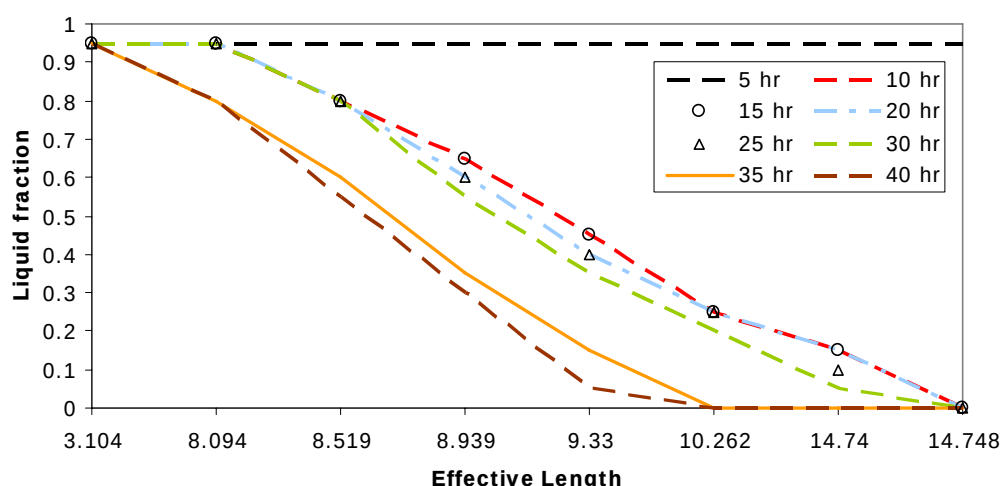
จากภาพที่ 92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน y พบว่าที่เวลา 1 hr อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก $y=0$ ถึง $y=0.2\text{m}$ และคงที่ประมาณ 11°C จนถึงระยะ $y=1.1\text{ m}$ และเมื่อพิจารณาเวลาที่ 5 hr พบว่าเส้นกราฟเปลี่ยนไปโดยช่วงเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 1°C โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่ง $y=1.21\text{ m}$ เมื่อเวลา 35 hr ช่วงเปลี่ยนสถานะได้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเข้าสู่สถานะของแข็งทั้งหมดที่ระยะ $y=1.1\text{ m}$ โดยยังมีสถานะของเหลวที่ระยะ $y=1.2\text{ m}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนสุดของรูปทรง



ภาพที่ 92 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของทรงปริซึมฐานแปดเหลี่ยม ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร



ภาพที่ 93 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลาที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวขอบเขตบน 15 cm ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร



ภาพที่ 94 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวเทียบกับความยาวประสิทธิผล ในรูปทรงปริมาตร 0.0915 m^3

ภาพที่ 93 แสดง อัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลา ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็ง กรณีศึกษาการลดปริมาตรลงครึ่งหนึ่ง ณ ตำแหน่งต่ำกว่าขอบบน 0.15 m พบว่า เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนของเหลว = 0.5 มีลักษณะคล้ายกับกรณีศึกษารูปทรงภาชนะ โดยรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยม, ห้าเหลี่ยม, หกเหลี่ยม, แปดเหลี่ยมและทรงกระบอกจะใช้เวลาใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 25 hr โดยรูปทรงครึ่งทรงกลมมีอัตราส่วนของเหลวคงที่ = 1 โดยรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งเป็นรูปทรงจำลองสถานะจริงใช้เวลาประมาณ 17 hr และปริซึมฐานสามเหลี่ยมใช้เวลาประมาณ 16 hr

จากภาพที่ 94 เปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวเทียบกับความยาวประสิทธิผล ในรูปทรงปริมาตร 0.0915 m^3 พบว่าความยาวประสิทธิผลแปรผกผันกับเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะ โดยความยาวประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะลดลง เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 7 พบว่ารูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมมีความยาวประสิทธิผลมากที่สุดคือ 14.748 m จึงทำให้ใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะน้อยที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในกรณีปริมาตร 0.0915 m^3 กับปริมาตร 0.183 m^3 พบว่าปริซึมฐานสามเหลี่ยมใช้เวลาลดลงจาก 38 เป็น 16 hr ปริซึมฐาน 4, 5, 6, 7, 8 เหลี่ยมและทรงกระบอกใช้เวลาลดลงจาก 60 hr เป็น 25 hr ที่ Liquid fraction 0.5 จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าเวลาที่ใช้ลดลงมากกว่าครึ่งหนึ่งเมื่อปริมาตรลดลงครึ่งหนึ่ง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ในการเก็บข้อมูลจากโรงงานพบว่าอุณหภูมิน้ำเกลือและอุณหภูมิอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งของช่องน้ำแข็งบนบ่อทำความเย็น สรุปได้ว่าสภาวะขอบเขตการทำความเย็นไม่คงที่ตลอดช่วงการผลิต

2. โปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ fluent สามารถใช้จำลองปัญหาการขึ้นรูปน้ำแข็งช่องได้ โดยรูปแบบของปัญหาถูกกำหนดให้เป็นปัญหาแบบ solidification problem ที่มีสภาวะขอบเขตคือค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิน้ำเกลือและอุณหภูมิอากาศ ซึ่งในการจำลองจะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดในการทดลองที่ 4 ที่มีความคลาดเคลื่อน 3.7 % โดยความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 1 %

3. จากกรณีศึกษาสภาวะขอบเขต ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผนังด้านบน 15 cm และที่ อัตราส่วนของเหลว = 0.5 พบว่าเมื่อกำหนดให้อุณหภูมิน้ำเกลือคงที่และทำการเพิ่มอุณหภูมิอากาศทุก 1°C พบว่าใช้เวลาเพิ่มขึ้น 4 hr ในกรณีกำหนดให้อุณหภูมิอากาศคงที่และเพิ่มอุณหภูมิน้ำเกลือทุก 1°C จะทำให้เวลาเพิ่มขึ้น 3 hr จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิอากาศมีผลทำให้เวลาเปลี่ยนแปลงมากกว่าอุณหภูมิน้ำเกลือ ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผนังด้านบน 15 cm

4. จากกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจุที่ปริมาตร 0.183 m^3 ที่อัตราส่วนของเหลว=0.5 พบว่ารูปทรงที่ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ ปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งเป็นรูปทรงจริงในการผลิต ซึ่งใช้เวลาประมาณ 31 hr รูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม ใช้เวลาประมาณ 38 hr โดยมีรูปทรงครึ่งทรงกลมใช้เวลามากที่สุด จากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อเวลาคือความยาวประสิทธิผล ซึ่งเมื่อความยาวประสิทธิผลมากขึ้นจะทำให้ใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะน้อยลง ซึ่งปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาวประสิทธิผลมากที่สุดคือ 16.153 m

5. จากกรณีศึกษาการลดปริมาตรลงครึ่งหนึ่ง ที่อัตราส่วนของเหลว= 0.5 พบว่ารูปทรงที่ใช้เวลาน้อยที่สุดคือรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม ใช้เวลาประมาณ 16 hr ซึ่งน้อยกว่ารูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งเป็นรูปทรงจริงที่ใช้เวลาประมาณ 17 hr เมื่อพิจารณาจากความยาวประสิทธิผลพบว่าปริซึมฐานสามเหลี่ยมมีค่ามากที่สุดคือ 14.748 m และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้เมื่อลดปริมาตรลง

ครึ่งหนึ่งพบว่าเวลาที่ใช้ลดลงมากกว่าครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับปริมาตรเดิม สรุปได้ว่าเมื่อปริมาตรลดลงครึ่งหนึ่งจะทำให้เวลาที่ใช้ลดลงมากกว่าครึ่งหนึ่ง

6. ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของน้ำแข็งช่องสามารถพิจารณาได้จากความยาวประสิทธิผลของรูปทรงน้ำแข็งช่องนั้น ซึ่งความยาวประสิทธิผลที่เหมาะสมคือ 14 ถึง 17 เมตร โดยรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าและรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมเป็นรูปทรงของช่องน้ำแข็งที่เหมาะสมที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. สภาวะขอบเขตในการจำลองถูกกำหนดใช้แบบคงที่ เนื่องจากไม่สามารถกำหนดรูปแบบที่แน่นอนได้ จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในบริเวณขีดผนังขอบเขต

2. การจำลองด้วยโปรแกรม fluent มีข้อจำกัดเรื่องความละเอียดของการคำนวณเนื่องจากทรัพยากรทางด้านคอมพิวเตอร์ เมื่อกำหนดขนาดกริดและช่วงเวลาการคำนวณเล็กมาก ๆ จะทำให้คอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำงานได้

3. กรณีศึกษารูปทรงภาชนะ พบว่ารูปทรงที่ดีควรมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้ำเกลือมากและพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศน้อย โดยในการปรับปรุงรูปทรงควรเพิ่มความสูงของช่องน้ำแข็งให้มาก และลดพื้นที่หน้าตัดให้เล็กลงซึ่งจะทำให้ความยาวประสิทธิผลมากขึ้นซึ่งจะทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ดี และใช้เวลาในการขึ้นรูปน้ำแข็งน้อยลง

4. ในงานวิจัยพบว่าการลดปริมาตรลงครึ่งหนึ่งจะทำให้เวลาที่ใช้สั้นกว่าครึ่งหนึ่งของปริมาตรเดิม ซึ่งในงานวิจัยกำหนดสภาวะขอบเขตเป็นน้ำแข็งก้อนเดียวที่ไม่มีผลกระทบจากน้ำแข็งก้อนข้างเคียง ดังนั้นในสภาวะจริงเวลาที่ใช้ในการผลิตปริมาตรลงอาจจะมากกว่าในการวิจัยเนื่องจากผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนของน้ำแข็งภายในบ่อทั้งหมด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ก้อง อุทัยภาส. 2545. การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จุฬารัตน์ เบญจปิยะพร และ สมนึก ชีระกุลพิศุทธิ์. 2548. ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบกริด อยู่หนึ่งในการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์. **วิศวกรรมสาร มข** 32 (2): 197-205
- รจนา ประไพพน. 2545. การจำลองแบบการขึ้นรูปของน้ำแข็งโดยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Abdul, M. 2005. **Numerical investigations of melting of ice in a box.** Master of Science, King Fahd University of petroleum & minerals, Saudi Arabia.
- Akyurt, M., G. Zaki and B. Habeebullah. 2002. Freezing phenomena in ice–water systems. **Energy Conversion and Management.** 43: 1773-1789.
- Babak, K.S. and M.M. Ardehali. 2003. Numerical simulation of water solidification phenomenon for ice-on-coil thermal energy storage application. **Energy Conversion and Management.** 44: 85-92.
- Bejan, A. 1992. **Heat transfer.** John Wiley & Sons Inc., New York.
- Bermudez, A. and M.V. Otero. 2003. Numerical solution of a three-dimensional solidification problem in aluminium casting. **Finite elements in analysis and design.** 40: 1885-1906.
- Bolidar, S. 1995. Stefan's work on solid-liquid phase changes. **Engineering Analysis with Boundary Elements.** 16: 83-92.

Conde, R., M.T. Parra, F. Castro, J.M. Villafruela, M.A. Roriguez and C. Mendez. 2004.

Numerical model for two-phase solidification problem in a pipe. **Applied Thermal Engineering**. 24: 2501-2509.

Dipankar, C. and S. Chakraborty. 2007. An enthalpy-source based lattice

Boltzmann model for conduction dominated phase change of pure substances.

International Journal of Thermal Sciences. 47: 552-559.

Giovanni, C. and S. Piva. 2002. Experimental and numerical investigation of the

steady periodic solid-liquid phase-change heat transfer. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 45: 4181-4190.

Ismail, K.A.R., J.R. Henríquez and T.M. da Silva. 2003. A parametric study on ice formation

inside a spherical capsule. **International Journal of Thermal Sciences**. 42: 881-887.

Kamal, A.R.I. and A. Padilha. 2000. A study on transient ice formation of laminar flow inside

externally supercooled rectangular duct. **Applied Thermal Engineering**. 20: 1709-1730.

Lock, G.S.H. and G.S.H. Oxford. 1994. **Latent heat transfer: an introduction to**

fundamentals. Oxford University Press., England.

Muralidhar, K. and T. Sundararajan. 1995. **Computational fluid flow and heat transfer**. New

delhi: Narosa Publishing House., New delhi.

Orrington, E.D. 1973. **Heat transfer in liquid metals**. International Center for Heat

and New York:Pergamon Press., New York.

Scanion, T.J. and M.T. Stickland. 2001. An experimental and numerical investigation of natural

convection melting. **Heat Mass Transfer**. 28 (2): 181-190.

- Stefania, Z., P.M. Pavel and M. Constantinescu. 1999. Study of one dimensional solidification with free convection in infinite plate geometry. **Energy Conversion & Management**. 40: 261-271.
- Voller, V., C.R. Swanminathan and B.G. Thomas. 1990. Fixed grid techniques for phase change problem: A review. **Int J Numer. Methods Eng**. 30: 875-898.
- Zivkovic, B. and I. Fujii. 2001. An Analysis of Isothermal Phase Change of Phase Change Material Within Rectangular and Cylindrical Containers. **Solar Energy**. 70 (1): 51-61.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของน้ำในสถานะของแข็งและของเหลว

ตารางผนวกที่ ก1 ค่า Heat capacity ของน้ำ, น้ำแข็งและน้ำทะเล

Heat Capacity Of Fresh Water		Heat Capacity Of Ice		Heat Capacity Of Sea Water	
Temperature (degrees F)	Btu/lbF	Temperature (degrees F)	Btu/lbF	Temperature (degrees F)	Btu/lbF
32	1.007	-50	0.400	30	0.936
40	1.004	-40	0.413	40	0.935
50	1.001	-30	0.426	50	0.934
60	1.000	-20	0.438	60	0.932
70	0.999	-10	0.451	70	0.931
80	0.998	0	0.464	80	0.930
90	0.998	10	0.476	90	0.928
100	0.998	20	0.489	100	0.927
110	0.998	30	0.502		
120	0.998				

ตารางผนวกที่ ก2 ค่า Thermal conductivity ของน้ำ, น้ำแข็งและน้ำทะเล

Thermal Conductivity Of Fresh Water		Thermal Conductivity Of Ice		Thermal Conductivity Of Sea Water	
Temperature (degrees F)	Btu _{th} in/ (h ft ² F)	Temperature (degrees F)	Btu _{th} in/ (h ft ² F)	Temperature (degrees F)	Btu _{th} in/ (h ft ² F)
32	3.932	-50	18.754	30	3.890
40	3.979	-40	18.347	40	3.950
50	4.037	-30	17.939	50	4.010
60	4.037	-20	17.531	60	4.070
70	4.154	-10	17.123	70	4.130
80	4.212	0	16.715	80	4.190
90	4.271	10	16.308	90	4.250
100	4.329	20	15.900	100	4.310
110	4.387	30	15.492		
120	4.446				

ตารางผนวกที่ ก3 ค่า Saturated vapor pressure ของน้ำ, น้ำแข็งและน้ำทะเล

Saturated Vapor Pressure of Fresh Water		Saturated Vapor Pressure of Ice		Saturated Vapor Pressure of Sea Water	
Temperature (degrees F)	Pounds per square inch	Temperature (degrees F)	Pounds per square inch	Temperature (degrees F)	Pounds per square inch
32	0.089	-50	0.001	30	0.079
40	0.122	-40	0.002	40	0.115
50	0.178	-30	0.003	50	0.167
60	0.256	-20	0.006	60	0.242
70	0.363	-10	0.011	70	0.351
80	0.507	0	0.019	80	0.509
90	0.698	10	0.031	90	0.700
100	0.950	20	0.051	100	0.950
		30	0.081		

ตารางผนวกที่ ก4 ค่า Viscosity ของน้ำ, น้ำแข็งและน้ำทะเล

Saturated Vapor Pressure of Fresh Water		Saturated Vapor Pressure of Sea Water	
Temperature (degrees F)	Centipoises	Temperature (degrees F)	Centipoises
32	1.770	30	1.880
40	1.540	40	1.610
50	1.304	50	1.400
60	1.122	60	1.210
70	0.974	70	1.060
80	0.858	80	0.920
90	0.763	90	0.815
100	0.682	100	0.730
110	0.616		
120	0.558		

ตารางผนวกที่ ก5 การแปลงหน่วยคุณสมบัติจากหน่วยอังกฤษ(Unite British) เป็นหน่วยเอสไอ (SI Unit)

Properties	British unit	to SI unit	Multiply
Density	Lb/ft ³	kg/m ³	1.601 846e+01
Viscosity (Dynamic)	Centipoises (cP)	Pas	1.0e-03
Thermal Conductivity	Btu _{th} in/(h ft ² F)	w/m·k	1.441314e-01
Cp	Btu/lbF	j/kg·K	4.18e+03

ภาคผนวก ข
คุณสมบัติเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

ตารางผนวกที่ ข1 รายละเอียดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ Comark รุ่น C8510 - 10 channels Printing
Thermometer Type K or PST

Properties		Comark C8510 -10 Channels Printing Thermometer
Measurement System :		Dual Slope Integration A-D Converter under Microprocessor control with Auto Zero
Sensor / Probes :	Type K:	Use with 10 Type K thermocouples with sub miniature plugs
	PST:	Use with 10 Precision Semi-Conductor Technology (PST) sensors with sub- miniature plugs
Range of instrument (Maximum 1999.9 on LCD):	Type K:	-100 °C to +1300 °C
	PST:	-40 °C to +110 °C
Scale:		°C or °F switchable
System Accuracy (PST):		±0.5 °C between -20 °C and +70 °C
		±1.5 °C full range (worst case)
Instrument Accuracy (Type K):		±0.2 °C of reading ±0.2 °C
		±0.2 °C of reading ±0.5 °F
Characterisation Error (Type K):		±0.2 °C
Interchannel offset (Type K):		±0.2 °C
Temperature Coefficient:	Type K:	Not greater than ±0.05 °C/°C
	PST:	±0.05 °C/°C
Cold Junction offset (Type K):		±0.2 °C (worst case)
CJC Characterising Error (Type K):		±0.5 °C (over range 0-40 °C)
Repeatability (Type K):		±0.1 °C (worst case)
Hysteresis (Type K):		±0.1 °C
Warm up time to Full Specification:		5 minute with instrument in a stable ambient temperature

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Properties	Comark C8510 -10 Channels Printing Thermometer
Response to full accuracy:	Typically 2 seconds
Open Circuit/ Broken Sensor or Thermocouple:	1 - - -, - On LCD display - - - - on printout
Print Time Interval:	15 to 60 seconds 1 to 60 minutes
Series Mode Rejection:	52 dB at 50 Hz
Common Mode Rejection:	158 dB at 50 Hz
Interchannel Relay Isolation:	50 V peak, non-cumulative
Common Mode Voltage from Mains Earth:	100 V peak
Reading Rate:	2 readings per second
Time and Date:	Hours, minutes, seconds Seconds ignored for print time over 1 minute Day, month, year including change for leap year.
Time Accuracy:	±10 seconds per week
Ambient Operating Conditions:	0 °C to 40 °C 20 % to 80% RH (Non condensing)
Ambient Storage Conditions:	-10 °C to +70 °C
Internal Battery:	8 volt lead acid
Low Battery Warning:	4 decimal points (.....) on LCD display
Battery Life:	See Section 5
Data Retention:	100 hours
Will Battery recover at 0 °C:	Yes

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Properties	Comark C8510 -10 Channels Printing
	Thermometer
External Power Supply:	185-265 V a.c. , 50-60 Hz 95-130 V a.c. , 50-60 Hz
Maximum Consumption:	15 W
Mains Supply Fuse, 20 x 5 mm:	160 mAT (anti-surge) for 185-265 V input 250 mAT (anti-surge) for 95-130 V input
Internal battery fuse:	3 AF (quick blow) Buss ATC
Will Instrument recover after Mains	
Disturbance:	Yes
Dimensions:	Length (handle forwards): 315 mm Width: 310 mm Height: 110 mm
Weight:	4.8 Kg
EMC:	Emission – EN 50081 - 1 No emissions above EN 55 022 Class B limits Immunity – EN 50082 – 1 Performance to Criterion C
Other Specification:	Conforms of BS EN 61010-1 : 1993

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงาน

ตารางผนวกที่ ค1 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) กับเวลาในการทดลองที่ 1

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
13.20	21.1	-3.3	26.2	24.0	21.4	20.7	21.2	21.4	22.7	20.6
14.20	7.5	-3.4	6	4.7	4.3	4.3	4.4	4.1	4.5	3.7
15.20	3.9	-4	1.9	2.8	3.5	3.9	3.1	2.3	3.1	1.8
16.20	2.9	-4.6	1.2	1.6	2.4	2.7	2	1.3	1.9	0.5
17.20	2.4	-5.2	1	1.1	1.9	1.6	1.5	0.7	1.4	-0.4
18.20	3.6	-3.1	0.9	1.1	1.7	1.1	1.3	0.2	1.2	-0.4
19.20	5.8	-2.3	0.9	1	1.4	1	1.2	0.2	1.1	-0.2
20.20	5.4	-1.6	0.9	1	1.3	0.9	1.1	0.3	1	0
21.20	4.7	-0.8	0.9	0.9	1	0.8	0.9	0.3	0.9	0.2
22.20	3.8	-1.6	0.8	0.7	0.9	0.7	0.8	0.1	0.8	-0.2
23.20	3.5	-2.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	-0.3	0.8	-0.7
00.20	3.2	-3.7	0.9	0.9	0.9	0.7	0.9	-0.7	0.8	-1.2
01.20	2.8	-4.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-1.3	0.7	-1.9
02.20	2.6	-5.4	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	-1.9	0.7	-2.4
03.20	2.4	-6	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	-2.3	0.7	-2.8
04.20	2.1	-6.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	-2.9	0.7	-3.3
05.20	1.9	-7.1	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	-3.5	0.7	-3.8
06.20	1.9	-7.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-4	0.7	-4.2
07.20	1.8	-7.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-4.4	0.7	-4.6
08.20	1.6	-7.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	-4.6	0.7	-4.7
09.20	1.5	-8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	-5	0.7	-5
10.20	1.8	-5.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-4.1	0.7	-3.9
11.20	1.8	-5.1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-3.4	0.7	-3.2
12.20	1.8	-5.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-3.7	0.7	-3.6
13.20	1.7	-6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-4.2	0.7	-4
14.20	1.6	-4.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	-3.5	0.7	-3.2
15.20	1.6	-5.2	0.7	0.5	0.7	0.6	0.7	-3.7	0.7	-3.5
16.20	1.5	-5.9	0.7	0.4	0.7	0.6	0.7	-4.2	0.7	-3.9
17.20	1.4	-6.3	0.7	0.4	0.7	0.7	0.7	-4.6	0.7	-4.2

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
18.20	1.4	-6.1	0.6	0.2	0.6	0.7	0.7	-4.7	0.6	-3.9
19.20	1.7	-4.5	0.6	0.2	0.5	0.7	0.7	-3.8	0.6	-3.1
20.20	2	-2.4	0.7	0.3	0.5	0.6	0.7	-2.5	0.5	-2
21.2	2.3	-1.6	0.7	0.3	0.4	0.6	0.7	-1.7	0.6	-1.3
22.2	2.3	-2.8	0.6	0.5	0.4	0.5	0.7	-2	0.5	-1.7
23.2	3.8	-2.8	0.5	0.3	0.3	0.4	0.6	-2.1	0.4	-1.9
0.2	3.3	-3.6	0.5	0.3	0.4	0.5	0.6	-2.7	0.5	-2.4
1.2	2.7	-4.6	0.3	0.1	0.3	0.3	0.5	-3.5	0.3	-3.1
2.2	2.4	-5.3	0.3	-0.1	0.1	0.3	0.3	-4.1	0.3	-3.7
3.2	2.1	-6	0.1	-0.3	0	0.1	0.2	-4.8	0.1	-4.3
4.2	1.8	-6.5	0	-0.4	-0.1	0	0	-5.2	0	-4.7
5.2	1.4	-7.1	-0.3	-0.7	-0.4	-0.3	-0.3	-5.9	-0.2	-5.1
6.2	1.2	-7.6	-0.4	-0.9	-0.6	-0.4	-0.7	-6.4	-0.4	-5.6
7.2	1.4	-7.7	-0.7	-1.2	-0.8	-0.7	-1	-6.8	-0.6	-5.9
8.2	1.6	-6.1	-0.6	-1.1	-0.8	-0.8	-1.2	-5.6	-0.5	-4.7
9.2	1.5	-5.5	-0.7	-1.1	-0.8	-0.9	-1.3	-5.2	-0.6	-4.4
10.2	1.5	-5	-0.6	-1	-0.8	-0.9	-1.3	-4.5	-0.6	-3.8
11.2	1.4	-5.5	-0.6	-1	-0.8	-1	-1.4	-4.8	-0.6	-4.1
12.2	1.2	-6	-0.8	-1.2	-0.9	-1.2	-1.6	-5.2	-0.8	-4.5
13.2	1.4	-6.4	-0.9	-1.3	-1.1	-1.3	-2	-5.6	-0.8	-4.9
14.2	1.1	-7	-1.1	-1.6	-1.3	-1.7	-2.4	-6.2	-1.1	-5.4
15.2	0.8	-7.5	-1.3	-1.8	-1.6	-2.1	-2.9	-6.7	-1.3	-5.8
16.2	1.1	-7.9	-1.6	-2	-1.8	-2.6	-3.4	-7.1	-1.5	-6.1
17.2	0.7	-8.4	-1.9	-2.4	-2.2	-3.3	-4.1	-7.6	-1.9	-6.6

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
18.2	1	-6.6	-1.9	-2.5	-2.4	-3.9	-4.6	-7	-2.1	-5.6
19.2	1.4	-4.8	-1.1	-1.8	-2.2	-4.3	-4.3	-5.5	-1.8	-4.4
20.2	1.5	-3.7	-0.7	-1.4	-2.1	-4.6	-3.7	-4.4	-1.7	-3.6
21.2	1.8	-2.7	-0.4	-1.1	-2.1	-4.6	-3.2	-3.6	-1.6	-2.9
22.2	1.9	-3.4	-0.4	-0.9	-2.1	-4.4	-2.8	-3.2	-1.6	-2.8
23.2	1.7	-4.4	-0.8	-1.3	-2.5	-4.1	-2.9	-4	-2	-3.7
0.2	1.5	-4.9	-1.2	-1.7	-3	-4.1	-3.3	-4.4	-2.5	-4.2
1.2	1.1	-5.4	-1.5	-2.2	-3.6	-4.4	-3.9	-5	-3.2	-4.7
2.2	0.7	-6	-1.9	-2.7	-4.2	-4.7	-4.4	-5.6	-4	-5.3
3.2	0.3	-6.8	-2.4	-3.6	-5	-5.2	-5.1	-6.3	-4.8	-6.1
4.2	0.1	-7.3	-3.1	-4.5	-5.6	-5.6	-5.8	-6.8	-5.5	-6.7
5.2	-0.2	-7.8	-4	-5.6	-6.3	-6.3	-6.4	-7.4	-6.2	-7.2

ตารางผนวกที่ ค2 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) กับเวลาในการทดลองที่ 2

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
09.22	20.15	-2.5	24.0	21.4	19.7	17.88	18.4	16.54	19.12	20.1
10.22	11.8	-2.6	8.6	7.6	6.4	4.7	5.4	3.3	5.0	6.3
11.22	5.7	-3.3	2.9	3.4	3.5	4.1	3.5	1.7	3.8	3.5
12.22	4.1	-4.0	1.4	1.9	2.2	3.3	2.2	0.3	2.7	2.2
13.22	3.4	-4.6	1.0	1.2	1.5	1.7	1.5	-0.7	2.1	1.5
14.22	3.0	-5.1	0.9	1.0	1.2	1.3	1.2	-1.5	1.9	1.2
15.22	2.8	-5.6	1.0	1.0	1.3	1.1	1.2	-2.1	1.6	1.2
16.22	2.6	-6.1	0.8	0.9	1.1	0.9	1.0	-2.9	1.2	0.9
17.22	2.4	-6.5	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	-3.5	1.1	0.8
18.22	2.7	-6.6	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	-3.2	1.0	0.9
19.22	3.6	-6.2	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-2.2	0.8	0.7
20.22	4.0	-5.6	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	-1.4	1.0	0.9
21.22	3.9	-5.2	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	-1.1	0.9	0.8
22.22	3.7	-2.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	-1.6	0.9	0.8
23.22	3.4	-3.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	-2.4	0.9	0.8
00.22	3.0	-4.4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-2.9	0.8	0.7
01.22	2.7	-5.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-3.4	0.8	0.7
02.22	2.5	-5.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-3.9	0.7	0.7
03.22	2.2	-6.3	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-4.5	0.7	0.7
04.22	2.2	-6.7	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	-5.0	0.8	0.8
05.22	1.9	-7.3	0.1	0.7	0.7	0.7	0.7	-5.6	0.7	0.7
06.22	1.9	-7.8	-0.2	0.7	0.7	0.7	0.7	-6.0	0.7	0.7
07.22	1.7	-8.3	-0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	-6.6	0.7	0.7
08.22	1.9	-6.5	-0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	-5.6	0.7	0.7
09.22	2.0	-4.4	-0.4	0.5	0.5	0.7	0.7	-3.9	0.7	0.7
10.22	2.1	-4.4	-0.3	0.5	0.5	0.7	0.7	-3.6	0.7	0.7
11.22	2.1	-4.9	-0.5	0.3	0.4	0.7	0.7	-4.0	0.7	0.7
12.22	2.0	-5.6	-0.8	0.2	0.3	0.6	0.7	-4.6	0.7	0.7

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
13.22	1.9	-6.1	-1.0	0.0	0.1	0.6	0.7	-5.1	0.7	0.7
14.22	1.9	-6.6	-1.2	-0.2	0.0	0.4	0.6	-5.6	0.5	0.7
15.22	1.9	-7.0	-1.5	-0.4	-0.2	0.4	0.5	-6.0	0.5	0.7
16.22	1.9	-7.5	-1.7	-0.5	-0.4	0.3	0.5	-6.4	0.3	0.7
17.22	1.9	-7.9	-2.0	-0.8	-0.5	0.0	-0.1	-6.9	0.1	0.7
18.22	1.9	-7.9	-2.0	-0.8	-0.7	-0.1	-0.4	-6.8	0.0	0.7
19.22	2.1	-7.5	-1.6	-0.8	-0.7	-0.3	-0.6	-6.0	-0.1	0.5
20.22	2.7	-7.2	-0.5	-0.4	-0.5	-0.4	-0.6	-4.5	-0.1	0.4
21.22	2.9	-7.0	-0.2	-0.2	-0.4	-0.5	-0.6	-3.6	-0.1	0.4
22.22	3.1	-2.2	-0.2	0.0	-0.1	-0.4	-0.4	-2.0	0.0	0.4
23.22	4.1	-3.0	-0.4	-0.1	-0.1	-0.2	0.2	-2.6	0.1	0.4
00.22	5.0	-3.0	-0.4	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-2.4	0.1	0.4
01.22	4.7	-3.7	-0.6	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4	-3.0	0.1	0.4
02.22	3.9	-4.6	-1.0	-0.4	-0.4	-0.4	-0.7	-3.9	-0.1	0.3
03.22	3.2	-5.2	-1.4	-0.8	-0.7	-0.7	-1.0	-4.5	-0.3	0.2
04.22	2.6	-6.0	-1.8	-1.0	-0.9	-1.0	-1.4	-5.2	-0.6	0.0
05.22	2.0	-6.6	-2.2	-1.4	-1.3	-1.4	-2.0	-5.9	-0.9	-0.3
06.22	1.7	-7.1	-2.5	-1.6	-1.5	-1.7	-2.4	-6.4	-1.1	-0.4
07.22	1.5	-7.4	-2.8	-1.8	-1.8	-2.2	-2.8	-6.9	-1.3	-0.7
08.22	1.8	-5.8	-2.5	-1.8	-1.7	-2.5	-3.1	-5.7	-1.4	-0.7
09.22	1.5	-5.8	-2.4	-1.7	-1.6	-2.8	-3.1	-5.5	-1.4	-0.8
10.22	1.5	-6.2	-2.4	-1.8	-1.8	-3.1	-3.2	-5.8	-1.5	-0.9
11.22	1.5	-6.7	-2.7	-2.0	-2.0	-3.6	-3.6	-6.2	-1.7	-1.0
12.22	1.2	-7.2	-3.0	-2.3	-2.4	-4.2	-4.1	-6.7	-2.0	-1.4
13.22	1.1	-7.7	-3.3	-2.6	-2.8	-5.0	-4.8	-7.2	-2.8	-2.0
14.22	0.9	-8.1	-3.7	-3.0	-3.6	-5.8	-5.6	-7.7	-	-2.8
15.22	1.0	-7.9	-4.0	-3.5	-5.0	-6.5	-6.3	-7.8	-	-4.6
16.22	1.1	-6.1	-3.6	-3.9	-5.8	-6.8	-6.6	-6.4	-	-5.7

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
17.22	1.1	-6.2	-3.4	-4.3	-5.9	-6.6	-6.2	-6.1	-	-5.9
18.22	1.1	-6.3	-3.6	-4.8	-6.0	-6.4	-6.1	-6.2	-	-6.0
19.22	1.8	-6.2	-2.8	-4.8	-5.8	-6.4	-6.0	-4.9	-	-5.9
20.22	2.7	-5.9	-1.7	-4.0	-4.9	-6.0	-4.9	-3.5	-	-5.0
21.22	2.8	-5.8	-1.4	-3.3	-4.2	-5.6	-4.1	-2.8	-	-4.4
22.22	3.0	-3.1	-1.5	-2.8	-3.4	-4.7	-3.2	-2.8	-	-3.6
23.22	2.7	-4.6	-2.4	-3.1	-3.5	-4.3	-3.3	-4.1	-	-3.4
00.22	2.0	-6.0	-3.4	-3.8	-4.2	-4.6	-4.2	-5.5	-	-4.0
01.22	1.5	-7.0	-4.4	-4.7	-4.9	-5.1	-5.1	-6.5	-	-4.8
02.22	1.0	-7.8	-5.4	-5.6	-5.9	-5.7	-6.0	-7.3	-	-5.6
03.22	1.4	-6.8	-6.0	-6.4	-6.5	-6.4	-6.8	-7.0	-	-6.4
04.22	3.3	-4.9	-5.1	-6.0	-6.1	-6.4	-6.3	-4.9	-	-6.3
05.22	4.0	-5.6	-5.0	-5.6	-5.7	-6.0	-5.6	-5.3	-	-5.7

ตารางผนวกที่ ค3 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) กับเวลาในการทดลองที่ 3

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
21.21	21.1	-4.3	26.2	24.0	21.4	19.7	22.2	22.4	22.7	22.6
22.21	12.2	-2.0	8.0	6.8	4.3	4.6	4.1	4.1	4.7	4.2
23.21	6.1	-3.3	2.3	3.1	3.5	3.8	3.1	3.1	3.2	3.1
00.21	3.0	-4.0	1.3	1.7	2.3	3.3	1.9	1.9	1.9	1.9
01.21	2.0	-4.8	1.1	1.4	1.7	2.7	1.4	1.3	1.4	1.4
02.21	1.4	-5.2	1.0	1.2	1.3	1.5	1.1	0.8	1.1	1.1
03.21	1.0	-5.7	0.9	1.2	1.3	1.3	1.1	0.7	1.1	1.0
04.21	0.7	-6.4	0.8	1.1	1.1	1.1	1.0	-0.1	0.9	0.9
05.21	0.5	-6.2	0.8	1.1	1.0	1.0	0.9	-0.8	0.9	0.8
06.21	0.5	-6.4	0.8	1.0	0.9	0.8	0.9	-1.2	0.9	0.7
07.21	0.3	-6.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	-1.7	0.8	0.7
08.21	0.2	-6.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	-2.1	0.8	0.7
09.21	0.2	-6.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	-2.5	0.8	0.3
10.21	0.3	-6.9	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	-2.8	0.7	0.0
11.21	0.3	-6.9	0.8	0.6	0.7	0.7	0.8	-3.0	0.8	-0.2
12.21	0.3	-7.3	0.7	0.5	0.7	0.7	0.7	-3.5	0.7	-0.6
13.21	0.3	-7.3	0.8	0.6	0.7	0.7	0.7	-3.8	0.7	-0.8
14.21	0.3	-7.6	0.9	0.7	0.8	0.7	0.8	-4.1	0.8	-1.1
15.21	0.3	-8.1	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	-4.7	0.7	-1.5
16.21	0.6	-7.7	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	-4.7	0.9	-1.6
17.21	0.4	-7.5	0.8	0.9	0.7	0.7	0.7	-4.8	0.7	-1.8
18.21	0.5	-6.9	0.9	1.1	0.8	0.8	0.8	-4.3	0.9	-1.6
19.21	0.9	-6.0	0.9	1.2	0.8	0.8	0.8	-3.7	0.9	-1.2
20.21	1.3	-4.4	0.9	1.1	0.8	0.7	0.8	-2.6	0.8	-0.8
21.21	1.9	-3.2	0.7	1.0	0.7	0.7	0.7	-1.6	0.7	-0.4
22.21	2.1	-1.5	0.7	0.9	0.7	0.7	0.7	-1.1	0.7	-0.2
23.21	2.3	-3.4	0.8	0.9	0.7	0.7	0.8	-1.9	0.8	-0.4
00.21	3.5	-4.4	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	-2.8	0.7	-1.1

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
01.21	3.0	-5.6	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	-3.8	0.7	-1.6
02.21	2.2	-6.0	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	-4.4	0.7	-2.0
03.21	1.3	-6.3	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	-4.7	0.6	-2.2
04.21	0.7	-6.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	-5.1	0.7	-2.4
05.21	0.3	-6.4	0.7	0.7	0.6	0.5	0.6	-5.1	0.6	-2.5
06.21	0.2	-6.8	0.6	0.7	0.5	0.5	0.6	-5.4	0.6	-2.7
07.21	0.0	-7.1	0.6	0.6	0.5	0.4	0.5	-5.7	0.5	-2.9
08.21	-0.1	-6.9	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	-5.9	0.6	-3.0
09.21	0.2	-7.2	0.6	0.3	0.5	0.3	0.6	-6.1	0.6	-3.2
10.21	0.2	-7.6	0.7	0.3	0.6	0.4	0.6	-6.4	0.7	-3.3
11.21	0.2	-7.6	0.7	0.3	0.6	0.3	0.6	-6.5	0.7	-3.5
12.21	0.3	-7.6	0.7	0.4	0.6	0.3	0.3	-6.7	0.7	-3.6
13.21	0.3	-7.7	0.8	0.6	0.6	0.0	-0.3	-6.8	0.6	-3.7
14.21	0.3	-7.9	0.7	0.6	0.5	-0.7	-1.2	-7.2	0.4	-4.0
15.21	0.4	-8.0	0.8	0.7	0.3	-1.7	-2.1	-7.3	0.3	-4.2
16.21	0.6	-7.4	0.7	0.7	0.1	-3.2	-3.0	-7.1	0.0	-4.2
17.21	0.5	-7.0	0.6	0.7	-0.6	-4.6	-3.8	-6.8	-0.9	-4.3
18.21	0.5	-6.1	0.4	0.5	-2.0	-5.4	-4.4	-6.4	-2.0	-4.4
19.21	0.6	-5.3	0.2	-0.2	-3.9	-5.8	-4.9	-5.9	-3.9	-4.8
20.21	0.9	-3.6	0.0	-1.4	-5.1	-6.0	-5.0	-4.7	-4.4	-4.5
21.21	2.7	-4.8	0.0	-1.8	-5.0	-5.8	-4.3	-3.0	-4.0	-3.5

ตารางผนวกที่ ค4 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) กับเวลาในการทดลองที่ 4

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
00.24	12.6	-3.3	18.4	16.1	12.6	10.7	13.7	13.8	14.2	13.9
01.24	5.4	-4.0	4.7	4.2	3.9	4.1	3.8	3.8	3.9	3.9
02.24	1.5	-4.8	1.5	2.2	2.7	3.3	2.3	2.3	2.3	2.3
03.24	0.5	-5.4	1.0	1.3	1.7	2.4	1.4	1.1	1.4	1.4
04.24	-0.1	-5.9	0.7	1.0	1.1	1.9	0.9	0.7	1.0	0.9
05.24	-0.4	-5.9	0.6	0.8	1.0	1.1	0.7	0.0	0.7	0.7
06.24	-0.7	-5.6	0.6	0.7	0.8	1.0	0.7	-0.5	0.7	0.7
07.24	-0.6	-6.1	0.6	0.6	0.8	0.8	0.7	-1.0	0.7	0.7
08.24	-0.7	-6.4	0.7	0.6	0.8	0.8	0.7	-1.4	0.7	0.7
09.24	-0.7	-6.1	0.7	0.5	0.9	0.7	0.7	-1.7	0.8	0.7
10.24	-0.4	-6.5	0.7	0.3	0.7	0.7	0.7	-2.1	0.7	0.7
11.24	0.1	-6.2	0.8	0.6	0.9	0.8	0.8	-2.2	0.9	0.8
12.24	0.3	-6.2	0.8	0.6	0.8	0.7	0.8	-2.4	0.8	0.7
13.24	-0.2	-6.1	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	-3.6	0.9	0.8
14.24	-0.4	-6.5	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	-2.9	0.9	0.9
15.24	-0.3	-7.1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	-3.5	0.9	0.8
16.24	-0.8	-7.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	-4.0	0.8	0.6
17.24	0.0	-7.9	1.0	1.1	0.9	0.9	0.9	-4.4	0.9	0.3
18.24	-0.3	-7.0	1.0	1.1	0.9	0.9	0.9	-4.0	0.9	0.2
19.24	0.7	-5.7	0.9	1.2	0.8	0.9	0.9	-3.3	0.9	0.1
20.24	1.1	-3.8	0.8	1.1	0.7	0.8	0.8	-2.4	0.8	0.1
21.24	3.1	-1.5	0.8	1.1	0.7	0.7	0.7	-1.0	0.8	0.3
22.24	3.1	-1.2	0.7	0.9	0.7	0.7	0.7	-0.4	0.7	0.4
23.24	2.8	-2.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	-1.1	0.7	0.3
00.24	4.0	-3.6	0.8	0.9	0.7	0.7	0.7	-2.0	0.7	0.2
01.24	2.8	-4.4	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	-2.7	0.7	0.0
02.24	1.4	-4.9	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	-3.2	0.7	-0.4
03.24	0.4	-5.3	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	-3.5	0.7	-0.4

ตารางผนวกที่ ค4 (ต่อ)

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
04.24	0.2	-5.8	0.7	0.8	0.6	0.6	0.7	-4.00	0.7	-0.8
05.24	-0.3	-5.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	-4.1	0.7	-0.8
06.24	-0.4	-5.8	0.7	0.8	0.7	0.6	0.7	-4.2	0.7	-0.9
07.24	-0.9	-6.3	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	-4.5	0.5	-1.2
08.24	-0.8	-6.9	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	-5.1	0.5	-1.5
09.24	-1.0	-6.7	0.7	0.4	0.6	0.6	0.7	-5.1	0.6	-1.5
10.24	-1.2	-7.0	0.7	0.4	0.7	0.6	0.7	-5.3	0.7	-1.6
11.24	-0.9	-7.4	0.7	0.5	0.7	0.6	0.7	-5.8	0.7	-1.8
12.24	-1.0	-7.6	0.7	0.4	0.6	0.6	0.7	-6.0	0.7	-2.0
13.24	-1.3	-8.0	0.7	0.5	0.7	0.6	0.7	-6.4	0.7	-2.2
14.24	-1.3	-8.4	0.8	0.7	0.7	0.6	0.8	-6.8	0.7	-2.4
15.24	-1.5	-8.9	0.8	0.7	0.7	0.4	0.7	-7.2	0.8	-2.7
16.24	-1.3	-8.9	0.9	0.8	0.7	0.3	0.7	-7.6	0.8	-3.0
17.24	-1.0	-8.9	0.8	1.0	0.7	0.0	0.4	-7.7	0.8	-3.2
18.24	-1.3	-8.2	0.8	1.0	0.7	-0.4	0.0	-7.5	0.7	-3.2
19.24	-0.5	-7.3	0.7	0.9	0.6	-0.8	-0.8	-6.6	0.7	-2.8
20.24	0.2	-6.1	0.7	0.9	0.6	-1.0	-1.2	-5.5	0.7	-2.3
21.24	0.7	-4.8	0.8	1.0	0.7	-1.2	-1.2	-4.1	0.7	-1.7
22.24	0.8	-2.8	0.7	0.9	0.5	-1.4	-1.2	-2.8	0.6	-1.2
23.24	0.4	-4.0	0.7	0.8	0.4	-1.4	-1.1	-3.3	0.5	-1.4
00.24	-0.1	-5.0	0.6	0.7	0.3	-1.6	-1.4	-4.3	0.4	-1.9
01.24	0.8	-5.2	0.6	0.7	0.2	-2.0	-1.8	-4.4	0.3	-2.1
02.24	1.6	-5.6	0.5	0.7	0.0	-2.4	-2.3	-4.9	0.2	-2.4

ตารางผนวกที่ ค5 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) กับเวลาในการทดลองที่ 5

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
04.59	16.2	-4.6	28.6	26.1	23.3	21.8	24.1	24.3	25.0	24.4
05.59	8.9	-5.0	7.0	5.4	4.1	4.4	3.9	3.8	4.1	3.9
06.59	3.5	-5.8	1.9	2.3	3.0	3.4	2.7	2.4	2.8	2.7
07.59	2.7	-6.3	0.9	0.8	1.7	2.4	1.4	0.8	1.4	1.4
08.59	2.7	-6.0	0.8	0.5	1.3	2.1	1.1	0.3	1.1	1.1
09.59	2.7	-5.1	0.9	0.6	1.3	1.5	1.1	-0.1	1.1	1.0
10.59	2.2	-5.2	0.8	0.3	1.2	1.1	0.9	-0.5	0.9	0.9
11.59	2.1	-5.5	0.9	0.7	1.1	1.1	1.1	-0.9	1.0	1.0
12.59	1.9	-6.1	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	-1.6	1.0	1.0
13.59	1.9	-6.8	0.9	0.7	1.0	0.9	1.0	-2.1	1.0	1.0
14.59	1.7	-7.5	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	-2.8	1.0	1.0
15.59	1.6	-8.0	0.9	0.7	0.8	0.8	0.9	-3.5	0.9	0.9
16.59	1.5	-8.8	1.0	0.7	0.8	0.8	0.9	-4.2	0.9	0.9
17.59	1.5	-9.3	1.0	1.1	0.8	0.9	0.8	-4.9	0.9	0.9
18.59	1.8	-8.8	1.0	1.1	0.7	0.8	0.7	-4.0	0.8	0.8
19.59	2.0	-7.6	0.9	1.0	0.7	0.7	0.7	-3.5	0.8	0.8
20.59	2.3	-6.2	0.8	0.9	0.7	0.7	0.7	-2.8	0.7	0.7
21.59	2.4	-4.4	0.8	0.9	0.7	0.7	0.7	-2.4	0.8	0.7
22.59	1.9	-5.2	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	-3.1	0.7	0.7
23.59	1.6	-5.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-3.6	0.7	0.7
00.59	1.5	-6.3	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-4.1	0.7	0.7
01.59	1.3	-7.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-5.0	0.7	0.7
02.59	1.1	-8.4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-5.8	0.7	0.6
03.59	0.9	-9.2	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	-6.6	0.7	0.3
04.59	0.6	-10.	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	-7.3	0.6	0.1
05.59	0.6	-10.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	-8.1	0.6	0.2
06.59	0.4	-11.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	-8.9	0.5	-0.6
07.59	0.3	-11.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	-9.4	0.5	-0.9
08.59	0.5	-11.1	0.6	0.3	0.6	0.5	0.6	-9.3	0.6	-1.1
09.59	0.5	-10.7	0.6	0.3	0.5	0.5	0.6	-9.2	0.5	-1.3

ตารางผนวกที่ ค5 (ต่อ)

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
10.59	0.7	-9.2	0.7	0.4	0.7	0.6	0.5	-8.2	0.6	-1.2
11.59	1.2	-7.7	0.8	0.5	0.7	0.6	0.0	-7.1	0.4	-1.2
12.59	1.8	-7.4	0.8	0.3	0.7	0.5	-0.4	-6.3	0.4	-1.0
13.59	1.5	-7.6	0.7	0.5	0.6	0.4	-0.8	-6.4	0.3	-1.2
14.59	1.3	-7.7	0.8	0.8	0.6	0.4	-1.1	-6.6	0.2	-1.2
15.59	1.1	-8.0	0.8	0.7	0.4	0.3	-1.6	-6.9	0.1	-1.4
16.59	1.1	-8.3	0.7	0.7	0.3	-0.2	-2.1	-7.1	-0.1	-1.6
17.59	1.0	-8.6	0.7	0.8	0.0	-1.2	-2.8	-7.5	-0.4	-1.9
18.59	1.1	-8.2	0.7	0.7	-0.3	-2.5	-3.4	-7.1	-0.5	-2.0
19.59	1.2	-7.6	0.7	0.6	-0.4	-4.0	-3.6	-6.4	-0.6	-1.9
20.59	1.5	-6.8	0.7	0.4	-0.8	-5.0	-3.7	-5.5	-0.8	-1.9
21.59	1.5	-4.7	0.5	0.2	-1.6	-5.8	-3.6	-4.6	-1.0	-1.9
22.59	1.4	-5.3	0.5	0.0	-2.4	-5.7	-3.5	-4.8	-1.3	-2.1
23.59	1.2	-6.0	0.4	-0.1	-3.2	-5.5	-3.7	-5.2	-2.0	-2.7
00.59	1.0	-6.0	0.3	-0.4	-4.0	-5.5	-4.4	-5.6	-3.1	-3.6
01.59	0.8	-6.4	0.3	-0.8	-4.9	-5.6	-4.8	-5.9	-4.0	-4.4
02.59	0.7	-7.0	0.0	-1.7	-5.6	-6.0	-5.4	-6.4	-4.8	-5.1
03.59	0.7	-7.6	-0.4	-3.3	-6.2	-6.3	-6.0	-6.9	-5.6	-5.8
04.59	0.4	-8.1	-1.2	-5.0	-6.8	-6.8	-6.7	-7.6	-6.4	-6.6
05.59	0.3	-8.5	-2.6	-6.1	-7.2	-7.2	-7.2	-8.0	-7.0	-7.1
06.59	0.1	-9.1	-4.5	-7.1	-7.9	-7.8	-7.9	-8.5	-7.6	-7.8
07.59	-0.1	-8.9	-6.0	-8.0	-8.4	-8.4	-8.4	-8.9	-8.3	-8.4
08.59	-0.3	-9.0	-6.7	-8.4	-8.5	-8.5	-8.6	-8.8	-8.4	-8.4
09.59	-0.4	-9.3	-7.1	-8.7	-8.7	-8.6	-8.7	-8.9	-8.6	-8.6
10.59	-0.5	-9.5	-7.6	-9.0	-8.9	-8.9	-9.0	-9.3	-8.9	-8.9
11.59	-0.5	-8.7	-8.0	-9.3	-9.2	-9.1	-9.1	-8.9	-9.1	-9.0
12.59	-0.8	-8.8	-8.0	-9.0	-8.9	-8.9	-8.9	-8.7	-8.9	-8.9
13.59	-0.4	-8.2	-7.9	-8.8	-8.9	-8.9	-8.8	-8.5	-8.8	-8.7
14.59	0.0	-6.5	-7.5	-8.3	-8.4	-8.4	-8.2	-7.3	-8.3	-8.1
15.59	0.1	-5.8	-6.9	-7.4	-7.6	-7.6	-7.4	-6.3	-7.6	-7.3

ตารางผนวกที่ ค6 ผลการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงงานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) กับเวลาในการทดลองที่6

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
01.59	17.1	-3.2	27.4	25.1	22.0	20.4	22.9	23.3	23.8	23.2
02.59	12.8	-4.0	7.0	5.4	4.0	4.2	3.9	3.7	4.1	3.9
03.59	6.7	-4.2	2.3	2.7	3.1	3.7	2.9	2.9	3.0	2.9
04.59	4.9	-3.8	1.1	1.5	2.3	2.5	1.9	1.7	1.9	1.9
05.59	3.9	-3.6	0.9	1.1	2.3	1.6	1.5	1.4	1.5	1.5
06.59	3.3	-4.4	0.7	0.9	1.5	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1
07.59	2.8	-5.1	0.7	0.6	1.1	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0
08.59	2.6	-5.1	0.7	0.5	0.9	0.7	1.0	0.7	1.0	0.9
09.59	2.5	-5.6	0.9	0.7	1.0	0.8	1.1	0.7	1.1	1.0
10.59	2.4	-5.6	0.8	0.7	0.9	0.8	1.0	0.4	1.0	0.9
11.59	2.4	-5.8	0.9	0.7	0.9	0.8	1.0	0.0	1.0	0.9
12.59	2.5	-5.9	1.0	0.7	0.9	0.8	0.9	-0.4	1.0	0.9
13.59	2.3	-6.5	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	-0.9	0.7	0.7
14.59	2.5	-6.7	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	-1.2	0.9	0.9
15.59	2.5	-6.9	1.0	0.7	0.8	0.8	0.8	-1.7	0.8	0.8
16.59	2.4	-7.2	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	-2.1	0.8	0.8
17.59	2.4	-7.6	1.0	1.1	0.8	0.9	0.9	-2.5	0.9	0.9
18.59	2.6	-6.3	0.9	1.1	0.8	0.8	0.8	-2.4	0.9	0.8
19.59	2.8	-5.4	0.9	1.1	0.8	0.9	0.9	-2.2	0.9	0.7
20.59	2.8	-4.8	0.8	0.9	0.7	0.7	0.7	-2.1	0.8	0.5
21.59	2.8	-5.0	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	-2.2	0.7	0.4
22.59	2.5	-6.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-2.8	0.7	0.2
23.59	2.1	-6.9	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	-3.4	0.7	0.0
00.59	2.0	-7.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-4.0	0.7	-0.2
01.59	1.8	-7.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	-4.6	0.7	-0.5
02.59	1.9	-7.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-4.8	0.7	-0.7
03.59	1.7	-6.6	0.6	0.7	0.5	0.5	0.5	-4.4	0.5	-0.8
04.59	1.9	-5.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	-3.9	0.6	-0.7

ตารางผนวกที่ ค6 (ต่อ)

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
05.59	1.9	-5.3	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	-3.6	0.5	-0.8
06.59	1.9	-5.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	-3.7	0.5	-0.8
07.59	1.9	-5.9	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	-4.1	0.5	-1.0
08.59	2.2	-5.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.5	-4.0	0.5	-1.0
09.59	2.5	-5.7	0.7	0.4	0.6	0.6	0.7	-3.9	0.7	-0.8
10.59	2.6	-5.9	0.7	0.5	0.7	0.6	0.7	-4.2	0.7	-0.9
11.59	2.8	-6.4	0.8	0.3	0.7	0.7	0.7	-4.5	0.8	-1.1
12.59	2.9	-6.8	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	-5.0	0.7	-1.3
13.59	2.6	-7.2	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	-5.4	0.7	-1.5
14.59	2.6	-7.6	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	-5.7	0.8	-1.6
15.59	2.4	-8.0	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	-6.2	0.7	-2.0
16.59	2.4	-8.3	0.8	1.0	0.7	0.6	0.7	-6.6	0.7	-2.2
17.59	2.3	-8.8	0.7	1.0	0.6	0.4	0.5	-7.1	0.7	-2.5
18.59	2.5	-7.6	0.7	0.9	0.6	0.3	0.3	-6.8	0.6	-2.4
19.59	2.7	-6.8	0.8	0.9	0.6	0.1	-0.4	-6.3	0.5	-2.3
20.59	3.5	-4.3	0.7	0.7	0.4	-0.6	-1.1	-5.6	0.3	-2.2
21.59	4.3	-4.8	0.7	0.7	0.3	-1.4	-1.3	-4.6	0.2	-1.8
22.59	3.7	-5.9	0.7	0.7	0.2	-2.4	-1.6	-4.8	0.1	-2.0
23.59	3.1	-6.8	0.6	0.5	0.0	-3.3	-2.1	-5.6	-0.2	-2.4
00.59	2.8	-6.5	0.5	0.3	-0.4	-4.4	-2.9	-6.0	-0.6	-2.9
01.59	2.6	-7.1	0.4	0.1	-1.2	-5.1	-3.6	-6.3	-1.2	-3.3
02.59	2.3	-7.6	0.3	-0.1	-2.6	-5.8	-4.3	-6.7	-2.1	-3.9
03.59	2.2	-8.1	0.2	-0.5	-4.3	-6.3	-5.3	-7.2	-4.1	-5.1
04.59	1.9	-8.7	-0.1	-2.0	-6.2	-7.1	-6.3	-7.9	-5.2	-6.2
05.59	1.7	-9.3	-0.7	-3.6	-7.5	-7.9	-7.3	-8.5	-6.7	-7.3
06.59	1.5	-9.8	-1.4	-5.7	-8.3	-8.5	-8.1	-9.1	-7.8	-8.2
07.59	1.5	-9.7	-2.5	-7.5	-9.0	-9.2	-8.9	-9.5	-8.7	-8.9
08.59	1.5	-8.5	-4.0	-8.4	-9.3	-9.3	-9.2	-9.0	-9.0	-8.9

ตารางผนวกที่ ค6 (ต่อ)

เวลา	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7	ch8	ch9	ch0
09.59	1.5	-7.5	-5.5	-8.6	-8.9	-9.0	-8.8	-8.2	-8.8	-8.5
10.59	1.6	-6.4	-6.0	-8.3	-8.3	-8.3	-8.0	-7.2	-8.1	-7.8
11.59	1.8	-6.2	-5.7	-7.5	-7.4	-7.4	-7.2	-6.5	-7.3	-7.0
12.59	1.9	-6.5	-5.6	-6.9	-6.9	-6.9	-6.8	-6.4	-6.8	-6.7
13.59	2.1	-6.9	-5.6	-6.8	-6.7	-6.7	-6.6	-6.6	-6.7	-6.6
14.59	2.2	-7.2	-5.7	-6.6	-6.8	-6.8	-6.7	-6.9	-6.8	-6.8
15.59	2.5	-7.6	-6.0	-6.6	-6.9	-6.9	-6.9	-7.2	-6.8	-7.0
16.59	2.3	-8.1	-6.4	-7.0	-7.3	-7.3	-7.3	-7.7	-7.3	-7.4
17.59	2.1	-8.5	-6.8	-7.3	-7.6	-7.6	-7.7	-8.1	-7.6	-7.7
18.59	2.0	-7.8	-7.2	-7.7	-8.1	-8.1	-8.2	-8.2	-8.1	-8.1
19.59	2.3	-6.8	-6.8	-7.6	-8.1	-8.1	-8.0	-7.6	-8.0	-7.8
20.59	2.4	-5.7	-6.3	-7.2	-7.9	-8.1	-7.6	-6.9	-7.6	-7.4
21.59	2.6	-4.5	-5.2	-6.4	-7.3	-7.7	-6.8	-5.6	-6.8	-6.4
22.59	2.4	-5.3	-4.5	-5.6	-6.4	-6.8	-6.0	-5.3	-6.0	-5.8
23.59	2.3	-6.1	-4.6	-5.4	-6.0	-6.3	-5.7	-5.7	-5.8	-5.8
00.59	2.1	-6.5	-4.9	-5.6	-6.0	-6.2	-5.9	-6.3	-5.9	-6.0
01.59	1.8	-7.0	-5.4	-6.0	-6.3	-6.4	-6.3	-6.6	-6.2	-6.3
02.59	1.5	-7.6	-5.9	-6.4	-6.7	-6.7	-6.6	-7.1	-6.6	-6.7
03.59	1.4	-8.2	-6.4	-6.8	-7.1	-7.1	-7.1	-7.6	-7.0	-7.2
04.59	1.0	-8.9	-7.0	-7.4	-7.6	-7.6	-7.7	-8.3	-7.6	-7.8
05.59	0.7	-9.3	-7.5	-8.0	-8.1	-8.1	-8.2	-8.8	-8.1	-8.3
06.59	0.5	-9.9	-8.1	-8.6	-8.8	-8.7	-8.9	-9.3	-8.7	-8.9
07.59	2.0	-9.3	-8.5	-9.1	-9.2	-9.2	-9.3	-9.4	-9.2	-9.2

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล

นายภาณุวัฒน์ เนือยทอง

วัน เดือน ปี ที่เกิด

วันที่ 26 พฤษภาคม 2523

สถานที่เกิด

จังหวัดชัยภูมิ

ประวัติการศึกษา

วิศวกรรมบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) North Eastern
University