

การจำลองแบบการแข็งตัวของน้ำแข็งของด้วยโปรแกรม Fluent Computational Modeling of Block Ice's Solidification by Fluent Software

เทิดธรรม อนันตเศรษฐ และ กุณhini มณีรัตน์ *

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

* E-mail: kuntinee.m@chula.ac.th, โทรศัพท์: 0-2218-6610, โทรสาร: 0-2252-2889

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการจำลองแบบการแข็งตัวของน้ำแข็งด้วยโปรแกรม Fluent โดยได้พิจารณาการนำความร้อนในน้ำและน้ำแข็งเท่านั้น การศึกษานี้เลือกใช้ pressure-based solver, power-law scheme, green-gauss cell-based gradient และ second-order implicit temporal scheme โดยได้ตรวจสอบการจำลองในโดเมนขนาดกึ่งอนันต์ใน 1 และ 2 มิติกับผลเฉลยแม่นยำตรงและผลเฉลยเชิงเลขจากโปรแกรมที่ถูกตรวจสอบแล้ว ในการจำลองแบบ 3 มิติ ได้พารามิเตอร์หลักคือช่วงเวลา $dt = 5$ s และขนาดกริด $dx = 20$ mm แล้วจึงจำลองแบบที่อุณหภูมิขอบเขตไม่คงที่อันได้มาจากการวัดอุณหภูมิน้ำเกลือจริงจากโรงงานน้ำแข็ง แล้วจำลองแบบใน 1 และ 2 มิติ เพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองที่ได้สามารถคำนวณพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งชี้สำคัญในการผลิตน้ำแข็งของได้

คำหลัก: การแข็งตัว, น้ำแข็ง, Fluent

Abstract

The objective of this paper is to simulate the ice solidification by the Fluent software. Only heat conduction is considered with the pressure-based solver, power-law scheme, green-gauss cell-based gradient and second-order implicit temporal schemes. The proposed model is verified against exact and numerical solutions from a validated computer program for 1D and 2D test cases. For the 3D semi-infinite model, the obtained parameter sizes are the time step $dt = 5$ s and control volume size $dx = 20$ mm. Then, the model is used to simulate 1D and 2D problems with varied boundary conditions, acquired from the actual measuring of brine temperature in an ice factory, to ensure that the main parameters that are used to monitor the solidification of the block ice can be obtained from the program.

Keywords: Solidification, Ice, Fluent

1. บทนำ

โรงงานผลิตน้ำแข็งของเชิงพาณิชย์ ใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณที่สูงมาก [1] หากสามารถทำนายการแข็งตัวของน้ำแข็ง ก็อาจนำไปสู่การลดปริมาณการใช้พลังงานและปรับปรุงน้ำแข็งให้มีคุณภาพสูงขึ้นได้

ในปัจจุบัน กลศาสตร์การคำนวณได้รับความนิยมในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม เพราะประหยัดและให้ผลที่แม่นยำเพียงพอต่อการใช้งาน แต่ผลลัพธ์ที่ได้ต้องถูกสอบทวนอย่างระมัดระวัง และต้องเป็นอิสระจากอิทธิพลของการแบ่งกริดและการแบ่งช่วงเวลา

สำหรับปัญหาการแข็งตัวของน้ำแข็ง มีการพัฒนาโปรแกรม Fortran จากระเบียบวิธีไฟไนท์วอลุ่ม [2] โดยเปรียบเทียบวิธีการประมาณปริมาณตามเวลา และ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่เส้นแบ่งสถานะที่แตกต่างกัน

แต่ในการพิจารณาปัญหาที่ซับซ้อนขึ้น เช่น การเป่าอากาศที่เพิ่มคุณภาพของน้ำแข็ง การพัฒนาโปรแกรมเองทำได้ยาก จึงได้พิจารณาใช้ Fluent [3] ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์แทน โดยจำเป็นต้องสอบทวนผลจากโปรแกรมเทียบกับฐานข้อมูลเดิม ก่อนจะนำแบบจำลองไปใช้ได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการใช้โปรแกรม

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โปรแกรม Fluent [3] จำลองแบบการเปลี่ยนสถานะจากสมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (1)$$

โดย H คือเอนทัลปี, ρ คือความหนาแน่น, \vec{v} คือความเร็วของของไหล, k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, T คืออุณหภูมิ และ S คือ source term

ค่าเอนทัลปี H มาจากผลรวมของความร้อนสัมผัส h กับความร้อนแฝง ΔH

$$H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \Delta H \quad (2)$$

โดย h_{ref} คือค่าเอนทัลปีอ้างอิง, T_{ref} คืออุณหภูมิอ้างอิง c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ $\Delta H = \beta L$ โดย L คือปริมาณความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ β คือ ค่า liquid fraction ซึ่ง $\beta = 0$ เมื่อ $T < T_F$ และ $\beta = 1$ เมื่อ $T > T_F$ เมื่อ T_F คือ อุณหภูมิเยือกแข็ง

2.2. การเลือก Solver

Fluent มี solver อยู่ 2 ชนิด คือ density-based solver และ pressure-based solver ซึ่งมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน [3]

ในการจำลองแบบการแข็งตัวของน้ำแข็ง ตัวแปรสำคัญ เช่น อุณหภูมิ ความดัน และความเร็ว ไม่ได้มีความเกี่ยวข้องกันมาก จึงไม่จำเป็นต้องใช้ density-based solver และปัญหามีการเปลี่ยนสถานะจึงไม่เหมาะกับ pressure-based coupled solver จึงได้

เลือก pressure-based segregated solver ในการจำลองแบบ

2.3 การประมาณค่าระหว่างจุดต่อ

ในการสร้างระบบสมการพีชคณิต มีการประมาณค่าระหว่างจุดต่อ ในงานวิจัยนี้ได้ประมาณค่าระหว่างจุดต่อโดยใช้ power-law scheme ซึ่งประมาณค่าตัวแปรที่ผิวระหว่างปริมาตรควบคุม โดยการหาผลเฉลยแม่นยำใน 1 มิติ ของสมการ convection – diffusion ค่าตัวแปรจึงขึ้นอยู่กับอิทธิพลของการพา และการแพร่ ทำให้สามารถจำลองแบบการไหลได้ดี คำตอบลู่เข้าเร็ว และปัญหามีค่า Reynold's number ต่ำด้วย

ส่วนการประมาณค่าความชัน ในพจน์การพาและการแพร่ เลือกวิธี green-gauss cell-based เนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณน้อย และปัญหามีรูปทรงไม่ซับซ้อน ทำให้สามารถการแบ่งกริดอย่างสม่ำเสมอได้

2.4 การแบ่งย่อยเชิงเวลา

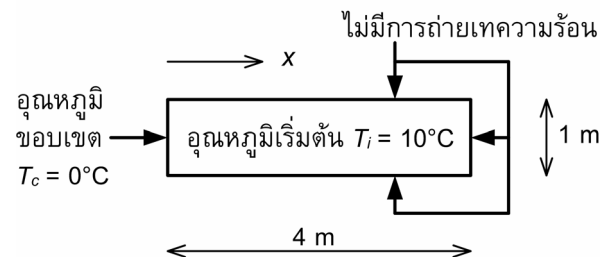
การแบ่งย่อยเชิงเวลา (temporal discretization) ใน Fluent [3] มีอยู่สองวิธีคือ explicit และ implicit ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ second-order implicit scheme เพราะความแม่นยำและเสถียรภาพของคำตอบ

3. การตรวจสอบแบบจำลองกรณี 1 มิติ

แบบจำลองถูกตรวจสอบ โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำและผลเฉลยจากงานวิจัยเดิม [2]

3.1 การนำความร้อนในสภาวะชั่วคราว

กำหนดปัญหาให้มีโดเมนกึ่งอนันต์ ตามงานวิจัยเดิม [2] แต่ Fluent ไม่สามารถจำลองแบบใน 1 มิติได้ จึงต้องกำหนดขนาดและเงื่อนไขขอบเขตเพิ่มเติม ตามรูปที่ 1

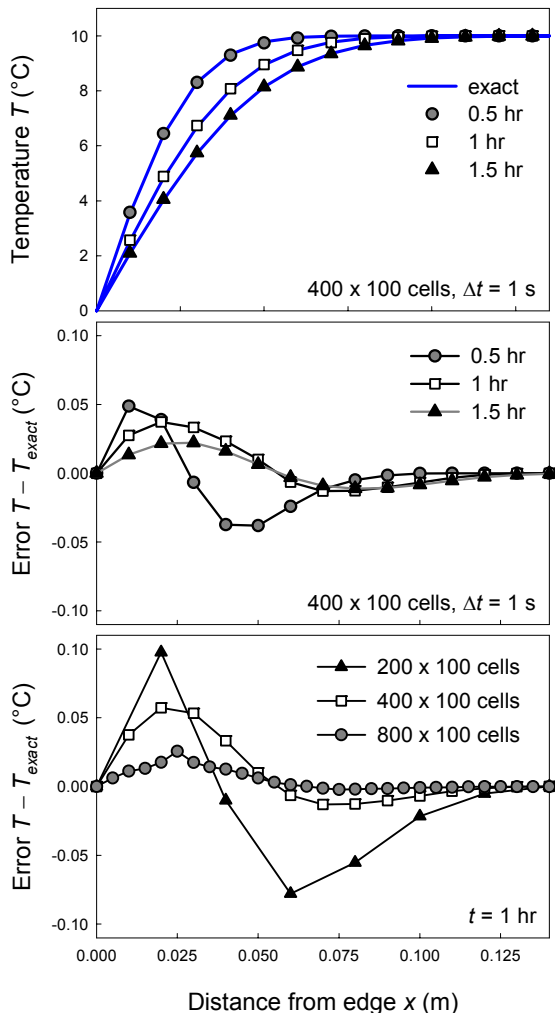


รูปที่ 1 ปัญหาการนำความร้อน 1 มิติในสภาวะชั่วคราว

แบ่งกริดให้มีขนาดเท่ากัน ตามด้านกว้าง 100 cells และตามความยาว 200, 400 และ 800 cells ใช้

ขนาดของช่วงเวลา 10, 1 และ 0.1 s คุณสมบัติของน้ำที่ใช้ คือ $k = 0.556 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $c_p = 4.226 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ และ $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

การกระจายของอุณหภูมิที่ได้จาก Fluent มีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำและผลจากโปรแกรมเดิม [2] มาก (รูปที่ 2) ผลการกระจายของความผิดพลาดของอุณหภูมิมียุคมากที่สุดที่บริเวณใกล้ขอบ และลดลงตามเวลา เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความชันของอุณหภูมิมียุคสูง เมื่อเวลามากขึ้น ความแตกต่างของอุณหภูมิลดลง ให้ค่าความผิดพลาดมากที่สุดมีค่าลดลงด้วย



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งระหว่างผลเฉลยแม่นยำกับแบบจำลองใน 1 มิติ

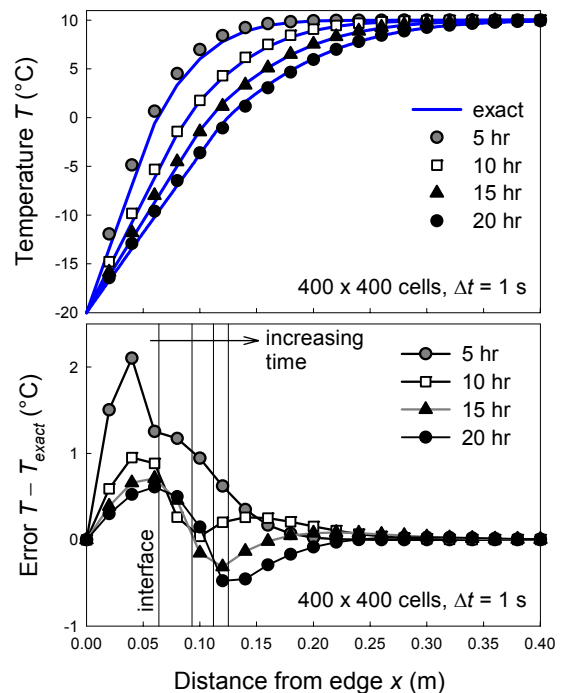
ในการพิจารณาขนาด Δx พบว่าการแบ่งกริดทั้งสามแบบ ให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มเดียวกัน แต่สำหรับ

การกระจายของความผิดพลาด พบว่าเมื่อแบ่งปริมาตรควบคุมให้ละเอียดขึ้นบ้าง ขนาดของช่วงเวลา Δt มีความละเอียดเพียงพอจนไม่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์

3.2 ปัญหาการเปลี่ยนสถานะ

ได้กำหนดให้รูปร่างของปัญหา เหมือนกับการนำความร้อนในรูปที่ 1 แต่เปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตเป็น $T_c = -20^\circ\text{C}$ คุณสมบัติของน้ำในสถานะของเหลวใช้ค่าเดิม สำหรับสถานะของแข็งคือ $k_s = 2.22 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $c_s = 1.762 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ และ $\rho_s = 1000 \text{ kg/m}^3$ ส่วนการเปลี่ยนสถานะ $L = 338 \text{ kJ/kg}$ และ $T_F = 0^\circ\text{C}$

ได้ทดสอบแบบจำลอง ในแนวทางเดียวกับปัญหา ก่อน พบว่าได้ผลใกล้เคียงมากกับผลเฉลยแม่นยำและจากโปรแกรมเดิม [2] เช่นเดียวกัน (รูปที่ 3) การกระจายของค่าความผิดพลาด มีค่าสูงที่บริเวณใกล้ขอบและที่เส้นเปลี่ยนสถานะ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องมีการคำนวณความร้อนแฝงด้วย



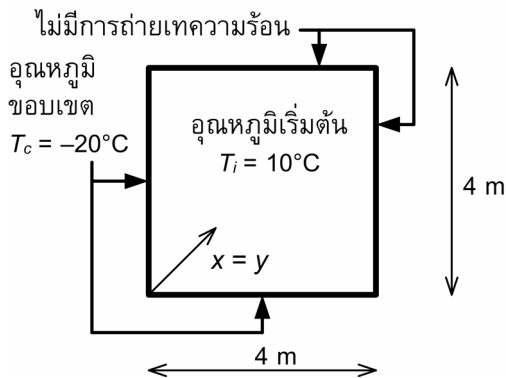
รูปที่ 3 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งระหว่างผลเฉลยแม่นยำกับแบบจำลองใน 2 มิติ

การพิจารณาผลของขนาด Δx และ Δt ที่มีต่อผลลัพธ์ ได้ข้อสรุปว่า เมื่อแบ่งขนาดของปริมาตรควบคุมให้เล็กลง ผลลัพธ์ที่ได้จะแม่นยำมากขึ้น และ

เมื่อใช้ช่วงเวลานาขนาดเล็ก ค่าความผิดพลาดมากที่สุด จะอยู่ที่ตำแหน่งเส้นแบ่งสถานะพอดี เนื่องจากมีการ ดึงพลังงานที่เกิดจากความร้อนแฝง ออกมาจาก ปริมาตรควบคุมที่ตำแหน่งนี้เป็นปริมาณมาก

4. การตรวจสอบแบบจำลองกรณี 2 มิติ

ได้กำหนดปัญหาที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ (semi-infinite region) ในแนวทางเดียวกับงานวิจัยเดิม [2] (รูปที่ 4) โดยได้แบ่งโดเมนเป็น 200 x 200 และ 400 x 400 cells และ ใช้ขนาดของช่วงเวลา 0.5 และ 1 s

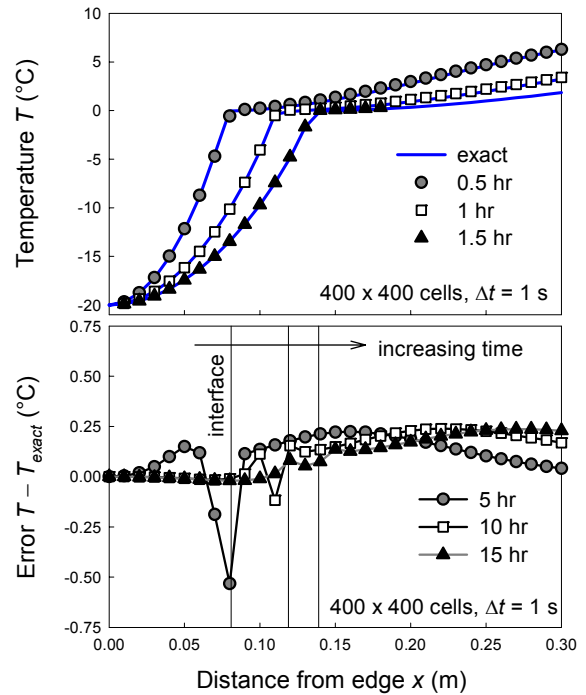


รูปที่ 4 การกำหนดปัญหาเปลี่ยนสถานะ 2 มิติ

เมื่อใช้จำนวนปริมาตรควบคุม และขนาดช่วงเวลาคงที่ ได้การกระจายของอุณหภูมิตามเส้น $x = y$ ที่ เวลา 5, 10 และ 15 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำ และจาก [2] มาก

เมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ เมื่อใช้จำนวนปริมาตรควบคุม และขนาดของช่วงเวลาคงที่ พบว่าตำแหน่งที่มีค่าความผิดพลาดสูงคือ เส้นเปลี่ยนสถานะเช่นเดียวกับปัญหา 1 มิติ เนื่องจากการ ประเมินความร้อนแฝง ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการ ประเมินเชิงเลขมากเป็นพิเศษ

เมื่อพิจารณาผลของขนาดปริมาตรควบคุม พบว่า เมื่อแบ่งขนาดของปริมาตรควบคุมให้เล็กลง ผลลัพธ์ที่ได้จะแม่นยำมากขึ้น เมื่อใช้ขนาดของช่วงเวลาต่างกัน คือ 0.5 และ 1 s พบว่าได้ผลลัพธ์ที่มีการกระจายของ ค่าความผิดพลาดใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 5 การกระจายของอุณหภูมิและความผิดพลาดใน 2 มิติ จากแบบจำลอง 400 x 400 cells และ $\Delta t = 1$ s

5. ปัญหาการเปลี่ยนสถานะ 3 มิติ

ปัญหาใน 3 มิติ เป็นงานซึ่งขยายผลจากปัญหา 1 -2 มิติ จึงไม่มีผลแม่นยำตรงหรือผลเฉลยโดยประมาณมา สอบทวนความถูกต้อง แต่ใช้ปัญหานี้ในการศึกษา ความเป็นอิสระจากขนาดกริด Δx และช่วงเวลา Δt เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในขั้นต่อไป

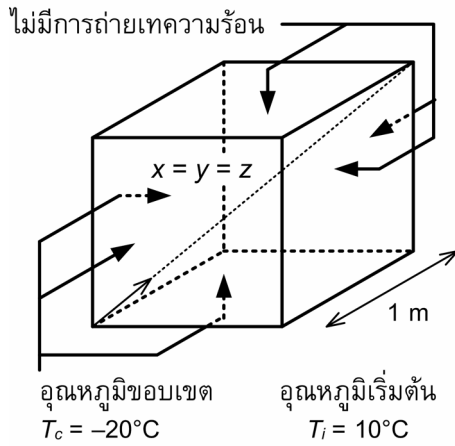
กำหนดให้โดเมนเป็นลูกบาศก์ และมีเงื่อนไขตาม รูปที่ 6 แบ่งกริดให้ทุกปริมาตรควบคุมมีขนาดเท่ากัน ดังนี้ 50 x 50 x 50 และ 100 x 100 x 100 cells ขนาดช่วงเวลา Δt คือ 5 และ 1 s

เมื่อพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิตามเส้น $x = y = z$ ที่เวลา 1, 3 และ 5 ชั่วโมง (รูปที่ 7) พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิ มีลักษณะคล้ายกับผล เฉลยปัญหาการเปลี่ยนสถานะ 2 มิติ โดยมีการแข็งตัวของน้ำเร็วกว่าจากการนำความร้อนในแกนที่สาม

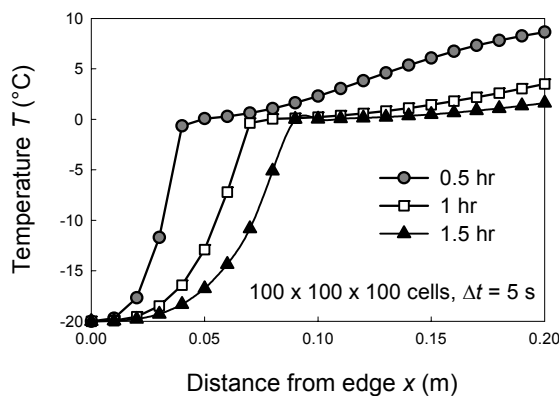
ในการพิจารณาผลของปริมาตรควบคุม พบว่า แบบจำลองทั้งสองให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก จึงอาจ กล่าวได้ว่า แบบจำลองเป็นอิสระจากขนาดของการ แบ่งปริมาตรควบคุมที่ $dx = 20$ mm

สำหรับขนาดช่วงเวลา Δt ประกอบกับขนาด dx

พบว่าแบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่มีค่าใกล้เคียงกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองเป็นอิสระจากขนาดช่วงเวลา $dt = 5$ s



รูปที่ 6 การกำหนดปัญหาเปลี่ยนสถานะ 3 มิติ



รูปที่ 7 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากปัญหา 3 มิติ

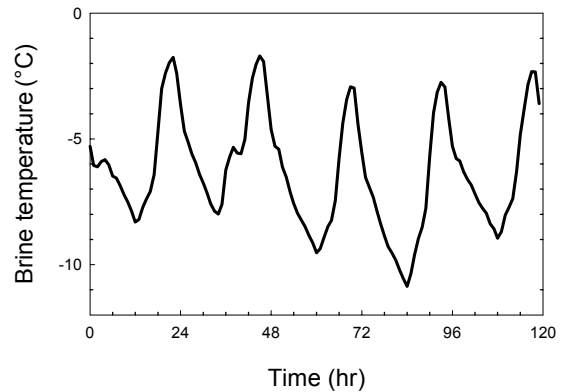
6. กรณีศึกษาเมื่ออุณหภูมิขอบเขตไม่คงที่ 1 มิติ

มีการเก็บข้อมูลอุณหภูมิน้ำเกลือ (รูปที่ 8) ที่ใช้แช่ของน้ำแข็ง ในการศึกษาแนวทางประหยัดพลังงานที่โรงงานน้ำแข็งแห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรสาคร [4] จึงต้องพัฒนาแบบจำลองที่อุณหภูมิขอบเขตไม่คงที่ได้

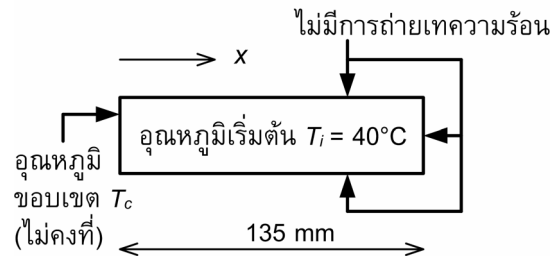
จึงได้พิจารณากรณีศึกษา 1 มิติ เปรียบเทียบผลการจำลองแบบกับงานเดิม [4] โดยกำหนดโดเมนยาว 0.135 m (รูปที่ 9) ซึ่งมีภาคตัดขวางขนาด 1 m x 1 m และใช้อุณหภูมิน้ำเกลือในรูปที่ 8 เป็นอุณหภูมิขอบเขต แบ่งกริดตามความยาว 50 cells และใช้ขนาดของช่วงเวลา $\Delta t = 1$ s

จากการจำลองแบบ ได้การกระจายของอุณหภูมิ

ในรูปที่ 10 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยเดิม [4] พบว่าความแตกต่างของการกระจายตัวของอุณหภูมิมีค่าสูง ณ บริเวณใกล้ขอบที่เวลาเวลาเริ่มต้น เนื่องจากมีความชันของอุณหภูมิสูง และค่าความแตกต่างจะน้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 8 อุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยรายชั่วโมง ระหว่างวันที่ 1-5 ตุลาคม 2004 [4]



รูปที่ 9 ลักษณะปัญหากรณีศึกษา 1 มิติ

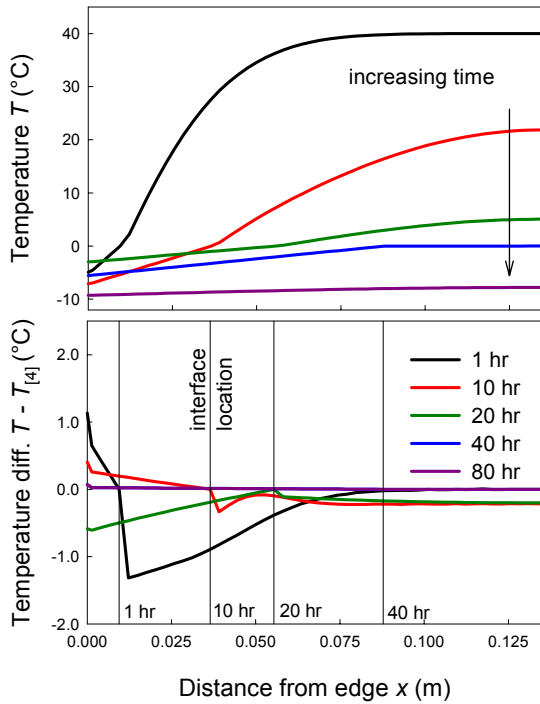
เมื่อกำหนดให้พลังงานภายในต่อหน่วยปริมาตร u ของแต่ละ cell มีค่าเท่ากับความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝงดังสมการที่ (2) จะสามารถหาค่าของพลังงานภายในแทนเอนทัลปี จะได้พลังงานภายในรวม U ในแต่ละช่วงเวลา โดย

$$U = \sum u_i v_i \quad (3)$$

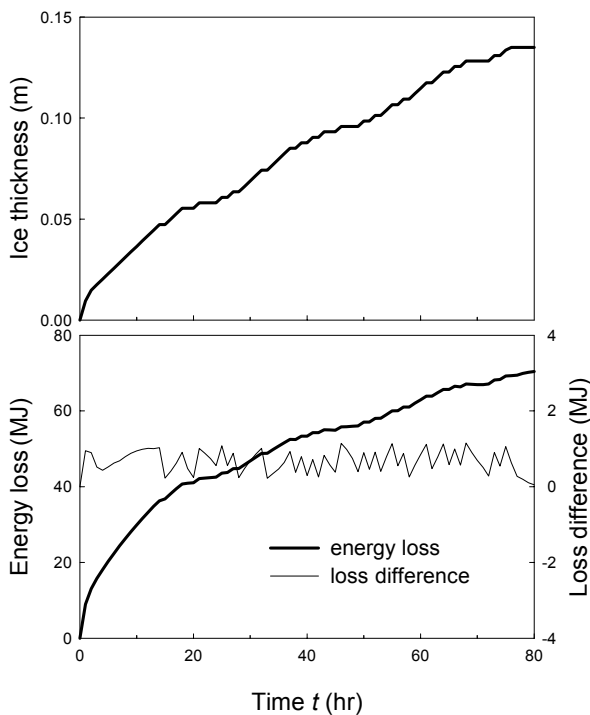
เมื่อ u คือพลังงานภายในต่อหน่วยปริมาตร และ v คือปริมาตรของแต่ละปริมาตรควบคุม i ทำให้สามารถหาค่าการสูญเสียพลังงานของน้ำได้จากการลดลงของพลังงานภายในรวม U

การสูญเสียพลังงานที่ได้ในรูปที่ 11 มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากงานวิจัยเดิม โดยมีความแตกต่างน้อยกว่า 1.2 MJ ส่วนความหนาของน้ำแข็ง เมื่อพิจารณา

จากปริมาณความร้อนที่กำลังแข็งตัวพบว่ามีค่า
เหมือนกับผลที่ได้จากงานวิจัยเดิม



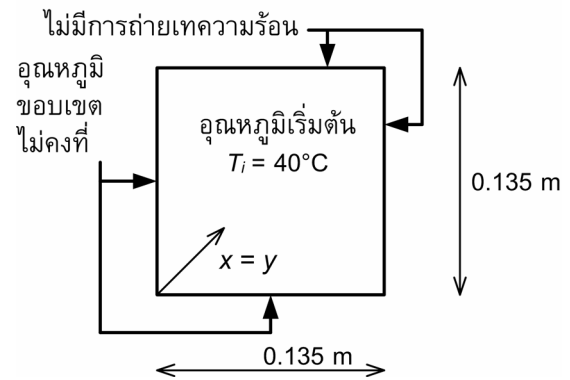
รูปที่ 10 การกระจายของอุณหภูมิและความแตกต่าง
ของอุณหภูมิจากโปรแกรม Fluent กับ [4]



รูปที่ 11 ความหนาของน้ำแข็ง การสูญเสียพลังงาน
และค่าความแตกต่าง ระหว่าง Fluent กับ [4]

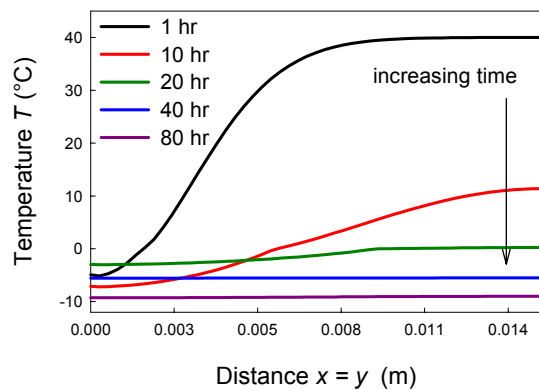
7. กรณีศึกษาเมื่ออุณหภูมิขอบเขตไม่คงที่ 2 มิติ

สำหรับกรณีศึกษา 2 มิติ จะเปรียบเทียบผลกับ
กรณีศึกษา 1 มิติ โดยกำหนดรูปร่างปัญหาขนาด
0.135 m x 0.135 m (รูปที่ 12) และมีด้านลึก 1 m ใช้
อุณหภูมิน้ำเกลือตามรูปที่ 8 เป็นอุณหภูมิขอบเขต
เช่นเดียวกับกรณีศึกษา 1 มิติ โดยได้แบ่งโดเมน
ออกเป็น 50 x 50 cells และใช้ขนาดของช่วงเวลา Δt
= 1 s



รูปที่ 12 ลักษณะปัญหากรณีศึกษา 2 มิติ

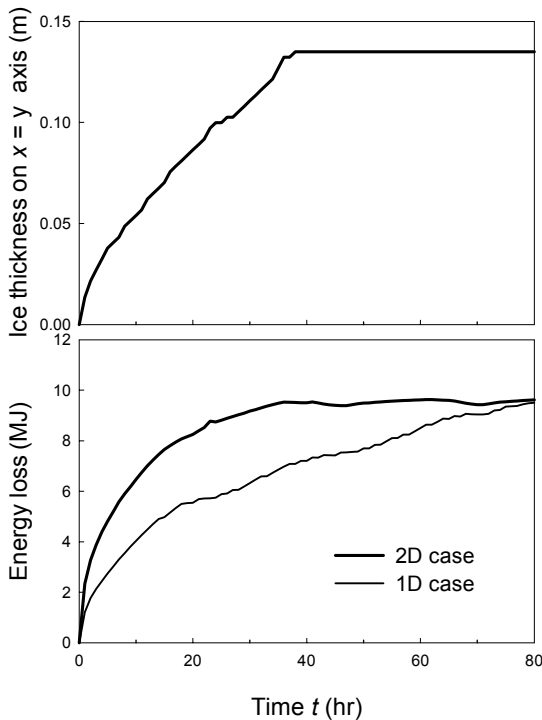
จากการจำลองแบบ พบว่าการกระจายตัวของ
อุณหภูมิตามแนวแกน $x = y$ ดังแสดงในรูปที่ 13 จะ
เห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิ มีลักษณะ
ใกล้เคียงกับกรณีศึกษา 1 มิติ เพียงแต่อุณหภูมิจะ
ลดลงเร็วกว่า เนื่องจากในกรณีศึกษา 2 มิติ มีการ
ถ่ายเทความร้อน ออกจากขอบของโดเมนสองด้าน
ในขณะที่ในปัญหา 1 มิติ มีการถ่ายเทความร้อนเพียง
ด้านเดียว



รูปที่ 13 การกระจายของอุณหภูมิกกรณีศึกษา 2 มิติ

เมื่อพิจารณาความหนาของน้ำแข็ง (รูปที่ 14) พบว่าการแข็งตัวของน้ำในกรณีศึกษา 2 มิติ นั้น เร็วกว่ากรณีศึกษา 1 มิติ มาก กล่าวคือในกรณีศึกษา 2 มิติ น้ำจะแข็งตัวทั้งโดเมนเมื่อเวลาผ่านไป 38 ชั่วโมง ในขณะที่ในกรณีศึกษา 1 มิติ น้ำจะแข็งตัวทั้งโดเมนเมื่อเวลาผ่านไป 76 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาการสูญเสียพลังงาน (รูปที่ 14) พบว่าผลที่ได้ มีแนวโน้มสอดคล้องกับความหนาของน้ำแข็ง คือการสูญเสียพลังงานในกรณีศึกษา 2 มิติ จะมากกว่ากรณี 1 มิติ จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิภายในโดเมนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิขอบเขต การสูญเสียพลังงานของทั้งสองกรณีศึกษาจึงมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 14 ความหนาของน้ำแข็ง การสูญเสียพลังงาน
ในกรณีศึกษา 2 มิติ

8. สรุป

แบบจำลองโปรแกรม Fluent ถูกตรวจสอบความถูกต้องกับปัญหาใน 1 มิติ และ 2 มิติ ด้วยผลเฉลยแม่นยำ และผลเฉลยโดยประมาณที่ได้จากโปรแกรมเดิม [2] จากนั้นจึงขยายผลใน 3 มิติ ในการจำลอง 3 มิติ ได้ศึกษาหาพารามิเตอร์หลักของเวลาและขนาดกริดที่เหมาะสม โดยพบว่าแบบจำลองมีความผิดพลาด

สูงสุดที่เส้นเปลี่ยนสถานะ แต่ความผิดพลาดจะเฉลี่ยลดลงในเวลาต่อมา กรณีศึกษาที่อุณหภูมิขอบเขตไม่คงที่ [4] ได้ผลมีค่าแม่นยำพอที่จะใช้ศึกษาเพิ่มเติมได้

9. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศึกษาต่อเนื่องปริญญาบัณฑิต-บัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] วุฒินันท์ รูปหอม. (2550). แบบจำลองพลวัตของกระบวนการผลิตน้ำแข็งของ โดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] Prapainop, R. and Maneeratana, K. (2004). Simulation of ice formation by the finite volume method, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 26(1), pp. 55-70.
- [3] ANSYS, Inc. (2009). *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*.
- [4] Sukkuea, A. and Maneeratana, K. (2007). Simulation of block Ice formation with varying brine temperature. paper presented in *the E-NETT 3 Conference*, Bangkok, Thailand.