

การส่งเสริมประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็งช่องโดยการสอดช่องที่กลางของผลิต

An Enhancement of the Ice Block Productivity by Inserting a Channel at the Middle of the Mould

ภูริช ไวยโกชน¹ และ อนุสรณ์ ชินสุวรรณ^{1,*}

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในเมือง เมือง ขอนแก่น 40002

Phurich Vaiyaphoch¹ and Anusorn Chinsuwan^{1,*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Nai Mueang, Mueang, Khon Kaen, 40002, Thailand

*Corresponding Author E-mail: anuchi@kku.ac.th

Received: Feb 03, 2022; Revised: Aug 24, 2022; Accepted: Aug 30, 2022

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาการผลิตน้ำแข็งช่องให้มีค่าไม่เกินช่วงระยะเวลาที่มีราคาค่าไฟฟ้าราคาต่ำของแต่ละวัน ซึ่งเท่ากับ 11 hrs. การวิจัยทำโดยการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของช่องผลิตแบบดั้งเดิม ของผลิตแบบมีช่องกลาง และช่องแบบมีช่องกลางที่มีการฉีดน้ำเกลือภายใน อุณหภูมิบ่อแช่ อุณหภูมิน้ำป้อน ปริมาตรน้ำป้อน และอัตราการไหลน้ำเกลือ กำหนดให้เป็น -10°C , 27°C , 180 liters และ 80 lpm ตามลำดับ พบว่าช่องผลิตแบบดั้งเดิมที่มีระยะเวลารอบผลิตเท่ากับ 44.25 hrs. การติดตั้งช่องกลางสามารถทำให้ระยะเวลารอบผลิตเป็น 33.92 hrs. และการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลางทำให้ระยะเวลารอบผลิตเป็น 9.87 hrs. ทั้งนี้เนื่องจากช่องกลางเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณกลางความหนาของ และน้ำเกลือที่ถูกฉีดเข้าช่องกลางทำให้อุณหภูมิผิวของมันต่ำกว่าจุดเยือกแข็งตลอดเวลา ส่งผลทำให้การก่อตัวของน้ำแข็งแผ่ขยายออกจากทั้งผิวด้านข้างของช่องและผิวของช่องกลาง

คำสำคัญ: การแข็งตัว, การผลิตน้ำแข็งช่อง, ระยะเวลารอบผลิต

Abstract

The purpose of this study is to reduce the batch time the of the block ice production to be not longer than the duration of lower electrical cost in a day, 11 hrs. Computational fluid dynamics (CFD) was used in this study. Three types of mould were considered: conventional mold, conventional mould with a channel in its middle, conventional mould with brine injection in the channel. The pool temperature, initial water temperature, volume of feed water and channel's brine injection flow rate are -10°C , 27°C , 180 liters and 80 lpm, respectively. Comparison with the batch time of the conventional mold, which is 44.25 hrs., the channel can be reduced the batch time to be 33.92 hrs. Moreover, the injection of brine inside the channel can reduce batch time to be 9.87 hrs. This is due to at the middle of the mould, heat transfer surface is increased from the channel walls and the brine injection causing the channel wall temperature is always below the water freezing point. This leads to the ice forms from both the mould and channel walls.

Keywords: Solidification, Ice block production, Batch time reduction

1. บทนำ

น้ำแข็งของถุกนิยมนำไปใช้ในการอุปโภค บริโภค ถนอมอาหาร และรักษาความเย็นในกิจกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะในประเทศไทยที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นและตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ในปัจจุบันอุณหภูมิของโลกในมีแนวโน้มสูงขึ้นจากสภาวะโลกร้อนทำให้ความต้องการใช้น้ำแข็งสูงขึ้นในทุก ๆ ปี

กระบวนการผลิตน้ำแข็งของเริ่มจากการการเติมน้ำป้อนที่อุณหภูมิห้องเข้าไปจนเต็มของผลิต แล้วนำของผลิตไปแช่ในบ่อน้ำเกลือที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จากนั้นรอให้น้ำแข็งขึ้นรูปจากการกระบวนการแข็งตัว (Solidification) โดยน้ำแข็งของขนาดทั่วไปที่สามารถนำไปจำหน่ายได้ จะใช้ระยะเวลาการผลิต (Batch Time) เวลาผลิตต่อเนื่องทั้งสิ้น 24 hrs. อย่างไรก็ตามต้นทุนหลักของการผลิตน้ำแข็งของคือค่าพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีอัตราแปรผันตามช่วงเวลาที่ใช้งาน (Time of Use) โดยช่วงที่มีค่าพลังงานถูกมีระยะเวลาทั้งสิ้น 11 hrs. ในช่วงกลางวัน ดังนั้นผู้ประกอบการจึงต้องดำเนินการผลิตเฉพาะในช่วงเวลาดังกล่าว ส่งผลให้ในเชิงปฏิบัติจริงแต่ละรอบการผลิตจะใช้ระยะเวลารวมทั้งสิ้น 40 hrs. ถึง 70 hrs. เนื่องจากต้องมีการพักกระบวนการผลิตในเวลากลางวัน [1] จากปัญหาดังกล่าวส่งผลให้ทีมงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำแข็ง เช่น การปรับปรุงประสิทธิภาพของสารทำความเย็น การเลือกอุปกรณ์มอเตอร์ (Motor) หรือคอมเพรสเซอร์ (Compressor) ในระบบอัดอัดไอสารทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพสูง

อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปน้ำแข็งของมีกระบวนการหลักคือการเปลี่ยนแปลงสถานะด้วยการแข็งตัว (Solidification) ซึ่งใกล้เคียงกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์เก็บพลังงานในรูปความร้อนแฝง (Latent Heat Thermal Energy Storage, LHTES) โดยปัจจัยหนึ่งที่สามารถลดระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะคือการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) ในสารเก็บพลังงาน เช่น [2] การติดตั้งปั๊มไหลวนน้ำภายในอุปกรณ์เก็บพลังงานแบบท่อและเปลือก (Shell & Tube LHTES) โดยประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออัตราการไหลวนของน้ำมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับอัตราการไหลของสารแลกเปลี่ยนความ

ร้อน โดยระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะลดลง 8.04 hrs. หรือประมาณ 65.34% อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากสามารถทำได้เฉพาะน้ำในสถานะที่เป็นสารละลาย

ปัจจัยต่อมาคือการเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน [3] เปรียบเทียบการแข็งตัวและการละลายของน้ำในอุปกรณ์เก็บพลังงานแบบท่อและเปลือก พบว่าการติดตั้งครีบบตามแนวยาว (Longitudinal fin) ให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าครีบบแบบวงกลม (Annulus fin) โดยสามารถลดระยะเวลาการแข็งตัวลง 50% และ 43% ตามลำดับเมื่อเทียบกับไม่ติดตั้ง [4] การเพิ่มความยาวของครีบบสามารถลดระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะของสารพาราฟิน (Paraffin) ประเภท RT50 (Rubitem GmbH) ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นของการแลกเปลี่ยนความร้อน [5] พบว่า การเพิ่มจำนวนครีบบ, เพิ่มความยาวครีบบและเพิ่มความหนาครีบบ จะส่งผลให้ระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะของสารลดลง 26.1%, 31.5% และ 4% ตามลำดับ โดยสรุปได้ว่าและการเพิ่มจำนวนและความยาวครีบบส่งผลให้ลดเวลาการละลายอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าการเพิ่มความหนาครีบบ [6] การปรับปรุง LHTES ให้มีรูปร่างขดเกลียว (Helical coiled) ส่งผลให้พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น การใส่ครีบบชนิดเกลียว (Spiral fin) และการลดเส้นผ่านศูนย์กลางที่บริเวณท้ายเปลือก (Conical-shell design) สามารถลดระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะของสารเมื่อเทียบกับการไม่ปรับปรุงคือ 26% และ 40% ตามลำดับ

[7] การใส่วงโลหะบาง (Thin layer ring) ในอุปกรณ์เก็บพลังงานแบบกลุ่มท่อ (Ice on Coiled LHTES) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่มากมีผลต่อการลดเวลาการแข็งตัวของน้ำ และการจัดวางวงโลหะบางแบบไขว้ท่อสลับบนล่าง (Staggered Arrangement) ส่งผลดีกว่าการติดตั้งแบบขนาน (Parallel Arrangement) เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านช่องว่างของเหลวภายในน้ำแข็ง (Cavity) ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการแข็งตัวได้ยากที่สุด ต่อมา [8] พบว่าการติดตั้งวงโลหะแบบไขว้ท่อสลับบนล่างมีประสิทธิภาพดีที่สุดและมีน้ำหนักของวัสดุที่น้อยกว่าการติดตั้งครีบบแบบวงกลม โดยที่ระยะเวลาเท่ากันการใส่วงโลหะ

บางจะเกิดมวลของน้ำแข็งเพิ่มขึ้น 34% ส่วนแบบการใส่ครีบบางแบบวงกลมมีการเกิดมวลน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น 21% เมื่อเทียบกับอุปกรณ์แบบดั้งเดิม

อีกปัจจัยที่สำคัญคือผลต่างของอุณหภูมิการถ่ายเทความร้อน [9] ศึกษาผลต่างอุณหภูมิเข้าของสารทำความเย็นต่ออัตราการเกิดน้ำแข็งพบว่าทุก ๆ อุณหภูมิสารทำความเย็นที่ลดลง 1 K จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงาน (Coefficient of performance, COP) เพิ่มขึ้น 1.5%

[10] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำแข็งของขนาด $0.27\text{ m} \times 0.56\text{ m} \times 1.484\text{ m}$ ที่แช่ในบ่อน้ำเกลือ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะเวลารอบผลิตมากที่สุดคือการลดค่าอุณหภูมิบ่อแช่ (Pool temperature), การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของบ่อแช่ (Pool side heat transfer coefficient) และ การปรับลดอุณหภูมิของน้ำป้อน โดยลดระยะเวลารอบผลิตได้ ประมาณ 68 hrs., 2.5 hrs. และ 1.16 hrs. ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิบ่อแช่ที่เหมาะสมที่สุดคือ -10°C

การปรับปรุงประสิทธิภาพทุกแบบที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนสถานะของสาร โดยส่วนใหญ่จะศึกษาการปรับปรุง

ประสิทธิภาพการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้โดยทั่วไปสรุปได้ดังตารางที่ 1

อย่างไรก็ตามไม่มีงานวิจัยใดที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการปรับปรุงรูปร่างของช่องผลิต ซึ่งผลจากการศึกษาดังกล่าวสามารถนำปัจจัยต่าง ๆ เข้ามาเป็นตัวแปรในการศึกษาทดลองของงานวิจัยนี้ได้

2. เครื่องมือการทดลอง และเงื่อนไขการทดลอง

ทำการศึกษาทั้งหมด 2 ส่วน ได้แก่การจำลองทางพลศาสตร์ของไหลมีสัดส่วนเท่ากับขนาดจริงด้วย โปรแกรม Ansys Fluent 2019 R3 และเปรียบเทียบความถูกต้องของการจำลองกับทดลองจริง ณ สถานที่ปฏิบัติการ ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงงานน้ำแข็งมิตรภาพขอนแก่น 2002

2.1. แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล

การจำลองทางพลศาสตร์ของไหลในรูปแบบ 3 มิติ ภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลา การแข็งตัว (Solidification) การไหลแบบปั่นป่วน (k-epsilon) และ อยู่ภายใต้เงื่อนไขของวิธีการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy-porosity technique) ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม Fluent โดยให้คุณสมบัติเริ่มต้นของน้ำตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

ผู้แต่ง	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อระยะเวลาการแข็งตัวที่ศึกษา	วิธีการศึกษา	ผลที่ได้
[2]	อัตราการไหลของสารให้ความเย็น	การทดลอง	ระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะลดลง 8.04 hrs. หรือประมาณ 65.34%
[3]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล/ การสอบทานกับงานวิจัยอื่นๆ	ลดระยะเวลาการแข็งตัวลง 50% และ 43% ตามลำดับเมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิม
[4]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล/ การสอบทานด้วยการทดลองจริง	การเพิ่มความยาวของครีบบางสามารถลดระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะของสารได้อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มจำนวนและความยาวครีบบางส่งผลให้ลดเวลาการละลายของสารอย่างมีนัยสำคัญ
[5]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล/ การสอบทานด้วยการทดลองจริง	มากกว่าการเพิ่มความหนาครีบบาง สามารถลดระยะเวลาการเปลี่ยนสถานะของสาร
[6]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล	เมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิมคือ 26% และ 40% ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สรุปการทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)

ผู้แต่ง	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อระยะเวลาการแข็งตัวของตัวที่ศึกษา	วิธีการศึกษา	ผลที่ได้
[7]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล	การจัดวางวงโลหะบางแบบไขว้เพื่อสลับบนล่างส่งผลดีต่อการติดตั้งแบบขนาน การใส่วงโลหะบางจะเกิดมวลของน้ำแข็ง
[8]	การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล/ การสอบทานด้วยการทดลองจริง	เพิ่มขึ้น 34% ส่วนการใส่ครีบบางวงกลมมีการเกิดมวลน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น 21% เมื่อเทียบกับอุปกรณ์แบบดั้งเดิม
[9]	ความต่างของอุณหภูมิของของเหลวให้ความเย็น กับ สารแช่แข็ง	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล	อุณหภูมิสารทำความเย็นที่ลดลง 1 K จะทำให้ COP เพิ่มขึ้น 1.5% ปัจจัยที่มีผลต่อการลดระยะเวลาการอบผลิดมาก
[10]	ความต่างของอุณหภูมิของของเหลวให้ความเย็น กับ สารแช่แข็ง	การจำลองทางพลศาสตร์ของไหล/ การสอบทานด้วยการทดลองจริง	ที่สุดคือการลดค่าอุณหภูมิบ่อแช่ โดยลดระยะเวลาได้ประมาณ 68 hrs. ซึ่งอุณหภูมิบ่อแช่ที่เหมาะสมที่สุดคือ -10°C

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติเริ่มต้นของน้ำในการจำลองทางพลศาสตร์ของไหล

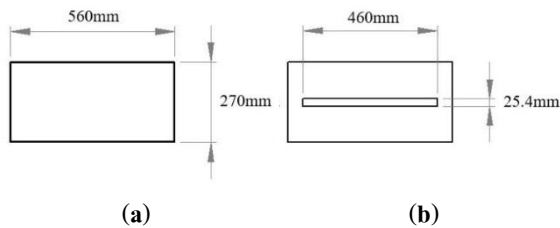
ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ความหนาแน่น	999.8	kg/m^3
ความหนืดพลวัต	0.001003	kg/ms
ความหนืดจลนศาสตร์	1.0032×10^{-6}	m^2/s
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	0.6	W/mK
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ	4182	J/kgK
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	9.81	m^2/s
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	6.734×10^{-5}	$1/\text{K}$
อุณหภูมิจุดหลอมเหลว	273	K
อุณหภูมิจุดแข็งตัว	273	K
ความร้อนแฝง	335,000	J/kg

แบบจำลองมีทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ ของผลิตภัณฑ์ดั้งเดิม ของผลิตภัณฑ์แบบมีช่องกลาง และของผลิตภัณฑ์ที่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่อง โดยพิกัดความกว้าง ยาว สูงของช่องได้เป็น $270 \text{ mm} \times 560 \text{ mm} \times 1,500 \text{ mm}$ ช่องกลางจะมีขนาดความกว้าง และ ยาว เป็น $460 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$

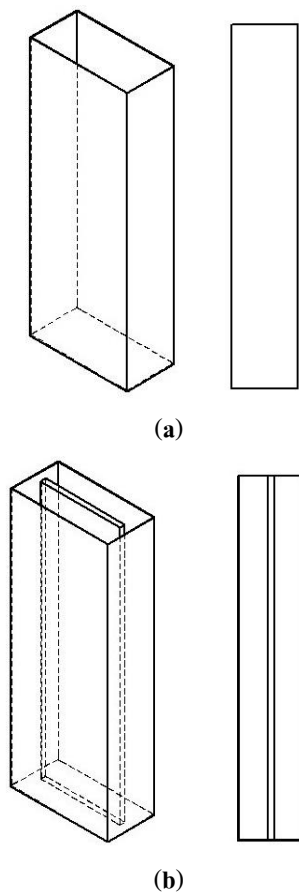
และมีความสูงเท่ากับของผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 1 และ รูปที่ 2 กำหนดปริมาตรและอุณหภูมิ

เริ่มต้นของน้ำบ่อนคงที่อยู่ ที่ 180 liters และ 27°C ตามลำดับ งานวิจัยที่ผ่านมา [10] พบว่า ขนาดกริด (grid) ที่เหมาะสมของโดเมน (domain) น้ำและน้ำเกลือเป็น $6.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ และ $3.0 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ ตามลำดับ พื้นผิวด้าน

นอกของโดเมนของน้ำกำหนดให้มีอุณหภูมิคงที่ (Constant wall temperature) ยกเว้นส่วนบนที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน (Adiabatic wall) โดเมนของน้ำเกลือกกำหนดให้มีการไหลแบบปั่นป่วน โดยอุณหภูมิขาเข้า (Inlet temperature) กำหนดให้เท่ากับอุณหภูมิบ่อแช่ โดเมนของน้ำและน้ำเกลือกถูกกันด้วยเหล็กกล้า (Steel) ที่มีความหนา 2 mm



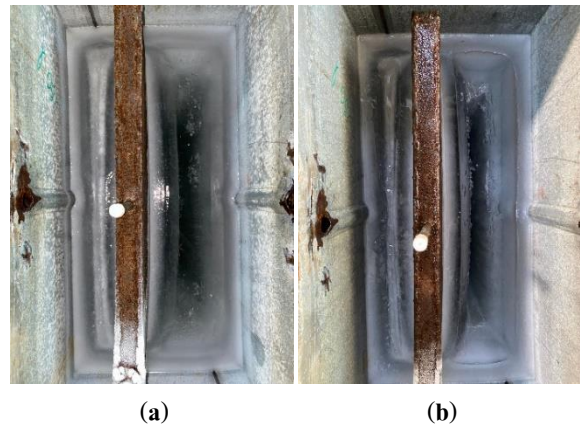
รูปที่ 1 พื้นที่หน้าตัดแสดงขนาดของ (a) ช่องน้ำแข็ง (b) ช่องกลาง



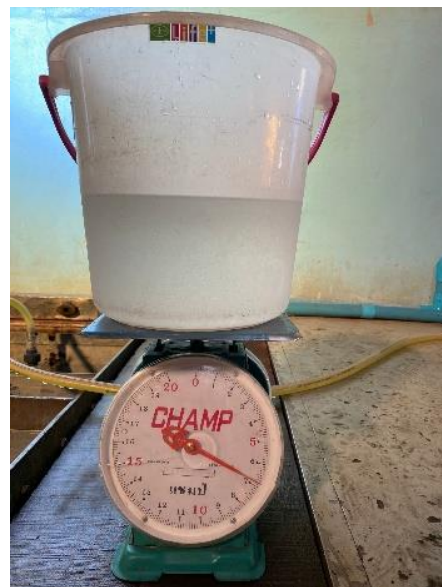
รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองของผลิตน้ำแข็งชนิด (a) ดั้งเดิม (b) ติดตั้งช่องกลาง

2.2. การทดลองในสภาวะจริง

ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขของสถานประกอบการที่อุณหภูมิของบ่อแช่มีค่าระหว่าง -7°C ถึง -12°C โดยใช้เวลาดทดลอง 10 hrs. ดังรูปที่ 3 ปริมาตรและอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำบ่อนมีค่าเท่ากับเงื่อนไขเริ่มต้นการจำลอง อัตราการฉีดของน้ำเกลือกในช่องกลางเท่ากับ 80 lpm และทำการวัดค่าสัดส่วนของเหลวโดยวิธีการชั่งน้ำหนักน้ำที่เหลืออยู่เทียบน้ำหนักเริ่มต้น ที่ระยะเวลาหลังจากเริ่มแช่ 10 hrs. ดังรูปที่ 4 เพื่อนำค่าสัดส่วนของเหลวดังกล่าวไปเทียบกับการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



รูปที่ 3 แสดงการแข็งตัวของน้ำจากด้านบนที่ระยะเวลา 10 hrs. หลังการแช่ในบ่อ (a) มีของเหลวหลงเหลืออยู่ (b) ของเหลวถูกนำออกไป



รูปที่ 4 การชั่งน้ำหนักของเหลวที่เหลืออยู่

3. ทฤษฎี

ในการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลทั้งหมด 3 โดเมน ได้แก่ โดเมนของน้ำ น้ำเกลือ และช่องผลิต โดยทำการพิจารณาการไหลในสภาวะไม่คงตัว (Unsteady) และไม่อัดตัว (Incompressible) กำหนดให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ปริมาตร (Density) และ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) คงที่ และไม่คิดผลกระทบของการกระจายตัวจากความหนืด (Viscous dissipation) และ การแผ่รังสี (Radiation) โดย โดเมนของน้ำมีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) และ โดเมนของน้ำเกลือมีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent)

3.1. สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

หาได้จากสมการที่ (1)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

3.2. สมการการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม (Momentum Equation)

3.2.1. การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของน้ำ

หาได้จากสมการที่ (2)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \rho g + S_M \quad (2)$$

S_M คือ ฟังก์ชันของความพรุน (Porosity function) หาได้จากสมการที่ (3)

$$S_M = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \vec{v} \quad (3)$$

กำหนดให้ $A_{mush} = 10^5$, $\varepsilon = 0.001$, β คือ สัดส่วนของเหลว สามารถอธิบายสถานะของน้ำหาได้จากสมการที่ (4)

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 0; T < T_{solidus} \\ \beta &= 1; T > T_{solidus} \\ \beta &= \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}}; T_{solidus} < T < T_{liquidus} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3.2.2. การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของน้ำเกลือ

หาได้จากสมการที่ (5) โดยพิจารณาการไหลของน้ำเกลือเป็นแบบปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (5)$$

$-\rho \overline{u'_i u'_j}$ คือ ความเค้นเรโนลด์ (Reynolds Stress) หาได้จากสมการ Boussinesq's hypothesis หรือสมการที่ (6)

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_1 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (6)$$

δ_{ij} คือ โครเนคเกอร์เดลต้า (Kronecker delta) สามารถอธิบายได้โดยสมการที่ (7)

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1; i = j \\ 0; i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

μ_t และ k คือความหนืด พลังงานจลน์ ของการไหลแบบปั่นป่วน สามารถอธิบายได้โดยสมการ Standard $k - \varepsilon$ หรือสมการที่ (8) และ (9)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

ε , μ_t และ G_k คือ อัตราการกระจายตัว ความหนืดผลผลิตของพลังงานจลน์ ของการไหลแบบปั่นป่วน สามารถอธิบายได้โดยสมการที่ (10) และ (11)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (11)$$

ค่าคงที่ $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$

3.3. สมการการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

3.3.1. การเปลี่ยนแปลงพลังงานของน้ำ

หาได้จากสมการที่ (12)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

h, H คือ เอนทาลปีสัมผัส และ ผลรวมของเอนทาลปี
หาได้จากสมการที่ (13) และ (14) ตามลำดับ

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (13)$$

$$H = h + \Delta H \quad (14)$$

3.3.2. การเปลี่ยนแปลงพลังงานของน้ำเกลือ

หาได้จากสมการที่ (15)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$(\tau_{ij})_{eff}$ คือ เทนเซอร์ของความเค้นเบี่ยงเบน
(Deviatoric stress tensor) หาได้จากสมการที่ (16)

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (16)$$

μ_{eff} และ λ_{eff} คือ ความหนืด สัมประสิทธิ์การนำ
ความร้อนเชิงประสิทธิภาพ ของการไหลแบบปั่นป่วน หา
ได้จากสมการที่ (17) และ (18) ตามลำดับ

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (17)$$

$$\lambda_{eff} = \lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (18)$$

โดย $Pr_t = 0.85$

3.4. การนำความร้อนภายในของผลิต

กำหนดวัสดุหลักหุบสังกะสี ค่าสัมประสิทธิ์การนำ
ความร้อน (λ) ความหนาแน่น (ρ) และค่าความจุความร้อน

จำเพาะ (c_p) มีค่าคงที่ การนำความร้อนภายในของผลิต
สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (19)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (19)$$

4. การสอบทวนผลที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ ของไหลเชิงคำนวณ

ทำการวัดค่าสัดส่วนของแข็งของน้ำ โดยการชั่งน้ำหนัก
ของน้ำที่เหลือในช่อง เทียบกับน้ำหนักตอนเริ่มต้น ที่
ช่วงเวลา 10 hrs. หลังเริ่มปฏิบัติการทดลอง เพื่อยืนยันผล
กับการจำลองทางพลศาสตร์ของไหล โดยจะเทียบจำลองที่
มีลักษณะใกล้เคียงกับของน้ำแข็งขนาดจริง การ
เปรียบเทียบน้ำหนักของน้ำส่วนที่เหลือ ระหว่างการจำลอง
ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ต่อการทดลองจริงจะมี
ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ -6.23% ถึง 8.14% โดยช่วงความ
คลาดเคลื่อนในลักษณะดังกล่าวจะเป็นแนวโน้มในการ
ทำนายผลที่จะให้ความถูกต้องของการจำลอง ซึ่งมีผลมา
จากจากความผันผวนของอุณหภูมิบ่อแช่ ที่เกิดจากความไม่
แน่นอนของภาระการทำงานของระบบทำความเย็นใน
กระบวนการผลิตที่มีการสลับการแช่ของผลิตใหม่อยู่
สม่ำเสมอ ดังตารางที่ 3 ดังนั้นแล้วผู้นำไปประยุกต์ใช้ควร
คำนึงค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงค่าความคลาดเคลื่อนนี้ด้วย

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบเพื่อแสดงความคลาดเคลื่อน
ของการทดลองต่อการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิง
คำนวณ ที่ระยะเวลา 10 hrs.

	ครั้งที่ 1 น้ำหนักของเหลว		สัดส่วนของเหลว		ความคลาด เคลื่อน (%)
	[kg.]		[-]		
	ทดลอง	จำลอง	ทดลอง	จำลอง	
1	13.18	14.06	0.073	0.078	-6.23
2	14.66	14.06	0.081	0.078	4.25
3	13.34	14.06	0.074	0.078	-5.15
4	15.20	14.06	0.084	0.078	8.14

5. อภิปรายผล

5.1. อิทธิพลของการติดตั้งช่องกลางในของผลิต

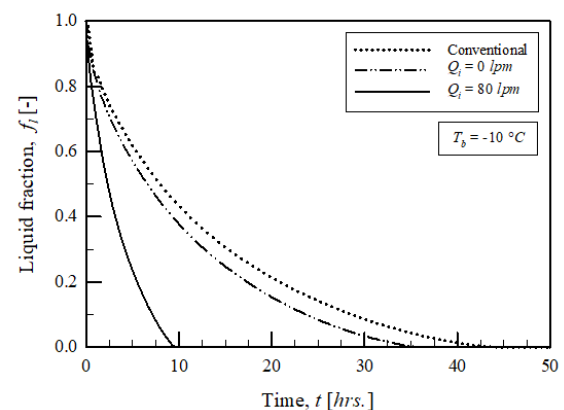
พิจารณาที่อุณหภูมิบ่อแช่น้ำเกลือ (T_b) เท่ากับ -10°C พบว่าของผลิตแบบดั้งเดิมมีระยะเวลารอบผลิตเท่ากับ 44.25 hrs. ของผลิตแบบมีช่องกลางมีระยะเวลารอบผลิตเป็น 33.92 hrs. และของผลิตแบบมีช่องกลางที่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่องมีระยะเวลารอบผลิตเป็น 9.87 hrs. โดยอิทธิพลจากการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลางส่งผลให้ระยะเวลารอบผลิตของของผลิตแบบมีช่องกลางที่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่องสามารถลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญที่ 77.69% และเพิ่มอัตราการผลิตน้ำแข็งของได้มากขึ้นถึง 448.23% เมื่อเปรียบเทียบกับของผลิตแบบดั้งเดิม ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลารอบผลิต ระยะเวลารอบผลิตที่ลดลงได้ และการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ของของผลิตรูปแบบต่าง ๆ

ชนิดของ ของผลิต	ระยะเวลา รอบผลิต [hrs.]	ระยะเวลารอบ ผลิตที่ลดลงได้ จากแบบดั้งเดิม [%]	การเพิ่ม ประสิทธิภาพ การผลิตจาก แบบดั้งเดิม [%]
ของผลิตแบบ ดั้งเดิม (Conventional)	44.25	-	-
ของผลิตแบบมี ช่องกลาง ($Q_i = 0$ lpm)	33.92	23.34	130.45
ของผลิตแบบมี ช่องกลางที่มี การฉีดน้ำเกลือ ภายในช่อง ($Q_i = 80$ lpm)	9.87	77.69	448.23

5.2. อิทธิพลของการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลาง

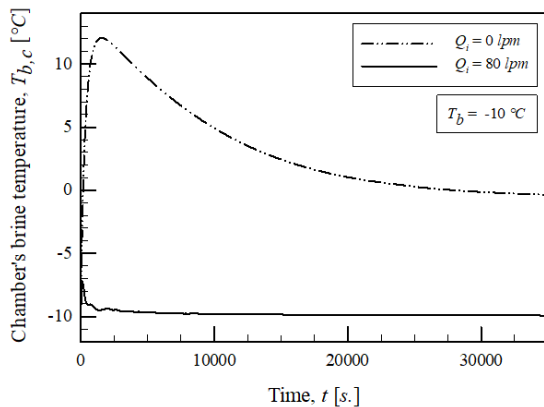
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิบ่อแช่น้ำเกลือ (T_b) ที่ -10°C ที่อัตราการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลางเท่ากับ 80 lpm ($Q_i = 80$ lpm) มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการลดลงของสัดส่วนของเหลวในของผลิตแบบดั้งเดิม (Conventional) และของผลิตแบบมีช่องกลางแต่ไม่มีการฉีดน้ำเกลือภายใน ($Q_i = 0$ lpm) ดังรูปที่ 5 เนื่องจากการการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) จากการฉีดน้ำเกลือ ส่งผลให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Transfer rate) ภายในช่องกลางมีค่าสูงกว่าแบบที่ไม่มีการฉีดน้ำเกลือ



รูปที่ 5 สัดส่วนของเหลวในช่องต่อเวลา ที่อุณหภูมิบ่อแช่เท่ากับ -10°C ของของผลิตรูปแบบต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในช่องกลาง ($T_{b,c}$) ต่อเวลา ที่อุณหภูมิบ่อแช่เท่ากับ -10°C พบว่าในช่วงเริ่มต้นแช่ของผลิตเป็นช่วงอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวของช่องกลางสู่น้ำเกลือสูงที่สุด เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำและน้ำเกลือมีมาก ส่งผลให้อุณหภูมิน้ำเกลือในของผลิตที่ไม่มีการไหลวนจะสูงขึ้นจาก -10°C เป็น 12°C จากนั้นอุณหภูมิของน้ำและผิวช่องกลางจะลดลงอย่างต่อเนื่องจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) จนถึงอุณหภูมิคงที่ประมาณ 0°C ที่ระยะเวลาประมาณ 20,000 s. อย่างไรก็ตาม ผลของการฉีดน้ำเกลือส่งผลให้มีการไหลวนของน้ำเกลือในบ่อแช่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่ามาแลกเปลี่ยนความร้อนอย่าง

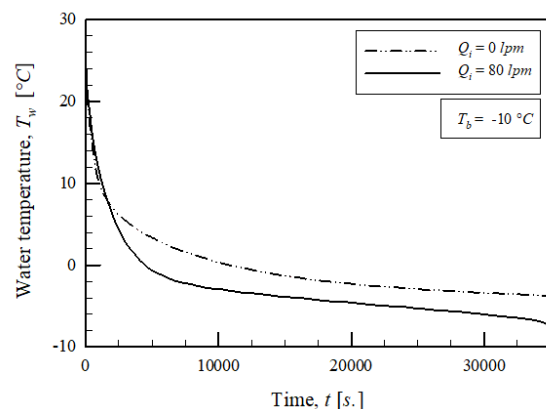
สม่ำเสมอ อุณหภูมิของน้ำเกลือในช่องกลางจะสูงขึ้นไปถึงเพียงแค่ว่า -7.2°C แล้วจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิของบ่อแช่ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 อุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในช่องกลางต่อเวลา ของของผลิตรูปแบบต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของน้ำเกลือในช่องกลางและอุณหภูมิในในช่วงเวลาเดียวกันมีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนที่พื้นผิวช่องกลาง หากพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิของน้ำเกลือ (T_w) ต่อเวลา (t) ของของผลิตที่ไม่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลาง ($Q_i = 0$ lpm) จะพบว่าแนวโน้มของอุณหภูมิของน้ำเกลือภายในช่องกลางที่ช่วงเวลาเดียวกันเนื่องจากอิทธิพลของการพาความร้อนแบบธรรมชาติภายในช่องกลางมีค่าน้อยมาก อีกทั้งอุณหภูมิของน้ำและน้ำเกลือภายในช่องกลางมีค่าใกล้เคียงกันจึงสามารถอธิบายได้ว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนได้น้อย อย่างไรก็ตามการติดตั้งช่องกลางสามารถลดระยะเวลารอบผลิต (t_b) ได้เนื่องจากการลดขนาดของช่องว่าง (Cavity) ที่อยู่บริเวณแกนกลางของน้ำแข็ง ซึ่งบริเวณนี้ จะเกิดการแข็งตัวได้ช้าที่สุดเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ของชั้นน้ำแข็ง (Thickness of ice) ที่ก่อตัวขึ้นก่อนหน้าบริเวณผิวแต่ละด้านของของผลิตมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำ ยิ่งน้ำแข็งมีความหนาแน่นก็ส่งผลให้ขัดขวางการถ่ายเทความร้อนของน้ำสู่พื้นผิวของผลิตในช่วงระยะเวลาหลังจากนั้น

เมื่อเปรียบเทียบกับของผลิตที่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลาง ($Q_i = 80$ lpm) พบว่า แนวโน้มอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำเกลือ เนื่องจากการฉีดน้ำเกลือทำให้ค่าการพาความร้อนของพื้นผิวภายในช่องกลางสูงกว่า รวมถึงการไหลวน (Circulate) เข้ามาแทนที่ของน้ำเกลือภายในบ่อแช่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่งผลให้เกิดการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนได้อย่างดี และมีการเกิดน้ำแข็งได้รวดเร็วกว่า รวมถึงลดระยะเวลารอบผลิตลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยภายในช่องผลิตต่อเวลา ของของผลิตรูปแบบต่าง ๆ

6. สรุปผล

การปรับปรุงประสิทธิภาพของผลิต โดยการติดตั้งช่องกลางส่งผลให้ลดระยะเวลารอบผลิตลงได้เนื่องจากการลดขนาดของช่องว่างที่อยู่บริเวณแกนกลางของน้ำแข็ง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเกิดน้ำแข็งได้ช้าที่สุดเนื่องจากอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนจากผนังของผลิตถูกขัดขวางจากการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชั้นน้ำแข็งที่ก่อตัวขึ้นก่อนหน้า อย่างไรก็ตามของผลิตที่ไม่มีการฉีดน้ำเกลือภายในช่องกลางจะไม่ส่งเสริมการแลกเปลี่ยนความร้อนในพื้นผิวช่องกลางอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำเกลือภายในช่องกลางและอุณหภูมิภายในของผลิตมีค่าน้อย อย่างไรก็ตามอิทธิพลของการฉีดน้ำเกลือไหลวนภายในช่องกลางนั้นส่งผลต่อการลดระยะเวลารอบผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญถึง 77.69% เนื่องจากเกิดการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับ

ระหว่างพื้นผิวช่องกลางกับน้ำเกลือภายใน อีกทั้งยังทำให้น้ำเกลือที่มีอุณหภูมิต่ำภายในบ่อแช่ไหลเข้ามาแทนที่น้ำเกลือในช่องกลางที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นมาแลกเปลี่ยนความร้อนที่พื้นผิวกับน้ำอย่างสม่ำเสมอทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้ 448.23%

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ หรือการศึกษาอิสระ สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คำสัญลักษณ์

A_{mush}	ค่าคงที่ในสถานะสารละลาย [—]
c_p	ความจุความร้อนจำเพาะ [$Jkg^{-1}K^{-1}$]
E	ผลรวมของพลังงาน [J]
f_l	สัดส่วนของเหลว [—]
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก [ms^{-2}]
G_k	ผลผลิตของพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน [$kg s^{-3} m^{-1}$]
h	เอนทาลปีสัมผัส [Jkg^{-1}]
h_{ref}	เอนทาลปีสัมผัสอ้างอิง [Jkg^{-1}]
H	ผลรวมของเอนทาลปี [Jkg^{-1}]
k	พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน [Jkg^{-1}]
p	ความดัน [Pa]
Pr_t	ตัวเลขพรีนซ์เทิลของการไหลแบบปั่นป่วน [—]
Q_i	อัตราการฉีดน้ำเกลือในช่องกลาง [lpm]
S_M	ฟังก์ชันของความพรุน สมการที่ (3)
t	ระยะเวลา [$hrs.$], [$s.$]
t_b	ระยะเวลารอบผลิต [$hrs.$]
T	อุณหภูมิ [$^{\circ}C$]
T_b	อุณหภูมิบ่อแช่ [$^{\circ}C$]
$T_{b,c}$	อุณหภูมิน้ำเกลือเฉลี่ยภายในช่องกลาง [$^{\circ}C$]
$T_{liquidus}$	อุณหภูมิจุดหลอมเหลว [$^{\circ}C$]
$T_{solidus}$	อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง [$^{\circ}C$]
T_{ref}	อุณหภูมิอ้างอิง [$^{\circ}C$]

T_w	อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย [$^{\circ}C$]
u	ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาค ในทิศทางแกน x [ms^{-1}]
u'	ความเร็วผันผวนของอนุภาค ในทิศทางแกน x [ms^{-1}]
$\vec{v}$	เวกเตอร์ของความเร็ว [ms^{-1}]

ตัวอักษรกรีก

β	สัดส่วนของเหลว [—]
δ_{ij}	โครเนกเคอร์เดลต้า [—]
ΔH	เอนทาลปีแฝง [J], [kgm^2s^{-2}]
ε	อัตราการกระจายตัว ของการไหลแบบปั่นป่วน [m^2s^{-3}]
λ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน [$Wm^{-1}K^{-1}$]
λ_{eff}	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนเชิงประสิทธิภาพของการไหลแบบปั่นป่วน [$Wm^{-1}K^{-1}$]
μ	ความหนืดพลวัต [Pas]
μ_{eff}	ความหนืดเชิงประสิทธิภาพ ของการไหลแบบปั่นป่วน [Pas]
μ_t	ความหนืด ของการไหลแบบปั่นป่วน [Pas]
ρ	ความหนาแน่น [kgm^{-3}]
$(\tau_{ij})_{eff}$	เทนเซอร์ของความเค้นเฉือน [Nm^{-2}]

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Lertpiya, "Energy management system for block-ice factory using TOD and TOU tariff," M.S. thesis, Dept. Electrical. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2005.
- [2] J. Gasia, N. H. Steven Tay, M. Belusko, L. F. Cabeza and F. Bruno, "Experimental investigation of the effect of dynamic melting in a cylindrical shell-and-tube heat exchanger using water as PCM," *Applied Energy*, vol. 185, no. 1, pp. 136–145, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.042
- [3] M. A. Dekhil, J. V. S. Tala, O. Bulliard-Sauret and D. Bougearda, "Numerical analysis of the performance enhancement of a latent heat storage shell and tube unit

- using finned tubes during melting and solidification,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 192, 2021, Art. no. 116866, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116866.
- [4] M. J. Hosseini, A. A. Ranjbar, M. Rahimia and R. Bahrampoury, “Experimental and numerical evaluation of longitudinally finned latent heat thermal storage systems,” *Energy and Buildings*, vol. 99, pp. 263–272, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.04.045.
- [5] A. A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman and A. Th. Mohammada, “Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 53, no. 1, pp. 147–156, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.01.011.
- [6] J. Wołoszyn, K. Szopa and G. Czerwiński, “Enhanced heat transfer in a PCM shell-and-tube thermal energy storage system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 196, 2021, Art. no. 117332, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117332.
- [7] J. Xie and C. Yuan, “Numerical study of thin layer ring on improving the ice formation of building thermal storage system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 69, no. 1–2, pp.46–54, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.053.
- [8] H. Jannesari and N. Abdollahi, “Experimental and numerical study of thin ring and annular fin effects on improving the ice formation in ice-on-coil thermal storage systems,” *Applied Energy*, vol. 189, pp. 369–384, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.064.
- [9] T. Yang, Q. Sun and R. Wnnersten, “The impact of refrigerant inlet temperature on the ice storage process in an ice-on-coil storage plate,” *Energy Procedia*, vol. 145, pp. 82–87, 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.04.014.
- [10] P. Sukborom and A. Chinsuwan, “Effects of feed water temperature, pool temperature, and pool side heat transfer coefficient on freezing time of the conventional block ice production,” *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 63–68, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.052.