

## การวิเคราะห์การแข็งตัวของน้ำเพื่อปรับปรุงรูปทรงของน้ำแข็งซอง เพื่อลดการใช้พลังงานในการผลิต

### Ice Forming Analysis to Improve Ice Molds for Process Energy Reduction

ภาณุวัฒน์ เนือยทอง<sup>1</sup> และ เกียรติกร อัครมาศบันลือ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพฯ 10900

\* ผู้ติดต่อ: E-mail: [fengkka@ku.ac.th](mailto:fengkka@ku.ac.th), โทรศัพท์: (662) 942-8555, โทรสาร: (662) 579-4576

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของรูปทรงและปริมาตรของน้ำแข็งซองที่มีผลต่อระยะเวลาในการแข็งตัวของน้ำ น้ำแข็งซองจะถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรมวาดรูปและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข โดยแบ่งออกเป็น น้ำแข็งซอง ที่มีปริมาตร เท่าเดิมและปริมาตรลดลงครึ่งหนึ่งในรูปทรงต่างๆกัน จากการวิเคราะห์พบว่า รูปทรงที่ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ รูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าและรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยม การลดปริมาตรของน้ำลงครึ่งหนึ่งจะสามารถลดระยะเวลาในการผลิตได้มากกว่าครึ่งหนึ่ง ซึ่งอาจจะนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตได้ นอกจากนี้ยังพบว่า ระยะเวลาในการแข็งตัวของน้ำแข็งซองจะแปรผกผันกับ “ค่าความยาวในการแข็งตัว (Freezing Length)” เมื่อความยาวในการแข็งตัวมีค่ามากขึ้น ระยะเวลาในการแข็งตัวจะน้อยลง

**คำหลัก:** ความยาวในการแข็งตัว การแข็งตัวของน้ำแข็ง พลังงาน ปริมาตรของน้ำแข็ง รูปทรงของน้ำแข็ง

#### Abstract

This research is to study effects of geometry and size of ice block on freezing duration of water in an ice mold. The study focuses on characteristics of ice forming with various geometries and sizes. Ice blocks are modeled and analyzed with computational fluid dynamics techniques. The results show that water in triangular-based mold and rectangular-based mold consume the least time to become ice. If the ice volume is reduced by half, the freezing time is reduced more than half of the regular one which can be implemented to improve the ice manufacturing process. In addition, the freezing time is inversely proportional to “freezing length”. The greater the freezing length is, the less the freezing time does.

**Keywords:** Freezing Length, Ice Forming, Energy, Ice Volume, Ice Geometry

#### 1. บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตน้ำแข็งซองเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้พลังงานจำนวนมาก 80-90%ของพลังงานถูกใช้ในระบบทำความเย็นซึ่งทำหน้าที่ลด

อุณหภูมิของน้ำเกลือที่ถูกนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำทำน้ำแข็งซองอีกทีหนึ่ง ในการผลิตน้ำแข็งซองแต่ละครั้งจะใช้เวลาจนถึง 48 ชั่วโมง ซึ่งจะหมายถึงปริมาณการใช้พลังงานที่สูงตามไปด้วย ดังนั้นการลด

เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งของจะทำให้ปริมาณการใช้พลังงานลดลงได้

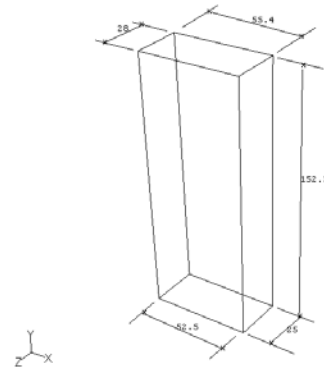
งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยเดิมใน ความพยายามที่จะพัฒนาและปรับปรุงรูปทรง และ ขนาดของน้ำแข็งของให้มีความเหมาะสมทั้งทางด้าน พหุณศาสตร์และลดการใช้พลังงาน จากงานวิจัยเดิม การ ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ร่วมกับสภาวะขอบและค่า แก๊ซที่เหมาะสมสามารถจำลองการแข็งตัวของน้ำแข็ง ของแบบ 3 มิติได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง [1] และ พบว่าปริมาตรและรูปทรงของน้ำแข็งของ เป็นปัจจัย หนึ่งที่ส่งผลต่อเวลา และพลังงาน ที่ใช้ในการขึ้นรูป น้ำแข็ง ผลดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อ วิเคราะห์รูปแบบ และผลกระทบ ในการแข็งตัวของ น้ำแข็งของเมื่อมี ปริมาตรและรูปทรงที่ แตกต่างกัน ออกไป โดยใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวเป็นตัวแปร หลักในการวิเคราะห์เนื่องจากแปรผันโดยตรงกับ ปริมาณพลังงานที่ใช้

น้ำแข็งของในรูปทรงและปริมาตรต่างๆจะถูกสร้าง ขึ้นและวิเคราะห์ ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข โดยมี ข้อกำหนดว่าน้ำแข็งของในแต่ละรูปทรงจะต้องมี ปริมาตรเท่ากับ หรือครึ่งหนึ่งของ ปริมาตรน้ำแข็งของ เดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (0.183m<sup>3</sup>)

## 2. การตรวจเอกสาร

### 2.1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำแข็งของ

ในการผลิตน้ำแข็งของ ที่มีอยู่ทั่วไปในท้องตลาด น้ำซึ่งเป็นวัตถุดิบ จะถูกเทลงแบบสี่เหลี่ยม (ของ น้ำแข็ง) ที่ มีรูปทรงปริซึมฐาน สี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 25x52x130 ซม. น้ำที่ใส่ลงไปจะมี น้ำหนัก ประมาณ 150 กิโลกรัมต่อของ ดังแสดงในรูปที่ 1 ของน้ำแข็ง จะถูกยกลงไปแช่ไว้ในบ่อน้ำเกลือ ซึ่งมีอุณหภูมิ -5 ถึง -12°C [1] โดยปากด้านบนของของจะสูงกว่าระดับ น้ำเกลือเล็กน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเกลือไหลเข้ามา ผสมกับน้ำที่ใช้ทำน้ำแข็ง ดังนั้น ผิวด้านบนจะสัมผัส กับอากาศ ในขณะที่ด้านที่เหลือสัมผัสกับน้ำเกลือ ของน้ำแข็งจะถูกแช่ไว้ประมาณ 40–48 ชั่วโมง ก็ที่จะ ถูกยกขึ้นมาเพื่อเอาน้ำที่แข็งตัวแล้วออกจากของใน ขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 1 รูปทรงของน้ำแข็งที่ใช้ในการผลิต

### 2.2 สมการการถ่ายเทความร้อน

การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาจาก สมการครอบคลุมและสมการเฉพาะเจาะจง ซึ่งจะได้ สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์การขึ้นรูปของ น้ำแข็งของในรูปอัตราการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี สมการการถ่ายเทความร้อนสำหรับการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ แสดงดังสมการที่ 1

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน  $k$  จะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ โดยการแก้ปัญหาการเปลี่ยนสถานะของน้ำ เอนทัลปี (H) จะถูกกำหนดโดยผลรวมของ Sensible Enthalpy (h) กับ ค่าความร้อนแฝง  $\Delta H$  ซึ่งจะได้ สมการดังนี้

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

โดยที่  $h_{ref}$  = เอนทัลปีอ้างอิง  $T_{ref}$  = อุณหภูมิอ้างอิง และ  $c_p$  = ความจุความร้อนที่ความดันคงที่ ค่าความ ร้อนแฝงสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta H = \beta L \quad (3)$$

โดยอัตราส่วนของเหลว (Liquid fraction),  $\beta$  คือ

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquid} - T_{solidus}} \quad (4)$$

โดย ถ้า  $\beta = 0$ ;  $T < T_{solidus}$  และถ้า  $\beta = 1$ ;  $T > T_{solidus}$

### 2.3 การจำลองการแข็งตัวของน้ำ

จากงานวิจัยเดิม [1] การแข็งตัวของน้ำสามารถ จำลองได้ด้วยระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งรูปทรง

ของน้ำแข็งจะถูกสร้างด้วย โปรแกรม การวาดรูปและ นำมาสร้าง แบบจำลองตาข่ายข้อมูล ( Meshing) แล้ว นำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมเพื่อใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหา จากการวิจัยพบว่า การตั้งค่าตัวแปรและ ค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณที่เหมาะสมจะสามารถ ทำให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดัง แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ในครั้งนี้

### 3. ขั้นตอนการวิจัย

การวิเคราะห์การแข็งตัวของน้ำ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ 1.น้ำมีปริมาตรเท่าเดิม แต่รูปทรง เปลี่ยนไป และ 2.น้ำมีปริมาตรลดลงครึ่งหนึ่งและมี รูปทรงเปลี่ยนไป

ในกรณีที่ 1 น้ำแข็งเดิมมีรูปทรงเป็น ปริซึมฐาน สี่เหลี่ยมผืนผ้า จะถูกเปลี่ยนเป็นรูปทรงต่างๆกัน โดย กำหนดปริมาตรให้คงที่เท่ากับภาชนะที่ใช้บรรจุเดิมซึ่ง มีปริมาตรรวม 0.183 m<sup>3</sup> และเพื่อให้สภาวะขอบเขตมีความใกล้เคียงกันจึงกำหนดให้พื้นที่บริเวณผิว ขอบเขตบนที่สัมผัสกับอากาศมีขนาดเท่ากันคือ 0.151 m<sup>2</sup> ดังแสดงในตารางที่ 2

ในกรณีที่ 2 รูปทรงของช่องน้ำแข็งที่ทำการศึกษา จะมีปริมาตรลงครึ่งหนึ่งคือ 0.0915 m<sup>3</sup> และเพื่อให้ สภาวะขอบเขตมีความใกล้เคียงกันจึง ลดพื้นที่บริเวณ ผิวขอบเขตบนที่สัมผัสกับอากาศจาก 0.151 m<sup>2</sup> เป็น 0.75 m<sup>2</sup> ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยผลที่ได้จะนำมา เปรียบเทียบกับแบบจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของที่มี ปริมาตร 0.183 m<sup>3</sup>

### 4. ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพ

รูปทรงแต่ละรูปทรงจะมีพื้นที่ผิวด้านนอกไม่ เท่ากันดังแสดงในตารางที่ 2-3 พื้นที่ผิวสัมผัสกับ น้ำเกลือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการขึ้นรูปน้ำแข็งของ ซึ่งสามารถนิยามได้ด้วยตัวแปรตัวใหม่เรียกว่า “ความ ยาวในการแข็งตัว (Freezing Length)” หรือสัดส่วน ของพื้นที่ผิวสัมผัสน้ำเกลือของช่องน้ำแข็งต่อรัศมีของ วงกลมที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถบรรจุในพื้นที่หน้าตัดของ ช่องน้ำแข็งดังสมการ

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ในการ วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

| Material Properties  | Water Conditions Using in Fluent  |
|----------------------|---|
| Initial Temperature  | 298 K   |
| Nacl Temperature     | Temperature Constant 266.53 K   |
| Air Temperature      | 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<br>$y = 4E-05x^2 + 0.0079x + 0.5582$ (Liquidus)<br>$y = -2E-07x^2 - 0.0588x + 2.7619$ (Solidus)  |
| Cp                   | Piecewise-Polynomial<br>$y = 0.0018x^4 - 0.1337x^3 + 2.6766x^2 - 20.834x + 4231.8$ (Liquidus)<br>$y = 0.0423x^3 - 0.6339x^2 + 55.808x + 1618.5$ (Solidus)               |
| Density              | Piecewise-Polynomial<br>$y = -0.0001x^4 + 0.0082x^3 - 0.2629x^2 + 0.8758x + 999.09$ (Liquidus)<br>$y = -0.0001x^4 - 0.0017x^3 + 0.0443x^2 - 0.6884x + 924.39$ (Solidus) |

$$L_{fre} = \frac{A_s}{R} \quad (5)$$

โดยที่  $A_s$  = พื้นที่ผิวสัมผัสน้ำเกลือของช่องน้ำแข็ง และ  $R$  = รัศมีวงกลม จากการวิเคราะห์พบว่าระยะเวลาใน การแข็งตัวของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันในรูปทรงที่ แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบได้จาก  $L_{fre}$  โดยตรง ไม่ต้องการวิเคราะห์จากวิธี CFD ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป ตารางที่ 4 และ 5 แสดงค่าความยาวในการแข็งตัวของ รูปทรงและปริมาตรที่แตกต่างกันทั้งสองกรณีศึกษา ตามลำดับ

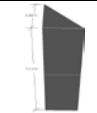
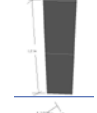
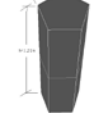
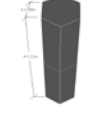
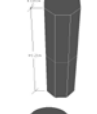
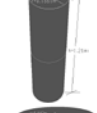

**ตารางที่ 2 รูปทรงและปริมาตรในกรณีที่ 1**

| รูปทรงวัตถุ                    | พื้นผิวสัมผัส<br>น้ำเกลือ (m <sup>2</sup> ) | พื้นผิว<br>ทั้งหมด(m <sup>2</sup> ) | ปริมาตร<br>(m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------|---|-------------------------------------|------------------------------|
| ปริซึมฐาน 3 เหลี่ยม            | 2.42  | 2.57                                | 0.1830                       |
| ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยม<br>ผืนผ้า  | 2.10  | 2.25                                | 0.1830                       |
| ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยม<br>จัตุรัส | 2.03  | 2.18                                | 0.1830                       |
| ปริซึมฐาน 5 เหลี่ยม            | 1.94  | 2.09                                | 0.1830                       |
| ปริซึมฐาน 6 เหลี่ยม            | 1.90  | 2.05                                | 0.1830                       |
| ปริซึมฐาน 8 เหลี่ยม            | 1.87  | 2.02                                | 0.1830                       |
| ทรงกระบอก                      | 1.82  | 1.97                                | 0.1830                       |
| ครึ่งทรงกลม                    | 1.69  | 1.84                                | 0.1830                       |

|   |   |
|---|---|
|    | ปริซึมฐานสามเหลี่ยมด้านเท่า<br>ด้านยาว 0.550 m สูง 1.21 m |
|    | ปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้า<br>0.4 m x 0.78 m สูง 1.21 m    |
|  | ปริซึมฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส<br>ด้านยาว 0.3885 m สูง 1.21 m |
|  | ปริซึมฐานห้าเหลี่ยม<br>ด้านยาว 0.296 m สูง 1.21 m         |
|  | ปริซึมฐานหกเหลี่ยม<br>ด้านยาว 0.241 m สูง 1.21 m          |
|  | ปริซึมฐานแปดเหลี่ยม<br>ด้านยาว 0.176 m สูง 1.21 m         |
|  | ทรงกระบอก<br>เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.44 m สูง 1.21 m           |
|  | ครึ่งทรงกลม<br>เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.884 m สูง 1.21 m        |

**ตารางที่ 3 รูปทรงและปริมาตรในกรณีที่ 2**

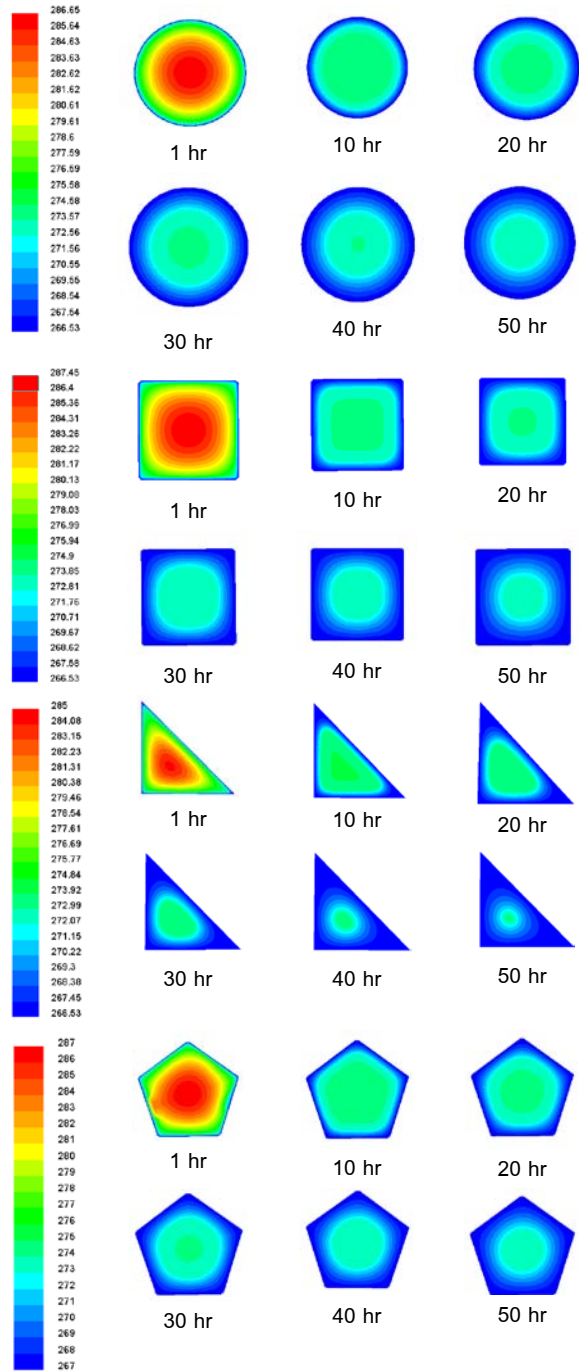
| รูปทรงวัตถุ                    | พื้นผิวสัมผัส<br>น้ำเกลือ (m <sup>2</sup> ) | พื้นผิว<br>ทั้งหมด(m <sup>2</sup> ) | ปริมาตร<br>(m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------|---|-------------------------------------|------------------------------|
| ปริซึมฐาน 3 เหลี่ยม            | 1.68  | 1.76                                | 0.0915                       |
| ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยม<br>ผืนผ้า  | 1.47  | 1.55                                | 0.0915                       |
| ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยม<br>จัตุรัส | 1.41  | 1.48                                | 0.0915                       |
| ปริซึมฐาน 5 เหลี่ยม            | 1.34  | 1.42                                | 0.0915                       |
| ปริซึมฐาน 6 เหลี่ยม            | 1.31  | 1.39                                | 0.0915                       |
| ปริซึมฐาน 8 เหลี่ยม            | 1.29  | 1.36                                | 0.0915                       |
| ทรงกระบอก                      | 1.25  | 1.33                                | 0.0915                       |
| ครึ่งทรงกลม                    | 1.09  | 1.17                                | 0.0915                       |

|   |   |
|---|---|
|    | ปริซึมฐานสามเหลี่ยมด้านเท่า<br>ความยาวด้าน 0.389 m สูง 1.21 m     |
|    | ปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้า<br>0.2 m x 0.78 m สูง 1.21 m            |
|  | ปริซึมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส<br>ความยาวด้าน 0.2749 m สูง 1.21 m |
|  | ปริซึมฐานห้าเหลี่ยม<br>ความยาวด้าน 0.2096 m สูง 1.21 m            |
|  | ปริซึมฐานหกเหลี่ยมความยาวด้าน 0.1706 m<br>ความสูง 1.21 m          |
|  | ปริซึมฐานแปดเหลี่ยม<br>ความยาวด้าน 0.1251 m สูง 1.21 m            |
|  | ทรงกระบอก<br>เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2102 m สูง 1.21m                  |
|  | ทรงครึ่งทรงกลม<br>เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.404 m สูง 0.202 m            |

#### 4.2 ระยะเวลาในการแข็งตัวกรณีเปลี่ยนรูปทรง

รูปที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ระหว่าง อุณหภูมิและเวลาในการแข็งตัวของน้ำ เมื่อมีรูปทรงที่แตกต่างกัน โดยแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นที่หน้าตัดของน้ำแข็ง ชองที่เวลา 1 ชม. และเพิ่มทุกๆ 10 ชม. เวลาที่เพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิจะลดลงโดยบริเวณชิดผนังจะมี

อุณหภูมิต่ำที่สุดและบริเวณกึ่งกลางมีอุณหภูมิมากที่สุด ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระนาบมีลักษณะคล้ายพื้นที่ที่หน้าตัด โดยขนาดเล็กลงและเปลี่ยนเป็นวงกลมตามเวลาที่เพิ่มมากขึ้น จากการวิเคราะห์ พบว่าปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าใช้เวลาน้อยที่สุด 31 ชม. โดยมี  $L_{frc}=16.153m$  ที่อัตราส่วนของเหลว ( $\beta$ ) = 0.5 ดังแสดงในตารางที่ 4

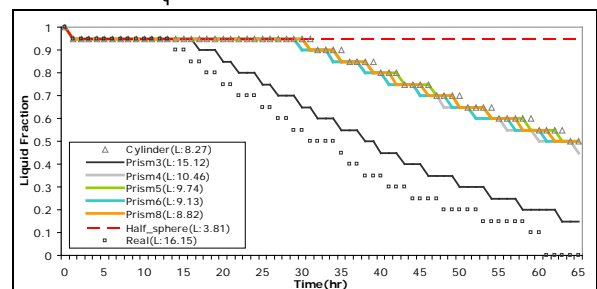


รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา แสดงให้เห็นว่าน้ำสามารถแข็งตัวได้เร็วที่สุดเทียบกับรูปทรงอื่น หากพิจารณาจากค่าความยาวในการแข็งตัวในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ปริซึมฐานสี่เหลี่ยม ผืนผ้ามีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับรูปทรงอื่น ลักษณะการแข็งตัวเริ่มจากผิวด้านข้างที่ติดกับน้ำเกลือ แล้วค่อยๆหดลงมาเป็นรูปวงกลม

ตารางที่ 4 ความยาวในการแข็งตัวในกรณีเปลี่ยนรูปทรงแต่ปริมาตรเท่าเดิม

| รูปทรงวัตถุ<br>ปริซึม    | รัศมีวงกลม<br>(m) | พื้นที่ผิวสัมผัส<br>น้ำเกลือ (m <sup>2</sup> ) | L <sub>fre</sub><br>(m) | เวลา<br>(hr) |
|--------------------------|-------------------|--|-------------------------|--------------|
| ฐาน 3 เหลี่ยม            | 0.160 m           | 2.42   | 15.125                  | 37           |
| ฐาน 4 เหลี่ยม<br>ผืนผ้า  | 0.130 m           | 2.10   | 16.153                  | 31           |
| ฐาน 4 เหลี่ยม<br>จัตุรัส | 0.194 m           | 2.03   | 10.463                  | 60           |
| ฐาน 5 เหลี่ยม            | 0.199 m           | 1.94   | 9.748                   | 61           |
| ฐาน 6 เหลี่ยม            | 0.208 m           | 1.90   | 9.134                   | 61           |
| ฐาน 8 เหลี่ยม            | 0.212 m           | 1.87   | 8.820                   | 62           |
| ทรงกระบอก                | 0.220 m           | 1.82   | 8.272                   | 64           |
| ครึ่งทรงกลม              | 0.443 m           | 1.69   | 3.814                   | -            |

รูปที่ 3 เปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลาที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวขอบเขตบน 15 cm ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจพบว่ารูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าใช้เวลาน้อยที่สุดและรูปทรงครึ่งทรงกลมใช้เวลามากที่สุด เมื่อพิจารณาที่ อัตราส่วนของเหลวเดียวกันโดยที่อัตราส่วนของเหลวเท่ากับ 0.5 พบว่ารูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้า (รูปทรงจริง) ใช้เวลา 31 hr โดยมีรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมด้านเท่าใช้เวลา 37 hr โดยรูปทรงปริซึมอื่นๆ จะใช้เวลาใกล้เคียงกันประมาณ 60 hr และทรงครึ่งทรงกลมจะใช้เวลามากที่สุด

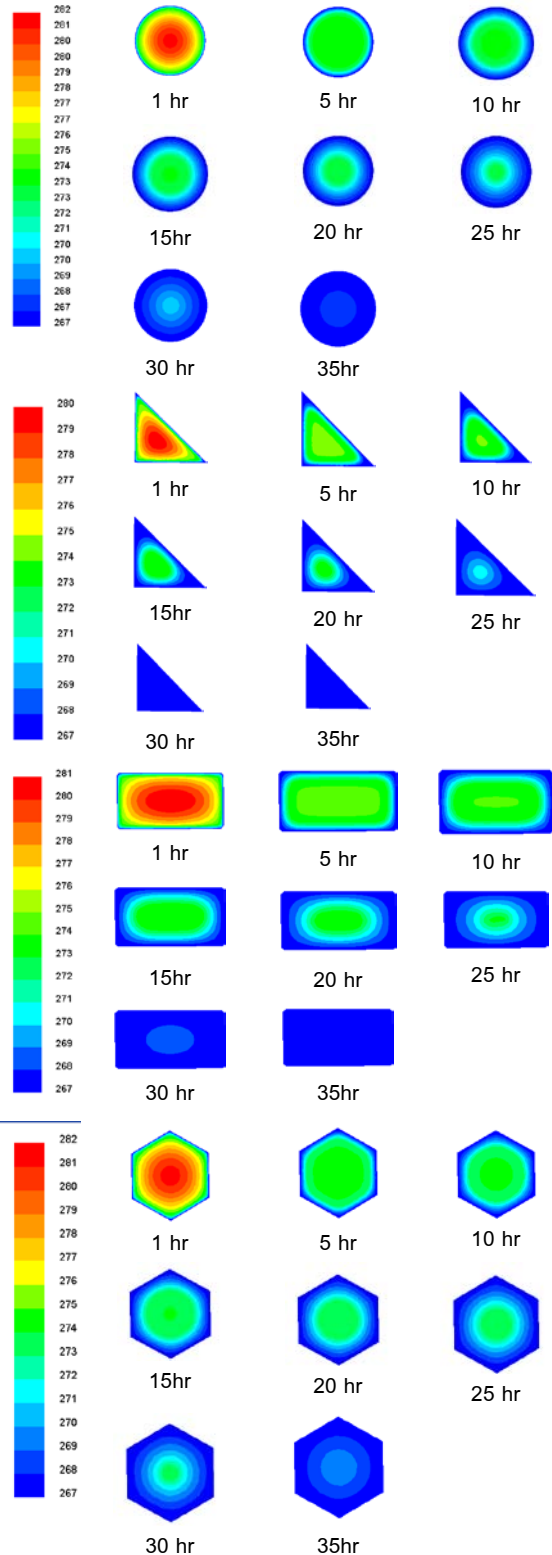


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลา ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวขอบเขตบน 15 cm ในกรณีศึกษารูปทรงภาชนะบรรจ

#### 4.3 ระยะเวลาในการแข็งตัวกรณีลดปริมาตร

รูปที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการแข็งตัวของน้ำเมื่อมีรูปทรงที่แตกต่างกัน โดยแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นที่หน้าตัดของน้ำแข็ง



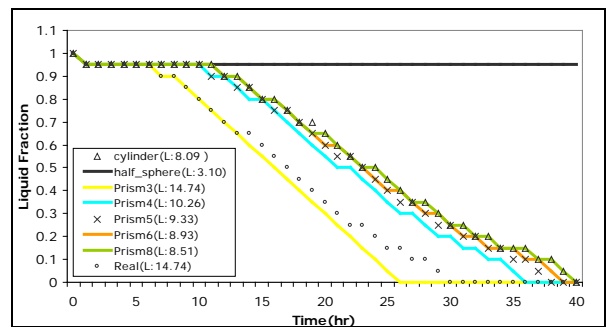


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลาของเวลาที่เวลา 1 ชม. และเพิ่มทุกๆ 5 ชม. เวลาที่เพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิจะลดลงโดยบริเวณขีดผนังจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดและบริเวณกึ่งกลางมีอุณหภูมิมากที่สุด ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระนาบมีลักษณะคล้ายพื้นที่หน้าตัด โดยขนาดเล็กลงและเปลี่ยนเป็นวงกลม

ตามเวลาที่เพิ่มมากขึ้นลักษณะเหมือนกับกรณีการเปลี่ยนรูปทรง จากการวิเคราะห์ พบว่าปริซึมฐานสามเหลี่ยมด้านเท่าใช้เวลาน้อยที่สุด 15 ชม. โดยมี  $L_{fre}=14.748m$  รองลงมาเป็นปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่อัตราส่วนของเหลว ( $\beta$ ) = 0.5 ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความยาวในการแข็งตัวในกรณีลดปริมาตรลงครึ่งหนึ่ง

| รูปทรงวัตถุ                | รัศมีวงกลม (m) | พื้นที่สัมผัส น้ำเกลือ (m <sup>2</sup> ) | $L_{fre}$ (m) | เวลา (hr) |
|----------------------------|----------------|--|---------------|-----------|
| ปริซึมฐาน 3 เหลี่ยม        | 0.114 m        | 1.681                                    | 14.748        | 15        |
| ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมผืนผ้า  | 0.100 m        | 1.474                                    | 14.740        | 16        |
| ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมจัตุรัส | 0.137 m        | 1.405                                    | 10.262        | 20        |
| ปริซึมฐาน 5 เหลี่ยม        | 0.144 m        | 1.343                                    | 9.330         | 23.5      |
| ปริซึมฐาน 6 เหลี่ยม        | 0.147 m        | 1.314                                    | 8.939         | 23.5      |
| ปริซึมฐาน 8 เหลี่ยม        | 0.151 m        | 1.286                                    | 8.519         | 23.5      |
| ทรงกระบอก                  | 0.155 m        | 1.254                                    | 8.094         | 23.5      |
| ครึ่งทรงกลม                | 0.352 m        | 1.092                                    | 3.104         | -         |



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลา ที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวขอบเขตบน 15 cm ในกรณีศึกษาการลดปริมาตร

รูปที่ 5 เปรียบเทียบอัตราส่วนของเหลวเทียบกับเวลาที่ตำแหน่งต่ำกว่าผิวขอบเขตบน 15 cm ในกรณีศึกษาการลดปริมาตรพบว่ารูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมด้านเท่า ใช้เวลาน้อยที่สุดและรูปทรงครึ่งทรงกลมใช้เวลามากที่สุด เมื่อพิจารณาที่ อัตราส่วนของเหลว เดียวกัน โดยที่อัตราส่วนของเหลว 0.5

พบว่ารูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้า(รูปทรงจริง) ใช้เวลา 16 hr โดยมีรูปทรงปริซึมฐานสามเหลี่ยมด้านเท่าใช้เวลา 15 hr โดยรูปทรงปริซึมอื่นๆ จะใช้เวลาใกล้เคียงกันประมาณ 20-24 hr และทรงครึ่งทรงกลม จะใช้เวลามากที่สุด

### 5. การวิเคราะห์และสรุปผล

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งของระหว่างปริมาตร 0.1830 m<sup>3</sup> และ 0.0915 m<sup>3</sup> ที่อัตราส่วนของเหลว 0.5 พบว่า ปริซึมฐาน 3 เหลี่ยมและปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมผืนผ้า ใช้เวลาในการแข็งตัวของน้ำน้อยที่สุดตามลำดับ และเมื่อลดปริมาตรลงครึ่งหนึ่ง เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปน้ำแข็งจะลดลงมากกว่าครึ่งหนึ่ง

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบระยะเวลาในการแข็งตัว

| รูปทรงวัตถุ                | เวลาที่ใช้ (hr)                  | เวลาที่ใช้ (hr)                   |
|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|                            | กรณีปริมาตร 0.183 m <sup>3</sup> | กรณีปริมาตร 0.0915 m <sup>3</sup> |
| ปริซึมฐาน 3 เหลี่ยม        | 37                               | 15                                |
| ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมผืนผ้า  | 31                               | 16                                |
| ปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมจัตุรัส | 60                               | 20                                |
| ปริซึมฐาน 5 เหลี่ยม        | 61                               | 23.5                              |
| ปริซึมฐาน 6 เหลี่ยม        | 61                               | 23.5                              |
| ปริซึมฐาน 8 เหลี่ยม        | 62                               | 23.5                              |
| ทรงกระบอก                  | 64                               | 23.5                              |
| ครึ่งทรงกลม                | -                                | -                                 |

รูปทรงและปริมาตรของน้ำแข็งของมีผลต่อระยะเวลาในการแข็งตัวของน้ำภายใน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตรูปทรงที่ใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวของน้ำน้อยที่สุด ได้แก่ ปริซึมฐาน 3 เหลี่ยมและปริซึมฐาน 4 เหลี่ยมผืนผ้าตามลำดับ เนื่องจากจากระยะทางจากจุดศูนย์กลางถึงผิวสัมผัสมีระยะสั้นที่สุดนั่นเอง ทำให้การถ่ายเทความร้อนจากน้ำสู่น้ำแข็งทำได้เร็วกว่า

จากจุดนี้เองทำให้สามารถเปรียบเทียบระยะเวลาในการแข็งตัวของน้ำระหว่างรูปทรงต่างๆได้ ซึ่งอาจจะเป็นรูปทรงที่นอกเหนือจากที่ได้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ โดยดูจากค่าความยาวในการแข็งตัว ( Freezing Length) ดังที่ได้นิยามไว้ข้างต้น จะเห็นได้ว่ารูปทรงที่

มีค่าความยาวในการแข็งตัวสูงจะสามารถแข็งตัวได้เร็วกว่ารูปทรงที่มีค่าความยาวในการแข็งตัวต่ำ

ในการลดปริมาตรของน้ำลงครึ่งหนึ่ง จะสามารถลดระยะเวลาในการแข็งตัวมากกว่าครึ่งหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตจริง การลดปริมาตรลงครึ่งหนึ่งเท่ากับว่าจะต้องทำการผลิตจำนวน 2 ครั้ง เพื่อให้ได้น้ำแข็งเท่าเดิม อย่างไรก็ตาม การผลิตจำนวน 2 ครั้งยังคงใช้พลังงานในการผลิตที่น้อยกว่า เนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ในการผลิต 2 ครั้งรวมกัน ยังน้อยกว่าการผลิตครั้งเดียวที่มีปริมาตรเท่าเดิม ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งให้ผู้ผลิตสามารถนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตได้

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ โรงน้ำแข็ง ห้องเย็นอมรรัตน์ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ในการเก็บข้อมูลวิจัย จนทำให้งานวิจัยเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ภาณุวัฒน์ เน้อยทอง (2551). การจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งของแบบสามมิติด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, วิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] ภาณุวัฒน์ เน้อยทอง และ เกรียงไกร อัครมาศ บัณฑิต (2551). การจำลองการขึ้นรูปน้ำแข็งแบบสามมิติด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ , การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- [3] รจนา ประไพพนพ (2547). การจำลองแบบการขึ้นรูปน้ำแข็งของด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม, ว.สงขลานครินทร์ วทท.26 (1):55-70.
- [4] อนเนก หีบสมบัติ (2536) การวิเคราะห์พลังงานในโรงงานน้ำแข็งของ, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและพัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.