

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

ภาณุวัฒน์ เนือยทอง¹ และ เกียรติกร อัครมาศบันลือ²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 66 (0)-2942-8555 ต่อ 1803, 1804 โทรสาร 66 (0)-2579-4576 อีเมล iamkongdan@yahoo.com¹, kriengkrai.a@ku.ac.th²

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมผลิตน้ำแข็งของเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้พลังงานสูงอุตสาหกรรมหนึ่ง เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไม่ได้มีการศึกษาพัฒนาและปรับปรุงมาเป็นเวลาช้านาน บทความนี้นำเสนอการจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของแบบสามมิติเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระจายตัวของอุณหภูมิภายในน้ำแข็งของ การก่อตัวของน้ำแข็ง ผลจากสภาวะขอบเขตของน้ำแข็งของ และความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิภายในน้ำแข็งของ โดยความแม่นยำของการจำลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการเก็บข้อมูลจริงในโรงงานผลิตน้ำแข็งของ ซึ่งการจำลองจะพิจารณาปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และใช้วิธีเอลธาลปีแบบกริดอยู่กับที่ในการแก้ปัญหาการเปลี่ยนสถานะโดยกำหนดช่วงเวลาคำนวณที่ 1 วินาทีและค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแข็งกับของเหลวที่ 0.05°C ผลการจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิภายในของน้ำแข็งพบว่า อุณหภูมิขอบเขตที่สัมผัสกับบ่อน้ำเกลือ และบริเวณสัมผัสอากาศมีอิทธิพลกับเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งมากที่สุด โดยที่อุณหภูมิน้ำเกลือที่อยู่ในช่วง -5 ถึง -7°C และอุณหภูมิอากาศ 1 ถึง 2°C จะใช้เวลาในการขึ้นรูปน้ำแข็งของ 45 ถึง 50 ชั่วโมง โดยตำแหน่งตรงกลางของผิวด้านบนจะเป็นจุดที่ใช้เวลาในการขึ้นรูปนานที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งภายในของทั้งหมด

Abstract

Ice Block industry is very necessary for today, but do not have research for many years. In this study is proposed 3-D Simulation of ice forming by computational fluid dynamics method for study the distribution of temperature, limit of condition and the relation between temperature and time. The result from the precision of simulation is compared with the result from experimental of factory. The simulation determined the problem of heat transfer with conduction and enthalpy based fixed grid methodology that used for the numerical solution of conduction phase-change problem. The forming system is controlled time step size of 1 s and the different of temperature between liquidus

and solidus is 0.05°C . The results of simulation between time and temperature in ice block can be indicated that temperature which contract with salt water tank and air contract has influence with time of forming. Salt-water temperature is -5 to -7°C and air temperature is 1 to 2°C , which time of forming is about 45 to 50 hours. The center of upper surface use the most time to form when compare with another point.

1. บทนำ

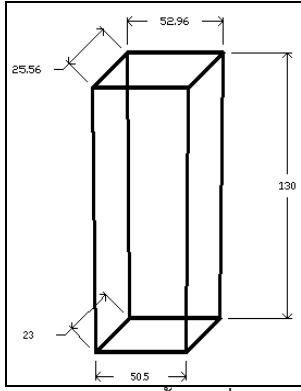
ประเทศไทยมีโรงงานผลิตน้ำแข็งเชิงพาณิชย์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเป็นจำนวนมาก การผลิตน้ำแข็งแต่ละครั้งต้องใช้เวลานานและมีความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงมาก เนื่องจากรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนในการทำน้ำแข็งของมีข้อจำกัดในหลายๆด้านที่ทำให้ยากต่อการศึกษา จึงทำให้ปัญหาลักษณะนี้ขาดการศึกษาอย่างจริงจัง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากวาระห้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของน้ำภายในของน้ำแข็งโดยใช้โปรแกรม Fluent เพื่อทำการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในน้ำของแข็ง โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับกรณีอุณหภูมิที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงจากโรงงาน รวมถึงการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปน้ำแข็งเพื่อศึกษาและทำการปรับปรุงแก้ไขต่อไป

2. การตรวจเอกสาร

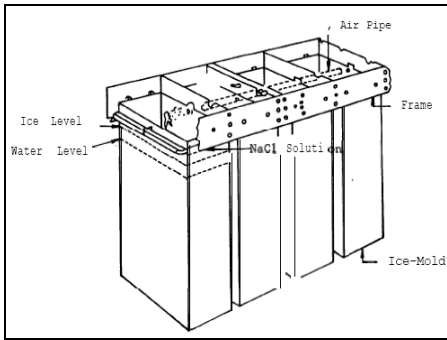
ลักษณะทางกายภาพของน้ำแข็งของเป็นก้อนสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ มีขนาด $25 \times 52 \times 130$ ซม. โดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 1 น้ำหนักประมาณ 150 กิโลกรัมต่อก้อน ซึ่งจะใช้เวลาในการผลิตน้ำแข็งของประมาณ 36-48 ชั่วโมง [3]

จากนั้นนำของน้ำแข็งที่มีน้ำบรรจุไว้แล้วใส่ลงไปในบ่อน้ำเกลือขนาดใหญ่ที่มีอุณหภูมิระหว่าง -5 ถึง -12°C ความร้อนจากน้ำจะถ่ายเทให้กับน้ำเกลือซึ่งจะถูกนำออกไปทิ้งสู่อากาศภายนอกผ่านทางสารทำความเย็นที่ไหลเวียนอยู่ภายในท่อที่เชื่อมกับบ่อน้ำเกลือ ทำให้น้ำเกลือในบ่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ



รูปที่ 1 รูปทรงของช่องน้ำแข็งที่ใช้ในการผลิต

ช่วงทำความเย็นจะรักษาอุณหภูมิโดยปิดฝาไม้ครอบของน้ำแข็งและปิดอีกชั้นด้วยผ้าใบครอบบ่อน้ำเกลือ น้ำที่อยู่ภายในช่องจะกลายเป็นน้ำแข็งภายในระยะเวลาประมาณ 36-48 ชั่วโมงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำเกลือ



รูปที่ 2 ชุดน้ำแข็งช่องในกระบวนการผลิต

ปัญหาการเปลี่ยนสถานะสามารถแบ่งวิธีในการแก้ปัญหาโดยระเบียบวิธีเชิงเลขได้ในหลายรูปแบบ คือ วิธีการอ้างอิงจุดต่อเนื่องจากเส้นแบ่งสถานะมีการเคลื่อนที่ (Moving boundary) และบริเวณดังกล่าวมีปัจจัยสำคัญคือ ปริมาณความร้อนแฝงซึ่งมีค่าสูง จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา และการใช้ตัวแปรหลักในการพิจารณาค่าความร้อนแฝงได้แก่ การใช้อุณหภูมิเป็นหลัก และการใช้เอนทัลปีเป็นหลัก การพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของจุดต่อ แบ่งออกเป็นดังนี้

1. วิธีกริดเคลื่อนที่ (Front tracking) เป็นการพิจารณาว่ากริดเคลื่อนที่ตามเส้นแบ่งสถานะ (Phase front) อย่างต่อเนื่องโดยอาศัยเงื่อนไขสมดุลความร้อนที่เส้นแบ่งสถานะในการคำนวณตำแหน่งเส้นแบ่งสถานะที่เวลาต่างๆ ซึ่งอาจต้องการสมการการผิดรูปของกริด (deforming grid formulation) เพื่อปรับเปลี่ยน mesh ตามการเคลื่อนที่ของเส้นแบ่งสถานะ วิธีนี้ได้ผลถูกต้องสำหรับปัญหาที่จุดเยือกแข็งมีอุณหภูมิคงที่ (isothermal problems) แต่ไม่เหมาะสมกับปัญหาที่อุณหภูมิเยือกแข็งเป็นช่วงของอุณหภูมิ (mushy problem)

2. วิธีกริดอยู่กับที่ (Fixed grid) เป็นการให้กริดอยู่กับที่ ส่วนตำแหน่งของเส้นแบ่งสถานะจะทราบจากอุณหภูมิที่คำนวณได้วิธีนี้ถูกห้ามจาก Weak formulation ซึ่งเงื่อนไขที่เส้นแบ่งสถานะ มีความหมายอยู่ภายในสมการแล้ว จึงไม่ต้องใช้เงื่อนไขดังกล่าวในการหาตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะไปพร้อมๆ กัน ข้อดีคือ ไม่จำเป็นต้องทราบ

ตำแหน่งเริ่มต้นของการเปลี่ยนสถานะ ทำให้เหมาะสมกับปัญหาที่มีช่วงอุณหภูมิเยือกแข็ง (mushy problems) ปัญหาที่มีรูปแบบการแข็งตัวที่ซับซ้อน และปัญหาการแข็งตัวในหลายมิติ [2]

ในกรณีที่ใช้โปรแกรมด้าน CFD ในการแก้ปัญหาเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะ โปรแกรมจะกำหนดรูปแบบทั้งหมด ทั้งมวล โมเมนต์ และพลังงาน สำหรับสถานะของเหลวในสองและสามมิติ การเปลี่ยนสถานะจะถูกหาโดยสมดุลความร้อนและรอยต่อสถานะจะถูกหาโดยอัตราส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของสองสถานะ ซึ่งความแม่นยำของรอยต่อสถานะจะขึ้นอยู่กับขนาดของกริดและขนาดของ Time steps ที่ถูกกำหนดในการแก้ปัญหาแต่ละปัญหา [1]

3. สมการทางคณิตศาสตร์

การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาจากสมการครอบคลุมและ สมการเฉพาะเจาะจง [2]

สมการครอบคลุม (Governing equation) พิจารณาจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy)

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} + q_{gen} \quad (1)$$

โดยที่ q_x, q_y, q_z แทนอัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer rate) ในแกน x, y, z ตามลำดับ

สมการเฉพาะเจาะจง (Constitutive equations) ประกอบจากกฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law)

$$\vec{q} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} - k \frac{\partial T}{\partial y} \hat{j} - k \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k} \quad (2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k จะขึ้นกับอุณหภูมิ T ในเบื้องต้นจะพิจารณาให้ k ในแต่ละสถานะมีค่าคงที่ และพลังงานภายในทั้งหมดเท่ากับมีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนสัมผัส (Sensible heat) กับความร้อนแฝง (latent heat)

$$U = \int_{T_{ref}}^T \rho c_s dT \quad \text{เมื่อ } T < T_F \quad (3)$$

$$U = \int_{T_{ref}}^T \rho c_s dT + \rho L + \int_{T_F}^T \rho c_L dT \quad \text{เมื่อ } T \geq T_F \quad (4)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานภายในจำเพาะ u และเอนทัลปีจำเพาะ h

$$dh = du + d(Pv) = du + Pdv + vdP \quad (5)$$

จะได้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการขึ้นรูปของน้ำแข็ง

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$H = \int_{T_{ref}}^T \rho c_s dT \quad \text{เมื่อ } T < T_F \quad (7)$$

$$H = \int_{T_{ref}}^T \rho c_s dT + \rho L + \int_{T_F}^T \rho c_L dT \quad \text{เมื่อ } T \geq T_F \quad (8)$$

สำหรับการแก้ปัญหาการเปลี่ยนสถานะของน้ำ โปรแกรม Fluent ได้กำหนดการแก้ปัญหาการเปลี่ยนสถานะโดยเอนทัลปีจะถูกกำหนดโดยผลรวมของ Sensible enthalpy (h) กับ ค่าความร้อนแฝง ΔH

$$H = h + \Delta H \quad (9)$$

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

ดังนั้นจะได้สมการรวมดังนี้

$$H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \Delta H \quad (11)$$

โดยที่ h_{ref} = เอนทาลปีอ้างอิง

T_{ref} = อุณหภูมิอ้างอิง

c_p = ความจุความร้อนที่ความดันคงที่

ความร้อนแฝงเขียนในพจน์ของความร้อนแฝงของสารได้

$$\Delta H = \beta L \quad (12)$$

โดยที่ อัตราส่วนของเหลว (Liquid fraction), β ถูกกำหนดโดย

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquid} - T_{solidus}} \quad (13)$$

$$\beta = 0; \quad T < T_{solidus}$$

$$\beta = 1; \quad T > T_{solidus}$$

สมดุลพลังงานที่ผิวรอยต่อในระบบแกนสำหรับหลายมิติ

$$\rho_s L \frac{\partial s}{\partial t} = \left[1 + \left(\frac{\partial s}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y} \right)^2 \right] \left[k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right)_s - k_l \left(\frac{\partial T_l}{\partial z} \right)_l \right] \quad (14)$$

โดยที่ S คือ ความหนาของชั้นหลอมเหลว ρ_s คือความหนาแน่นของแข็ง T_s คืออุณหภูมิของแข็ง T_l คืออุณหภูมิของเหลว ความหนาแน่นที่ผกผันตามอุณหภูมิสามารถหาได้จากสมการ

$$\rho = \rho T_{ref} - \rho T_{ref} \beta T_{ref} (T - T_{ref}) \quad (15)$$

แนวของเส้นรอยต่อเป็นส่วนสำคัญในวิธีเชิงตัวเลข ในระบบแกนสองมิติและสามมิติจะเกี่ยวข้องกับระบบการเก็บข้อมูลการทดลอง ถ้าอุณหภูมิขึ้นอยู่กับค่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มความยากขึ้น เหตุผลหลักก็คือมีความใกล้เคียงการเปลี่ยนสถานะ สภาวะอุณหภูมิ ความเร็วและการเคลื่อนที่ความร้อน ในการหาแนวเส้นรอยต่อจึงไม่มีความจำเป็นซึ่งวิธีการที่ใช้แบบ Fixed grid และ สมการเอลทาลปี ในส่วนความร้อนแฝงจะถูกกำหนดใน source term [1]

4. การเปรียบเทียบผลการศึกษา

ผลการศึกษาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การเก็บข้อมูลจากโรงงานกับการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent

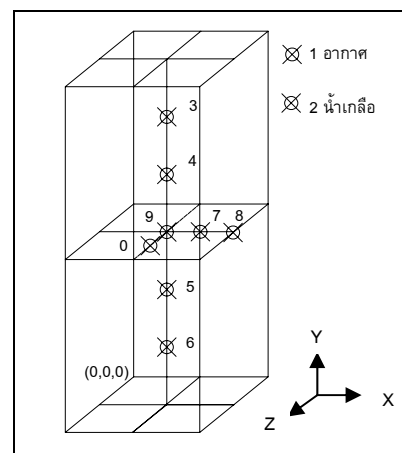
4.1 การเก็บข้อมูลจากโรงงาน

ประกอบชุดวัดอุณหภูมิโดยนำหัวต่อวัดที่ตำแหน่งที่พิจารณาจากรูปที่ 3 โดยทำการบันทึกข้อมูลทั้งหมดรวม 6 ครั้ง และตั้งค่านับที่ผลอุณหภูมิทุกๆ 10 นาที จุดวัดจะแบ่งออกเป็นจุดวัดภายในของน้ำแข็งซึ่งมี 8 จุดซึ่งกระจายตามระยะทางในแนวแกนทั้ง 3 แกน และจุดวัดภายนอกซึ่งเป็นสภาวะขอบเขตอีก 2 จุดซึ่งได้แก่ อุณหภูมิอากาศเหนือของน้ำแข็งกับอุณหภูมิน้ำเกลือรอบนอกของน้ำแข็ง โดยใช้เวลาประมาณ 40-50 ชั่วโมง

อุปกรณ์การทดลองประกอบไปด้วย เครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบ 10 ช่องสัญญาณ Comark รุ่น C 8510 ที่มีช่วงอุณหภูมิวัด -100 °C ถึง 1300 °C ซึ่งจะต่อเข้ากับหัวต่อเชื่อมเครื่องบันทึกอุณหภูมิโดยที่หัวต่อประกอบกับสาย Thermocouple Type K ซึ่งเชื่อมหัวต่อด้วยไฟฟ้า

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 4 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

ตารางที่ 1 ตำแหน่งจุดวัดในแกน X-Y-Z	
ช่องวัดที่	ระยะแนวแกน X,Y,Z (cm)
0	(26.67 , 62 , 19.25)
1	อากาศเหนือของน้ำแข็ง
2	น้ำเกลือภายนอกของน้ำแข็ง
3	(26.83 , 104 , 12.75)
4	(26.83 , 84 , 12.75)
5	(26.83 , 42 , 12.75)
6	(26.83 , 20 , 12.75)
7	(39.17 , 62 , 12.50)
8	(52.00 , 62 , 12.50)
9	(26.83 , 62 , 12.75)



รูปที่ 3 จุดวัดทั้ง 10 จุดบนตำแหน่งน้ำแข็งของ

4.2 การจำลองด้วยโปรแกรม Fluent

สภาวะเริ่มต้นที่ใช้ในการจำลองโปรแกรม Fluent ของน้ำอยู่ในสถานะของเหลว ซึ่งกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 °C ส่วนสภาวะขอบเขตที่ใช้ในการจำลองโปรแกรม Fluent ซึ่งได้มาจากการเก็บข้อมูลในส่วนของการทดลองครั้งที่ 5 ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ดังตารางที่ 2 ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

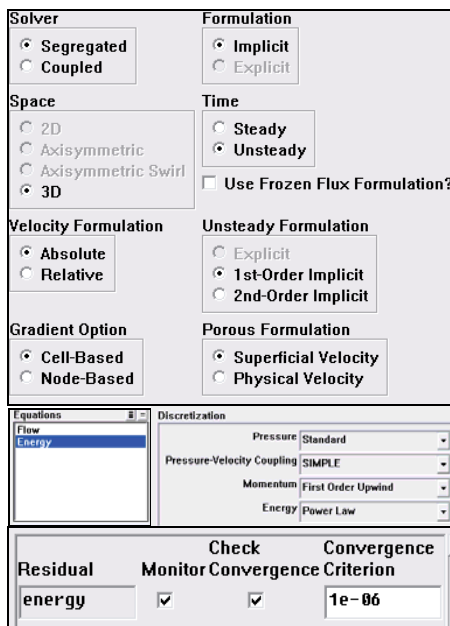
1. ผนังด้านบนกำหนดให้มีอุณหภูมิคงที่ 1.44 °C ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนที่ถูกกำหนดโดยช่องสัญญาณวัดที่ 1
2. ผนังด้านข้างและด้านล่างกำหนดให้มีอุณหภูมิคงที่ -7.54 °C ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนที่ถูกกำหนดโดยช่องสัญญาณวัดที่ 2

ในการจำลองกำหนดขนาดกริดดังตารางที่ 3 และกำหนดค่าความแตกต่างอุณหภูมิของเหลวกับอุณหภูมิของแข็งในช่วงเปลี่ยนแปลงเฟสเป็น 0.05 °C และทำการแก้ปัญหาด้วยวิธี Segregated ในการจำลองแบบ 3 มิติที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Unsteady) และทำการประมาณตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยวิธี implicit ซึ่งสมการที่พิจารณาได้แก่ สมการพลังงานที่ถูกทำ Discretization equation ดังรูปที่ 4 ซึ่งกำหนดค่าใส่สำหรับสมการพลังงานที่ 1×10^6

ตารางที่ 2 แสดงผลอุณหภูมิขอบเขตที่ได้จากการทดลอง

การทดลอง	อุณหภูมิเฉลี่ยจุดวัดที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิจุดวัดที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
1	2.04	-5.30
2	2.59	-5.82
3	1.22	-6.06
4	0.47	-5.85
5*	1.44	-7.54
6	2.50	-6.67

5* เป็นการทดลองที่ถูกเลือกใช้ในการนำเสนองานวิจัยนี้



รูปที่ 4 การกำหนดรูปแบบสมการคำนวณที่ใช้ในโปรแกรม fluent

ตารางที่ 3 ขนาดกริดที่ใช้จำลองด้วยโปรแกรม fluent ของการทดลองครั้งที่ 5

Cells	Faces	Nodes	Partitions
179140	549068	190998	1

5. ผลการทดลอง

แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ผลการทดลองวัดอุณหภูมิ, ผลการจำลองด้วยโปรแกรม fluent และผลการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองวัดอุณหภูมิกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent

5.1 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิ

ผลการทดลองที่พิจารณาเป็นการทดลองที่ 5 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6, 7, 8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับระยะทางในแนวแกน X, Y, Z ตามลำดับ และรูปที่ 5 แสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำแข็งหลังกระบวนการผลิตซึ่งแสดงในระนาบ XY และระนาบ XZ

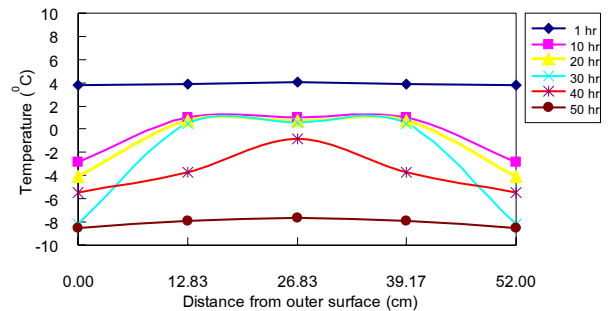


ระนาบ XY

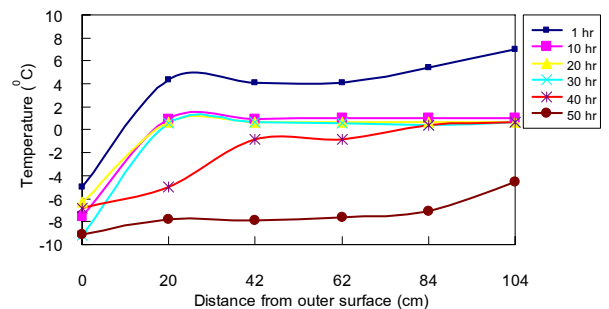


ระนาบ XZ

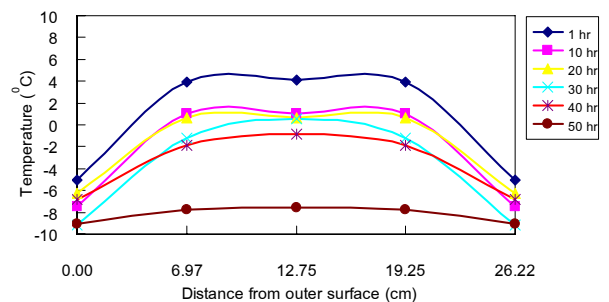
รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของก้อนน้ำแข็งตามระนาบ XY และ XZ จากการทดลอง



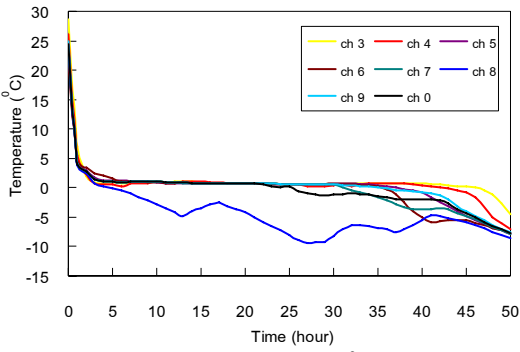
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางจากผิวขอบในแนวแกน X ในแต่ละช่วงเวลา



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางจากผิวขอบในแนวแกน Y ในแต่ละช่วงเวลา



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางจากผิวขอบในแนวแกน Z ในแต่ละช่วงเวลา

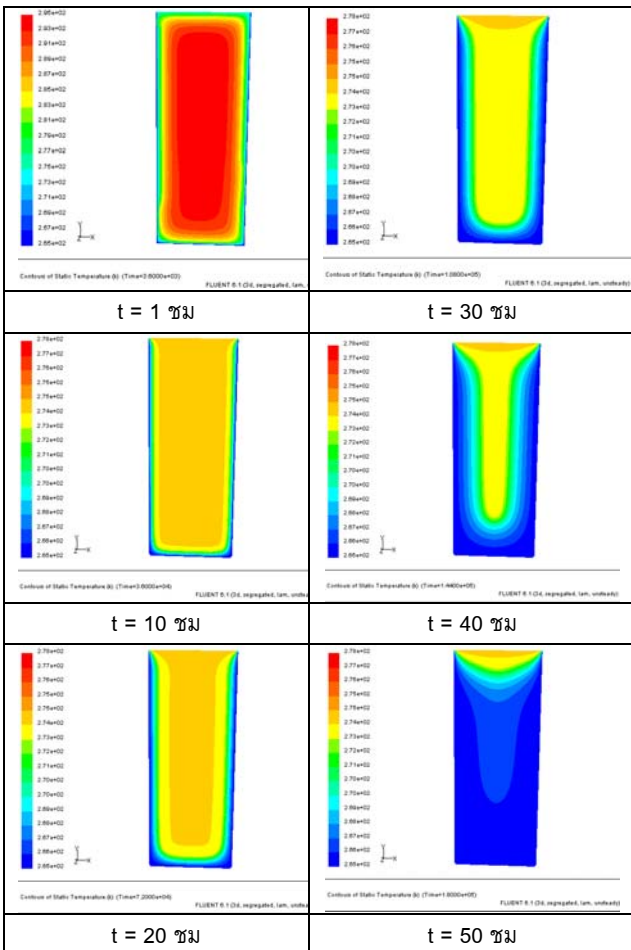


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในแต่ละช่องสัญญาณของการทดลองที่ 5

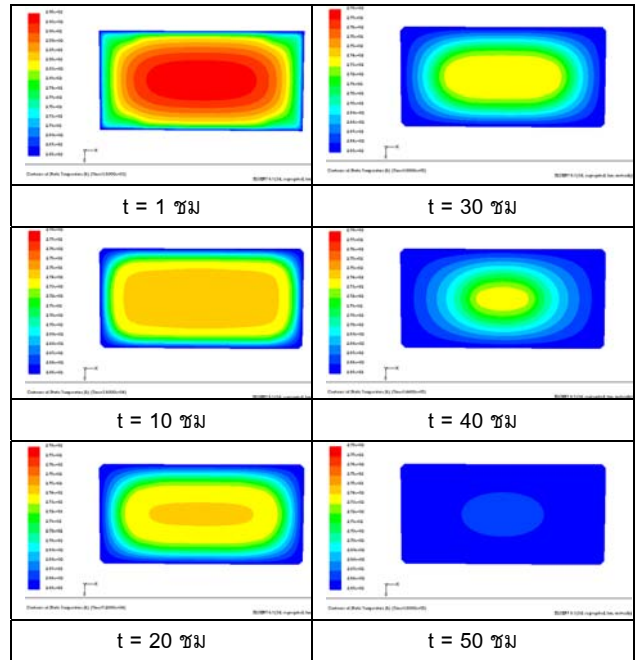
จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในช่องน้ำแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วในชั่วโมงที่ 5 และจะคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 0°C และจะลดลงที่ชั่วโมงที่ 40 โดยจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแต่ละช่องสัญญาณวัด

5.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent

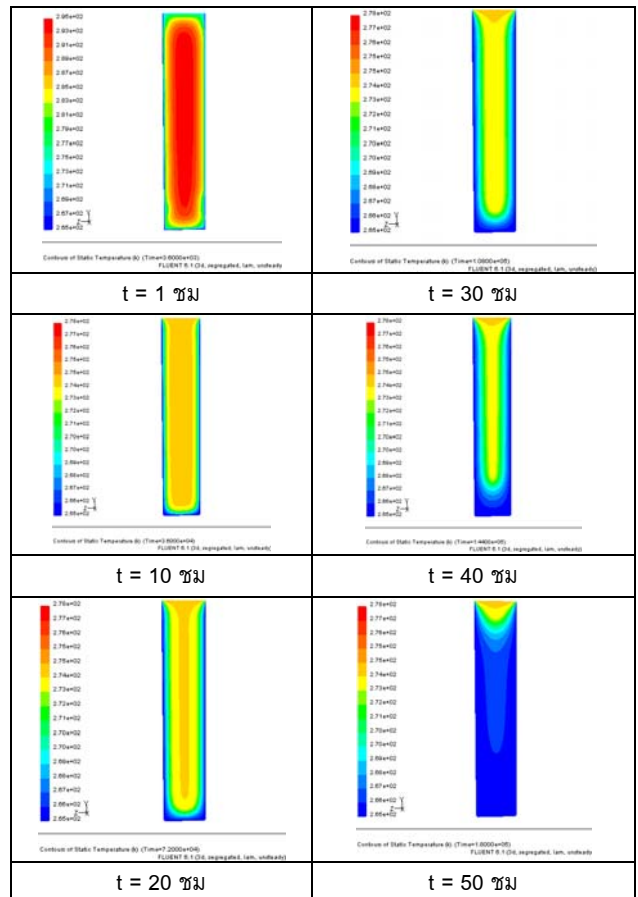
ผลการทดลองแสดงในรูปของการกระจายตัวของอุณหภูมิกับเวลาในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งแยกผลตามระนาบ XY, XZ, YZ ตามลำดับ



รูปที่ 10 ผลการกระจายอุณหภูมิในระนาบ XY (แกน Z) ในแต่ละช่วงเวลาของการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent



รูปที่ 11 ผลการกระจายอุณหภูมิในระนาบ XZ (แกน Y) ในแต่ละช่วงเวลาของการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent

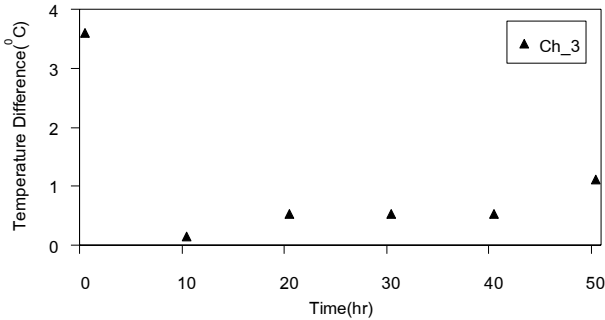


รูปที่ 12 ผลการกระจายอุณหภูมิในระนาบ YZ (แกน X) ในแต่ละช่วงเวลาของการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent

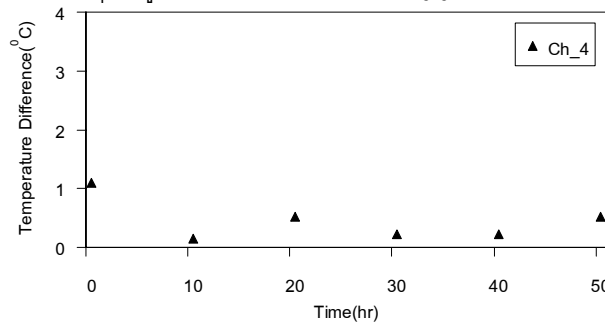
จากรูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิมระนาบ XY ในแต่ละช่วงเวลาจาก t=1 ชม ถึง t=50 ชม จะพบว่าในช่วง t=1 ชม ถึง t=10 ชม จะเกิดการลดลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการ

ถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และเข้าสู่การเปลี่ยนสถานะในช่วงก่อนชั่วโมงที่ 10 และจะค่อยๆลดอุณหภูมิในบริเวณสัมผัสผิวขอบเขตและลดลงมาเรื่อยๆตามระยะทางจากผิวผนังที่สัมผัสน้ำเกลือเป็นหลัก และจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งเกือบทั้งหมดที่ $t = 50$ ชม. ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 11 และ 12 เนื่องจากเป็นระบบที่พิจารณาพร้อมกัน

5.3 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองวัดอุณหภูมิกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับผลต่างของอุณหภูมิผลการทดลองกับอุณหภูมิแบบจำลอง ที่ตำแหน่งช่องสัญญาณ 3



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับผลต่างของอุณหภูมิผลการทดลองกับอุณหภูมิแบบจำลอง ที่ตำแหน่งช่องสัญญาณ 4

จากผลของการเปรียบเทียบที่แสดงดังรูปที่ 13 และ 14 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างอุณหภูมิของผลการทดลองกับผลการจำลอง (°C) ในแต่ละช่วงเวลา (ชั่วโมง) ซึ่งพบว่าค่าความแตกต่างจะมากที่สุดในช่วงชั่วโมงที่ 0 ถึง 1 ซึ่งมีค่าความแตกต่างประมาณ 3.6 ในช่องสัญญาณที่ 3 และ 1.1 ในช่องสัญญาณที่ 4 ซึ่งเป็นช่วงก่อนการทดลอง ซึ่งผลเกิดจากการเตรียมตัวในการทดลองซึ่งยังไม่อยู่ในสภาวะระบบปิด ทำให้เกิดผลกระทบจากปัจจัยภายนอกทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

ซึ่งจากตารางที่ 4 จะพบว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในชั่วโมงที่ 1 จะมากที่สุดและจะน้อยลงในช่วงชั่วโมงที่ 10 เป็นต้นไป เนื่องจากอยู่ในระบบปิด ที่ไม่มีปัจจัยภายนอกมาเกี่ยวข้อง แต่ในเวลาที่จะเพิ่มขึ้นจะเห็นว่ายังมีค่าความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นอยู่บ้าง เนื่องมาจากในกระบวนการผลิตจริง จำเป็นต้องมีการเปิด-ปิดบอตตลอดเวลาจึงทำให้เกิดผลกระทบจากสภาวะภายนอก ทำให้ระบบไม่อยู่ในสภาวะระบบปิดได้ตลอด

ตารางที่ 4 ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิการทดลองกับอุณหภูมิแบบจำลอง (°C) แยกตามช่องสัญญาณในแต่ละชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	ช่องสัญญาณที่							
	3	4	5	6	7	8	9	0
1	3.6	1.1	1.7	3.2	0.9	0.7	0	0.6
10	0.14	0.14	0.24	0.73	0.83	0.2	0.14	0.83
20	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.1	0.53	0.53
30	0.53	0.23	0.53	0.43	0.33	0.65	0.43	0.56
40	0.53	0.23	0.97	1.31	0.95	0.5	0.97	1.79
50	1.12	0.52	1.32	0.25	0.35	0.95	1.02	0.25

6. สรุปผลการทดลอง

จากตารางที่ 4 สรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนเกิดจาก 2 ส่วนคือ

1. ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง ซึ่งเกิดจากก่อนการวัดที่ระบบยังไม่อยู่ในสภาวะระบบปิดจึงทำให้สภาวะภายนอกมีผลต่อการวัดอุณหภูมิ และความคลาดเคลื่อนในระหว่างการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงการผลิตที่มีการถ่ายเทของน้ำแข็งอยู่ตลอดเวลาทำให้ไม่อยู่ในระบบปิดจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน

2. ความคลาดเคลื่อนจากการจำลองด้วยโปรแกรม fluent เนื่องจากการพิจารณาปัญหาการเปลี่ยนสถานะที่เกิดจากการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว นั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะขอบเขตซึ่งได้มาจากการทดลองเป็นหลักทำให้ผลที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนตามผลการทดลอง และปัจจัยที่ใช้พิจารณาในการจำลองด้วยโปรแกรมคือการกำหนดขนาดช่วงเวลา (Time step size) ในการคำนวณที่ 1 วินาทีและค่าความแตกต่างอุณหภูมิของแข็งกับของเหลวที่ 0.05 °C ซึ่งยังมีค่าที่สูงอยู่ ทำให้การจำลองด้วยโปรแกรมยังไม่สอดคล้องกับผลการทดลองเท่าที่ควร ดังนั้นในการวิจัยขั้นต่อไปในการทดลองควรกำหนดให้เป็นระบบปิดและในการจำลองด้วยโปรแกรม Fluent ควรกำหนดขนาดช่วงเวลา (Time step size) และค่าความแตกต่างอุณหภูมิของแข็งกับของเหลวให้น้อยลง

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผศ.ดร.เกรียงไกร อัครมาศบันลือ ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้านและห้องเย็นอมรรัตน์ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ในการเก็บข้อมูลวิจัย จนทำให้งานวิจัยเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Muttaleb, A., 2005, Numerical investigations of melting of ice in a box. Master of Science in Chemical Engineering. King Fahd University of Petroleum & Minerals.
- รจนา ประไพพนพ, 2547, การจำลองแบบการขึ้นรูปน้ำแข็งของด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม, ว.สงขลานครินทร์ วทท.26 (1):55-70.
- อเนก หีบสมบัติ, 2536, การวิเคราะห์พลังงานในโรงงานน้ำแข็งของ, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.