

## การจำลองกระบวนการแช่แข็ง: ผลของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศ

โชคดี จุติษฐ์ประเสริฐ<sup>1</sup> ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี<sup>2</sup>

และ สุวิษ ศิริวัฒน์โยธิน<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 14 มกราคม 2551 ตอรับเมื่อ 18 สิงหาคม 2551

### บทคัดย่อ

การแช่เยือกแข็งเป็นวิธีหนึ่งที่ยิยมใช้อย่างแพร่หลายในการถนอมอาหาร หนึ่งในวิธีการแช่เยือกแข็งในเชิงอุตสาหกรรมที่นิยมใช้ คือ การแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เครื่องแช่แข็งลมเป่าที่มีสายพานลำเลียงเป็นเกลียว ที่มักพบปัญหาความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิและการกระจายความเร็วลม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ (-20 ถึง -50 °C) และความเร็วลม (0.1 ถึง 5.0 ม./วินาที) ต่อเวลาในการแช่เยือกแข็งของตัวอย่างอาหาร (แบบแบนราบ หนา 0.02 ม. แบบทรงกระบอกแนวยาว และ แบบทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 ม.) โดยกระบวนการจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า ในงานนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหนึ่งมิติ โดยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (แบบแครก-นิโคลสัน) และหาคำตอบด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา FORTRAN พบว่าอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมมีผลต่อเวลาในการแช่เยือกแข็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ เพื่อให้ได้อัตราการแช่แข็งระดับปานกลางและการทำงานที่เสถียร ความเร็วลมควรอยู่ในช่วง 1.6 ถึง 1.8, 2.0 ถึง 2.2 และ 2.0 ถึง 2.1 ม./วินาที หรือเลขนุสเซลท์ที่อยู่ระหว่าง 23.5 ถึง 24.5, 20.8 ถึง 21.0 และ 24.0 ถึง 26.0 โดยเวลาแช่แข็งเป็น 38, 21 และ 12 นาที สำหรับตัวอย่างอาหารแบบแบนราบ แบบทรงกระบอก และแบบทรงกลม ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** การแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า / การจำลองกระบวนการ / ความเร็วลม / เลขนุสเซลท์

<sup>1</sup> นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>3</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

## Simulation of Food Freezing: Effects of Air Temperature and Velocity

Chokedee Juditprasert <sup>1</sup>, Chairath Tangduangdee <sup>2</sup>, and Suwit Siriwattanayotin <sup>3</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

*Received 14 January 2008 ; accepted 18 August 2008*

### Abstract

Freezing is one of the most popular methods for long term preservation of foods. Air-blast freezing is one which is commonly used in food freezing industry. The major problems of a large scale spiral air-blast freezer were non-uniformity of both air temperature and velocity distributions. Therefore, this work was aimed to simulate the effects of air temperature (-20 to -50°C) and velocity (0.1 to 5.0 m/s) on freezing times of model foods (slab of 0.02 m in thick, cylinder and sphere of 0.02 m in diameter) in the spiral air-blast freezing. The result would be used as guidance on an improvement of an air-blast freezer. One-dimensional numerical analysis using finite difference method (Crank-Nicholson scheme) was developed and written in FORTRAN code. The simulated results showed that the ambient temperature affected the freezing time, especially during the phase change period. To obtain the moderate freezing rate with stable operation, the suitable air velocities were 1.6 to 1.8, 2.0 to 2.2 and 2.0 to 2.1 m/s in equivalence with Nusselt numbers of 23.5 to 24.5, 20.8 to 21.0 and 24.0 to 26.0 and the corresponding freezing times would be 38, 21 and 12 minutes for slab, cylindrical and spherical shapes, respectively.

**Keywords :** Air Blast Freezing / Simulation / Air Velocity / Nusselt Number

---

<sup>1</sup> Graduated Student, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering.

## 1. บทนำ

การแช่เยือกแข็งเป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้อย่างแพร่หลายในการถนอมอาหาร เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และชะลอการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ที่ก่อให้เกิดความเสียหายของอาหาร หนึ่งในวิธีการแช่เยือกแข็งในเชิงอุตสาหกรรมที่นิยมใช้คือ วิธีการแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า (Air-blast freezing) โดยทั่วไปอากาศจะหมุนเวียนอยู่บนอาหารที่อุณหภูมิระหว่าง  $-30^{\circ}\text{C}$  และ  $-40^{\circ}\text{C}$  ด้วยความเร็ว 1.5-1.6 ม./วินาที ความเร็วลมที่สูงนี้จะลดความหนาของฟิล์มรอบอาหารและช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน อย่างไรก็ตามการใช้ลมปริมาณมากอาจทำให้ผิวหน้าอาหารแห้งและเสียสภาพเนื้อสัมผัสที่ดี (Freezer burn) การไหลของลมอาจจะขนานหรือตั้งฉากกับอาหารโดยต้องบังคับให้ไหลผ่านอาหารอย่างทั่วถึงทุกชิ้น การแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นจัดจะให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และมีความยืดหยุ่นสูงเนื่องจากสามารถใช้กับอาหารที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ เครื่องมีขนาดกะทัดรัดและใช้เงินลงทุนค่อนข้างต่ำแต่ให้ผลผลิตสูง [1]

การศึกษากระบวนการแช่แข็งมีการพัฒนามาเป็นเวลานาน ด้วยวิธีการศึกษาที่แตกต่างกัน ทั้งโดยการทดลองและการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งวิธีหลังเป็นที่นิยมมากขึ้นเนื่องจากสามารถทำนายได้อย่างแม่นยำ รวดเร็ว สะดวกและประหยัดค่าใช้จ่าย การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้มีหลายวิธี Cleland และ Earle [2] ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน 4 แบบ เพื่อทำนายระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่ากับตัวอย่างแบนราบ ทรงกระบอกและทรงกลม Wang และคณะ [3] พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหนึ่งทิศทางเพื่อใช้ในการหาเวลาในกระบวนการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบแครง์-นิโคลสันกับสมการสมดุลความร้อนแบบ apparent heat capacity แล้วนำเวลาที่ทำนายได้ในอาหาร ที่มีรูปร่างแบบทรงกลม ทรงกระบอก แบบแบนราบมาเทียบ ผลกับการทดลอง Huan และคณะ [4] ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ ในกระบวนการแช่เยือกแข็งและ

การละลายของอาหารแช่เยือกแข็งเพื่อทำนายระยะเวลาที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีรูปแบบต่างๆ ที่อยู่ภายใต้สภาวะการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกัน

ปัญหาของการแช่แข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าที่มีสายพานลำเลียงเป็นเกลียว (Spiral Freezer) ที่มักพบเสมอคือ การกระจายของอุณหภูมิอากาศและความเร็วลมที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของลมเย็นจากบนลงล่างสวนทางกับการเคลื่อนที่ของอาหาร ความเร็วลมบริเวณทางเข้าเครื่องมักมีค่าต่ำ การถ่ายโอนความร้อนจึงเป็นไปได้ช้า ทำให้เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิในช่วง pre-cooling phase นานขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะพิจารณาผลของความเร็วมวลและอุณหภูมิอากาศต่อเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วยการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไข เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าที่มีสายพานเคลื่อนที่เป็นเกลียว

## 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

กระบวนการแช่เยือกแข็งเป็นการถ่ายโอนความร้อนผ่านวัตถุโดยการนำความร้อนที่มีการเปลี่ยนสถานะของน้ำเกิดขึ้นด้วย เพื่อให้การแก้ปัญหาเป็นไปได้ง่าย จึงใช้สมมติฐานที่กำหนดให้การกระจายของอุณหภูมิและสมบัติทางกายภาพของอาหารเกิดขึ้นอย่างสมมาตร ไม่มีการถ่ายโอนมวลและการระเหยระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งในชั้นอาหาร 1 มิติ และสมบัติทางความร้อนของอาหารมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งสมการอนุพันธ์การนำความร้อนจะเขียนได้ว่า [3]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{m}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

โดย คือ  $\rho$  ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C$  คือ ค่าความจุความร้อน ( $\text{J/kg } ^{\circ}\text{C}$ ), คือ  $k$  สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$ ),  $T$  คือ อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $r$  คือ รัศมีของทรงกระบอกหรือทรงกลม หรือระยะทางจากจุดกึ่งกลางสำหรับแผ่นราบ (ม.),  $t$  คือ เวลา (วินาที),  $m$  คือ ค่าดัชนีรูปทรง มีค่าเป็น 0 สำหรับแผ่นราบ เท่ากับ 1 สำหรับทรงกระบอกและ 2 สำหรับทรงกลม

กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่างอาหารมีความสม่ำเสมอทุกๆ จุด โดยมีอุณหภูมิเท่ากับ  $T_0$  ดังนั้นสภาวะเริ่มต้นสามารถแสดงได้ดังนี้

$$T(r, t) = T_0, (t = 0, 0 \leq r \leq R) \quad (2)$$

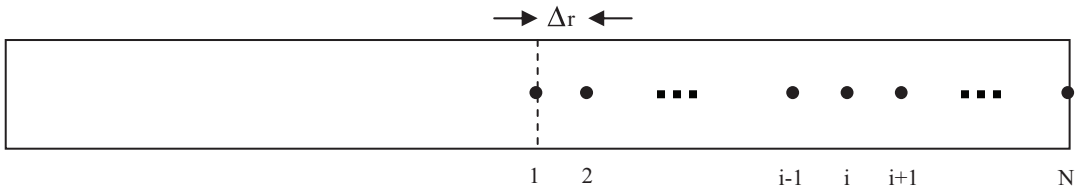
โดยที่  $R$  คือระยะระหว่างจุดศูนย์กลางและขอบเขตและสภาวะขอบเขตแสดงได้ดังนี้

ที่จุดศูนย์กลาง  $\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=0} = 0 \quad (3)$

ที่ผิว  $-k\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R} = h(T_s - T_\infty) \quad (4)$

เมื่อ  $h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ )  $T_s$  คือ อุณหภูมิที่ผิวของอาหาร ( $^\circ\text{C}$ )  $T_\infty$  คือ อุณหภูมิของอากาศ ( $^\circ\text{C}$ )

ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบแครงก์-นิโคลสันมาใช้เพื่อแก้สมการข้างต้น โดยลักษณะของรูปทรงเป็นดังที่แสดงในรูปที่ 1 แบ่งช่วงความแปรผันของระยะทาง  $r$  ( $0 \leq r \leq R$ ) เป็น  $Z$  จุด ( $1 \leq i \leq Z$ ) และมีระยะห่างระหว่างจุด  $\Delta r = R/(Z-1)$  ดังนั้น  $r = (i-1) \Delta r$  เช่นเดียวกันกับความแปรผันของเวลาที่แบ่งเป็นช่วง  $\Delta t$  เมื่อ  $t = n\Delta t$  ( $0 \leq n$ ) ดังนั้น  $T_{i,n}$  แสดงถึงอุณหภูมิที่ประเมินได้จากตำแหน่ง  $r = (i-1) \Delta r$  ที่เวลา  $t = n\Delta t$



รูปที่ 1 ลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ในแบบจำลอง

เมื่อกำหนดให้  $f = \frac{\rho C (\Delta r)^2}{k_i \Delta t}$  และ  $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$  ดังนั้น

สมการประจำจุดของสมการ (1) (3) และ (4) แสดงได้

ดังนี้ [3]

จุดภายใน

$$\begin{aligned} & \left(\frac{m}{4(i+1)} - \frac{1}{2} + \frac{k_{i+1} - k_{i-1}}{8k_i}\right) T_{i-1,n+1} + (f+1)T_{i,n+1} - \left(\frac{m}{4(i-1)} + \frac{1}{2} + \frac{k_{i+1} - k_{i-1}}{8k_i}\right) T_{i+1,n+1} \\ & = -\left(\frac{m}{4(i-1)} - \frac{1}{2} + \frac{k_{i+1} - k_{i-1}}{8k_i}\right) T_{i-1,n} + (f-1)T_{i,n} + \left(\frac{m}{4(i-1)} + \frac{1}{2} + \frac{k_{i+1} - k_{i-1}}{8k_i}\right) T_{i+1,n} \end{aligned} \quad (5)$$

จุดศูนย์กลาง  $(f+1)T_{1,n+1} - T_{2,n+1} = (f-1)T_{1,n} + T_{2,n} \quad (6)$

จุดที่ผิว

$$\begin{aligned} & \left( \frac{m}{2(N-1)} - 1 + \frac{k_N - k_{N-1}}{2k_N} \right) T_{N-1,n+1} + \left( f+1 - \frac{m}{2(N-1)} - \frac{k_N - k_{N-1}}{2k_N} \right) T_{N,n+1} \\ &= \left( f-1 + \frac{m}{2(N-1)} + \frac{k_N - k_{N-1}}{2k_N} \right) T_{N,n} - \left( \frac{m}{2(N-1)} - 1 + \frac{k_N - k_{N-1}}{2k_N} \right) T_{N-1,n} + \\ & \frac{\Delta r}{k_N} \alpha (2T_a - T_{N,n+1} - T_{N,n}) \end{aligned} \quad (7)$$

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของตัวอย่างชิ้นอาหารรูปทรงต่างๆ ทำโดยใช้สหสัมพันธ์ระหว่างเลขนุสเซลท์ ( $Nu = hD/k$ ) กับ Reynolds

Number ( $Re = U_\infty L/\nu$ ) และ Prandtl Number ( $Pr$ ) ดังต่อไปนี้ [5]

แบบแบนราบ  $Nu = 0.644 Re^{1/2} Pr^{1/3}$  (8)

แบบทรงกระบอก (ความเร็วลมตั้งฉากกับแนวแกน)

$Nu = 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3}$   $Re = 40-4000$

$Nu = 0.193 Re^{0.618} Pr^{1/3}$   $Re = 4000-40000$  (9)

แบบทรงกลม  $Nu = 2 + (0.4Re^{1/2} + 0.06Re^{2/3}) Pr^{0.4} (\mu/\mu_s)^{1/4}$  (10)

โดย  $D$  คือ รัศมีของทรงกระบอกหรือทรงกลม หรือระยะทางจากจุดกึ่งกลางสำหรับแผ่นราบ (ม.)  $k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฟิล์มอากาศ ( $W/m^\circ C$ )  $U_\infty$  คือ ความเร็วลม (ม./วินาที)  $L$  คือ รัศมีของทรงกระบอกหรือทรงกลม หรือระยะทางจากจุดกึ่งกลางสำหรับแผ่นราบ (ม.)  $\nu$  คือความหนืดคินเนเมติก (ตร.ม./วินาที)  $\mu$  คือ ความหนืดของอากาศที่อุณหภูมิอากาศ ( $Ns/m^2$ )  $\mu_s$  คือ ความหนืดของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอาหาร ( $Ns/m^2$ )

### 3. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำโดยใช้สมบัติของแผ่นสตรอบเบอร์รี่จาก

วารสารปริทัศน์ของ Cleland and Earle [2] (ตารางที่ 1 และ 2) โดยแปรระดับ time step เป็น 0.01, 0.25, 0.50, 0.75, 1.5, 3.0, 6.0 และ 12.0 วินาที (ซึ่งทุกระดับ time step ใช้เวลาในการประมวลผลของ CPU ไม่เกิน 0.35 นาที) พบว่าเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งที่ได้จากแบบจำลองมีค่าอยู่ระหว่าง 35.83 ถึง 35.89 นาที ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากวารสารปริทัศน์ที่เวลาในการแช่เยือกแข็งมีค่าอยู่ระหว่าง 35.57 ถึง 35.82 นาที ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากการนำความร้อนในช่วงการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ในวารสารปริทัศน์ของ Cleland และ Earle [2] ได้มาจากวิธี linear interpolation แต่ในงานวิจัยนี้ได้มาจากวิธี curve fitting

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [2]

พารามิเตอร์	
ความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง (ม.)	0.02
อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	10.0
อุณหภูมิอากาศ (°C)	-35.0
อุณหภูมิสุดท้าย (°C)	-18.0
สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )	70.0
ความร้อนแฝงของการแข็งตัว (J/kg)	287500.0

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงความร้อนของแผ่นสโตรเบอร์ [2]

อุณหภูมิ (°C)	K ( $W/m \text{ } ^\circ C$ )	อุณหภูมิ (°C)	$\rho C$ ( $J/m^3 \text{ } ^\circ C \times 10^{-6}$ )
-40.0	2.08	-40.0	2.15
-5.0	2.08	-5.0	2.15
-3.0	1.74	-0.8	134.3
-1.5	1.08	-0.5	4.09
-0.8	0.65	40.0	4.09
-0.5	0.54		
40.0	0.54		

#### 4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

##### 4.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นอาหารในแต่ละรูปทรง

รูปที่ 2 แสดงกราฟที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ลักษณะตัวอย่างแบบแบนราบหนา 0.02 ม. กับสมบัติต่างๆ ในตารางที่ 1 โดยอุณหภูมิของอากาศเป็น  $-35 \text{ } ^\circ C$  การแช่เยือกแข็งตัวอย่างที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่  $10 \text{ } ^\circ C$  จนกระทั่งอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเป็น  $-18 \text{ } ^\circ C$  พบว่าอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งถึงช่วงที่มีการเปลี่ยนสถานะ โดยที่อุณหภูมิจะคงที่เนื่องจากมีการดึงความร้อนแฝงออกจากตัวอย่าง ทำให้น้ำเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นน้ำแข็ง หลังจากนั้นอุณหภูมิของตัวอย่างจะลดลงจนกระทั่งถึงอุณหภูมิต่ำที่สุดที่กำหนด จากกราฟพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งตัวอย่าง

แบบแบนราบให้มีอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเป็น  $-18 \text{ } ^\circ C$  มีค่าประมาณ 38 นาที

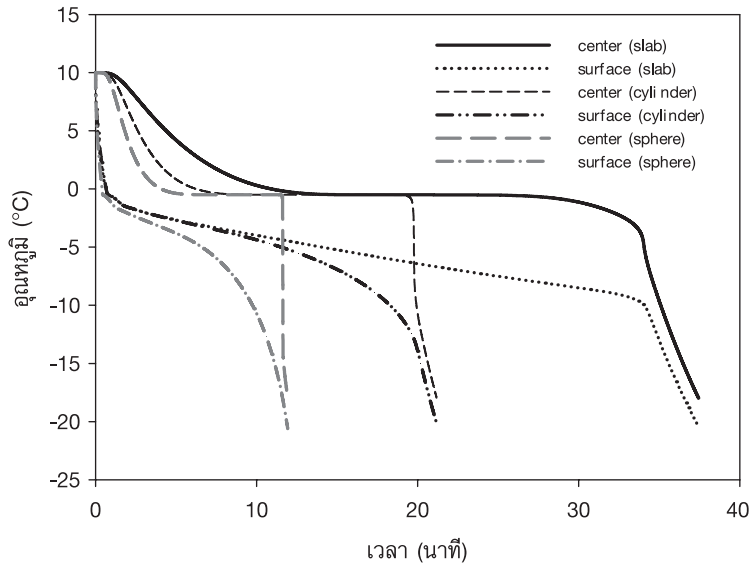
ในการทำงานเดียวกันกับการแช่เยือกแข็งของตัวอย่างรูปทรงกระบอกแนวยาวและทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 ม. พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งมีค่าประมาณ 21 และ 12 นาที ตามลำดับ ซึ่งเร็วกว่าตัวอย่างแบบแบนราบ เนื่องจากตัวอย่างรูปทรงกระบอกแนวยาวและทรงกลมมีพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายโอนความร้อนลดลงเมื่อระยะทางเข้าใกล้ศูนย์กลาง ( $r = 0$ ) ทำให้ฟลักซ์ความร้อนที่ระยะใกล้ศูนย์กลางสูงกว่าที่ระยะไกลออกไป ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างแบบแบนราบที่ฟลักซ์ความร้อนจะคงที่และเคลื่อนที่เป็นระนาบ ดังนั้นการลดลงของอุณหภูมิของตัวอย่างรูปทรงกระบอกแนวยาวและทรงกลมจึงเร็วกว่าเมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเท่ากัน

## 4.2 ผลของอุณหภูมิอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นอาหาร

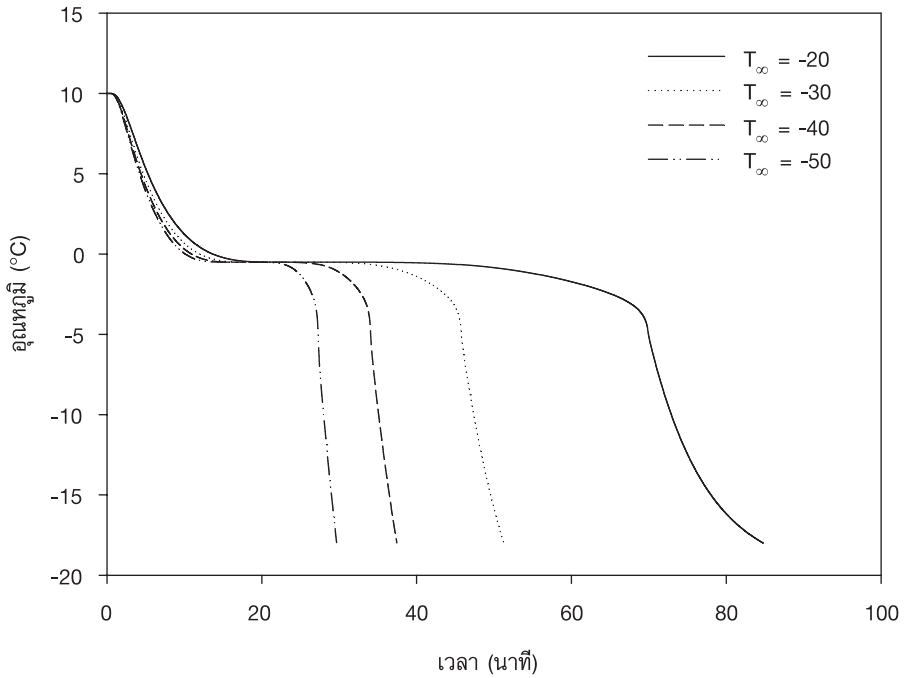
เมื่อทำการแปรระดับอุณหภูมิอากาศเป็น  $-20$ ,  $-30$ ,  $-40$  และ  $-50$  °C โดยใช้สมมติต่างๆ ดังในตารางที่ 1 และความเร็วลมเป็น 1.70 ม/วินาที พบว่าเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งของตัวอย่างอาหารชิ้นแบนราบมีค่าเป็น 85, 51, 37 และ 30 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า ช่วงแรกของการเปลี่ยนอุณหภูมิตั้งแต่จุดกลาง (pre-cooling) กับช่วงสุดท้าย (tempering) มีลักษณะคล้ายกัน ในขณะที่ช่วงการเปลี่ยนสถานะ (phase change) ต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เพราะเป็นช่วงที่มีการดึงความร้อนแฝงออกจากตัวอย่างเป็นจำนวนมาก เพื่อให้ น้ำเกิดการ

เปลี่ยนสถานะกลายเป็นน้ำแข็ง ยิ่งอุณหภูมิของอากาศต่ำ อัตราการถ่ายโอนความร้อนระหว่างอากาศและชิ้นอาหารยิ่งสูงขึ้น

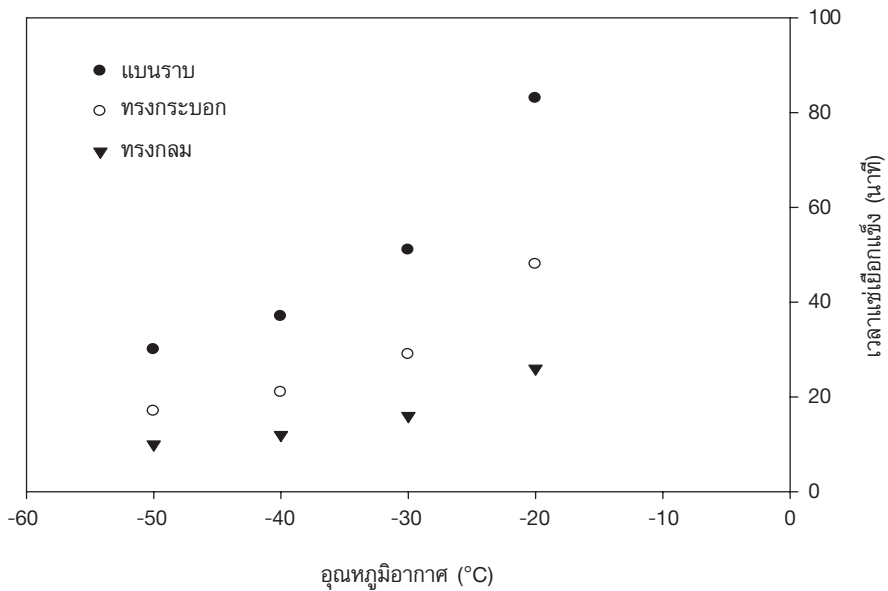
ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งของชิ้นอาหารรูปทรงต่างๆ กับอุณหภูมิอากาศมีลักษณะโค้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 จะเห็น ว่าในช่วงอุณหภูมิการใช้งานของเครื่องแช่แข็งแบบลมเป่าทั่วไปซึ่งอยู่ที่  $-30$  ถึง  $-40$  °C นั้นส่งผลต่อเวลาในการแช่เยือกแข็งของตัวอย่างอาหารชิ้นแบนราบที่แตกต่างกันมากที่สุด ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิของเครื่องแช่แข็งแบบลมเป่าให้ต่ำสุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2 กราฟการแช่เยือกแข็งของชิ้นอาหารหนา 2 ซม. รูปทรงต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



**รูปที่ 3** กราฟการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวอย่างเบนราบหนา 2 ซม. ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



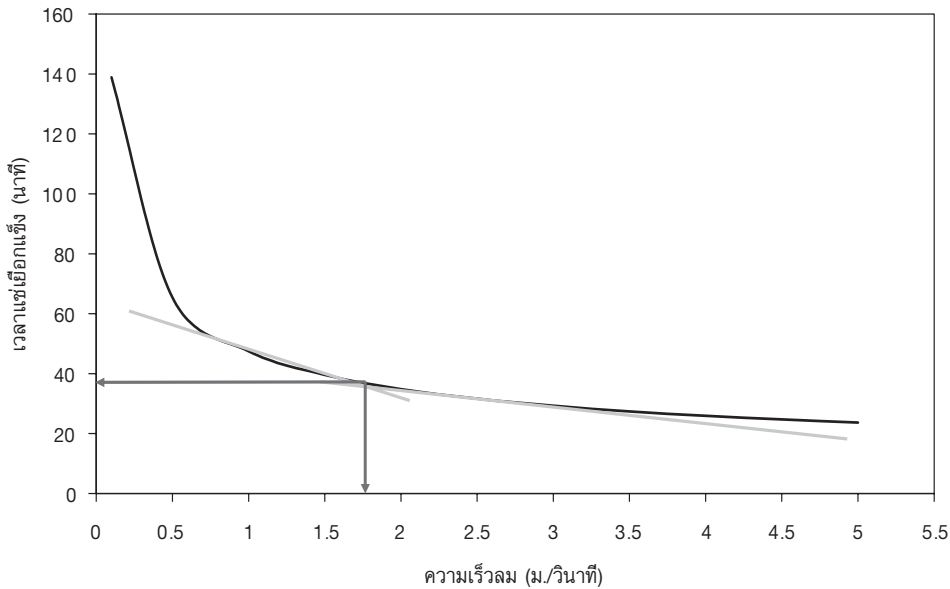
**รูปที่ 4** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่างๆ และระยะเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งอาหารรูปทรงต่างๆ



### 4.3 ผลของความเร็วลมต่อเวลาในการแช่เยือกแข็งของชิ้นอาหาร

เมื่อทำการแปรระดับความเร็วลมเป็น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 ม./วินาที (และนำค่าความเร็วลมเหล่านี้ไปใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวตามสหสัมพันธ์ในสมการที่ 8 ถึง 10) และใช้สมบัติต่างๆ ดังในตารางที่ 1 พบว่าความสัมพันธ์

ระหว่างความเร็วลมและเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งของตัวอย่างอาหารชิ้นแบนราบ มีลักษณะเป็นเส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 5 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huan และคณะ [4] ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในเทอมของเลขนุสเซลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) เป็นเส้นโค้งเช่นกัน ดังในสมการที่ 8-10



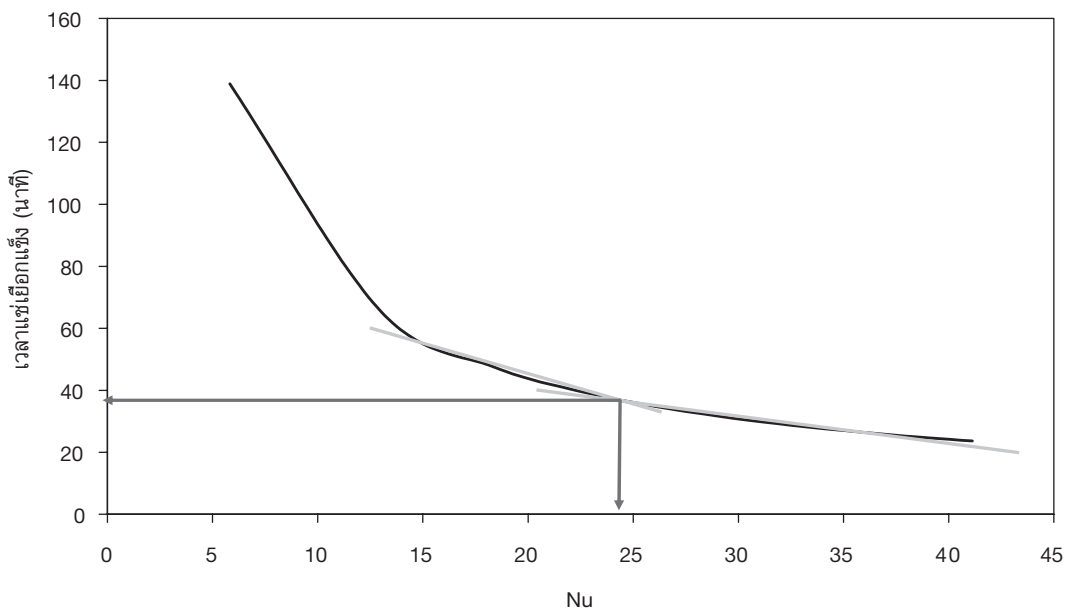
**รูปที่ 5** ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งของอาหารชิ้นแบนราบหนา 2 ซม. กับความเร็วลม

เมื่อพิจารณาหาช่วงความเร็วลมที่เหมาะสมในการแช่แข็งอาหารสำหรับอาหารที่มีความหนาไม่เกิน 2 ซม. ที่มีรูปทรงแบนราบ จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมต่อเวลาในการแช่เยือกแข็ง ซึ่งในช่วงความเร็วลมต่ำ (0-0.7 ม./วินาที) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีค่ามาก ในขณะที่ช่วงความเร็วลมสูง (มากกว่า 1.7 ม./วินาที)

การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีค่าน้อย หรือกล่าวได้ว่าการเพิ่มความเร็วลมที่มากกว่า 1.7 ม./วินาที มีผลต่อเวลาในการแช่เยือกแข็งไม่มากนัก ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5 ดังนั้นความเร็วลมควรมีค่าอยู่ระหว่างช่วง 1.6-2.2 ม./วินาที โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน อยู่ในช่วง 44-55  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$  ขึ้นอยู่กับรูปทรง ดังแสดงในตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ช่วงความเร็วลมกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและเลขนุสเซลท์ที่ให้เวลาในการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสมในแต่ละรูปทรง

รูปทรง	ช่วงความเร็วลม (ม./วินาที)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )	เลขนุสเซลท์	เวลาในการแช่เยือกแข็ง (นาที)
ชิ้นแบนราบ	1.6-1.8	50-52	23.5-24.5	38
ทรงกระบอก	2.0-2.2	44-46	20.8-21.0	21
ทรงกลม	2.0-2.1	53-55	24.0-26.0	12



**รูปที่ 6** ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งของอาหารชิ้นแบนราบหนา 2 ซม. กับเลขนุสเซลท์

นอกจากความเร็วลมแล้ว เวลาในการแช่เยือกแข็งอาหารยังขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นๆ เช่น ขนาดของชิ้นอาหาร เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนในเทอมไร้มิตติของเลขนุสเซลท์ที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง (รูปที่ 6) พบว่ามีลักษณะโค้งคล้ายกับรูปที่ 5 โดยเมื่อเลขนุสเซลท์เพิ่มขึ้น ความสามารถในการดึงความร้อนออกจากตัวอย่างเพิ่มขึ้นและเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งลดลง ทั้งนี้เลขนุสเซลท์เป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของอาหารและอากาศ โดยเลขนุสเซลท์ที่เหมาะสมสำหรับรูปทรงต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ค่าเลขนุสเซลท์

ที่เหมาะสมสำหรับการแช่แข็งอาหารที่มีความไม่เกินหนา 2 ซม. ควรมีค่ามากกว่า 20 หรือประมาณ 10 เท่าของการพาความร้อนแบบธรรมชาติของวัสดุทรงกลม ( $Nu=2.0$ )

## 5. สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการแช่แข็งอาหาร พบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศลดลงและ/หรือ ความเร็วลมเพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาในการแช่แข็งลดลง ความเร็วลมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดอัตราการแช่แข็งในระดับปานกลางสำหรับอาหารที่มีความหนาไม่เกิน 2 ซม. คือ 1.6-1.8,

2.0-2.2 และ 2.0-2.1 ม./วินาที หรือคิดเป็นค่าไร้มิติของเลขนุสเซลท์ มีค่าอยู่ระหว่าง 23.5-24.5, 20.8-21.0 และ 24.0-26.0 โดยเวลาการแช่แข็งมีค่าประมาณ 38, 21 และ 12 นาที สำหรับอาหารรูปทรงแบนราบ ทรงกระบอก และทรงกลม ตามลำดับ อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า ค่าเลขนุสเซลท์ที่ใช้ในการออกแบบเครื่องแช่แข็ง ควรมีค่ามากกว่า 20 ขึ้นไป

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. วิไล รังสาดทอง, 2546, *เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร*, ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, หน้า 390-400.
2. Cleland, A.C. and Earle, R.L., 1984,

“Assessment of Freezing Time Prediction Methods”, *Journal of Food Science*, Vol. 49, pp. 1034-1042.

3. Wang, Z., Wu, H., Zhao, G., Liao, X., Chen, F., Wu, J., and Hu, X., 2007, “One-dimensional Finite-difference Modeling on Temperature History and Freezing Time of Individual Food”, *Journal of Food Engineering*, Vol. 79, pp. 502-510.

4. Huan, Z., He, S., and Ma, Y., 2003, “Numerical Simulation and Analysis for Quick-frozen Food Processing”, *Journal of Food Engineering*, Vol. 60, pp. 267-273.

5. Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., 1990, *Introduction to Heat Transfer*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, NJ., pp. 360-381.