หน่วยที่ 6
การแช่เยือกแข็ง

ปัจจุบันเทคโนโลยีการแช่เยือกแข็งกำลังเป็นที่นิยมและเป็นเทคโนโลยีหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร จุดประสงค์หลักของการแช่เยือกแข็งคือเพื่อใช้ในการถนอมอาหารให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น โดยการเก็บรักษาอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส สามารถยับยั้งอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้อย่างมีนัยสำคัญและสามารถชะลอการเสื่อมเสียเนื่องจากกิจกรรมของเชื้อแบคทีเรียได้ ทั้งนี้การเก็บรักษาอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งยังสามารถยับยั้งการเสื่อมเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเคมีและกิจกรรมของเอนไซม์ได้เช่นเดียวกัน

ถึงแม้ว่าการแช่เยือกแข็งเป็นวิธีที่สามารถเก็บรักษาให้อาหารมีคุณภาพได้สูงสุด แต่อย่างไรก็ตามการแช่เยือกแข็งก็จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัตถุอาหาร ซึ่งอัตราการแช่เยือกแข็งหรือเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของวัตถุอาหารจากอุณหภูมิที่สูงมาสู่อุณหภูมิต่ำสามารถทำให้คุณภาพหรือสมบัติของอาหารเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการแช่เยือกแข็งนี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างและคุณลักษณะของอาหารเป็นหลัก

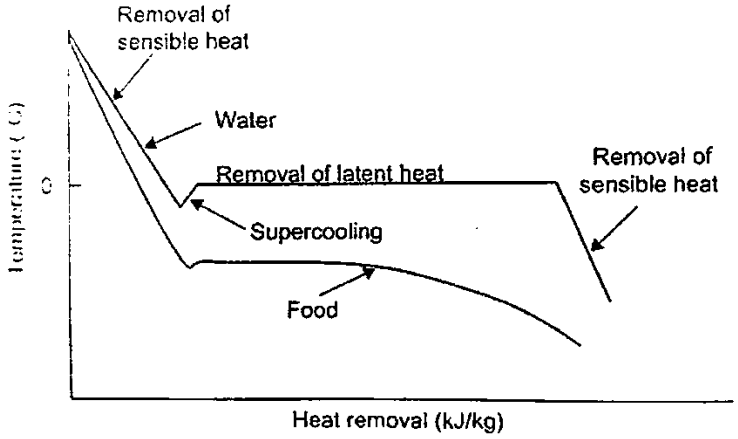
สมบัติของอาหารแช่เยือกแข็ง

น้ำเป็นปัจจัยหลักที่มีบทบาทอย่างมากต่อคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของน้ำระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

1. จุดเยือกแข็งลดต่ำลง (freezing-point depression)

อาหารชนิดต่างๆมักมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่สูงและมีตัวถูกละลายเป็นองค์ประกอบบ้างเล็กน้อย ซึ่งทำให้จุดเยือกแข็งของน้ำในอาหารจะมีค่าต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์ ทั้งนี้จุดเยือกแข็งที่ลดต่ำลงนั้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นของตัวถูกละลายในอาหาร และในสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ กระบวนการแช่แข็งในผลิตภัณฑ์อาหารมีความซับซ้อนมากกว่าการแช่แข็งน้ำบริสุทธิ์ ดังแสดงในภาพที่ 4.1 เป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างการแช่แข็งน้ำและสารละลายที่มีตัวถูกละลายเพียง 1 ชนิดจะเห็นว่ากราฟของน้ำมีอุณหภูมิลดลงเมื่อความร้อนถูกกำจัดออกจากระบบ จนกระทั่งถึงจุดเยือกแข็ง หลังจากเกิดซุปเปอร์คูลลิ่ง (super cooling) หรือการทำให้เย็นยิ่งยวด คือ อุณหภูมิของน้ำลดต่ำลงกว่าจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์แต่ยังไม่เกิดผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นระหว่างที่เกิด super cooling ของน้ำในช่วงนี้ความร้อนจะถูกกำจัดออกไปในรูปของความร้อนแฝงของน้ำ ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง หลังจากน้ำเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งจนหมดแล้ว ถ้าความร้อนถูกกำจัดออกไปจากระบบต่อไป อุณหภูมิก็จะลดลงไปอีก แต่ลักษณะกราฟของการแช่แข็งสารละลายนั้น อุณหภูมิจะลดลงจนถึงจุดเยือกแข็งเริ่มต้นเช่นเดียวกันกับของน้ำแต่อุณหภูมิจุดเยือกแข็งจะลดต่ำลงต่อไป ในช่วงการแช่แข็งเริ่มต้นนั้นจะก่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งของน้ำทำให้ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้น จึงทำให้จุดเยือกแข็งของส่วนที่ยังไม่แข็งตัว (unfrozen) ลดต่ำลงไปอีกด้วย กระบวนการจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆทำให้จุดเยือกแข็งของสารละลายเข้มข้นลดลงจนถึงจุดที่

เรียกว่า ยูเทกติก (eutectic point) ของตัวถูกละลาย หลังจากจุดนี้เมื่อกำจัดความร้อนออกไปอีกจะเกิดผลึกของตัวถูกละลายและผลึกน้ำแข็งเกิดเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นอุณหภูมิของระบบก็จะลดลง



ภาพที่ 4.1 การเปรียบเทียบกราฟการแช่แข็งของน้ำบริสุทธิ์และสารละลายที่มีตัวถูกละลาย 1 ชนิด
ที่มา : Heldman และ Singh (2014, p. 535)

2. การเกิดผลึกน้ำแข็ง (ice crystal formation)

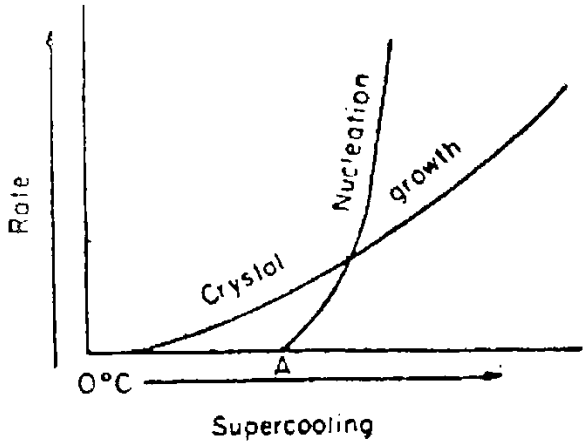
การศึกษาลักษณะการเกิดผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นภายในอาหารระหว่างกระบวนการการแช่เยือกแข็งนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญเนื่องจากขนาดและรูปร่างของผลึกน้ำแข็งจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ กระบวนการการเกิดผลึกจะเกิดขึ้นได้ 2 ขั้นตอน คือ

2.1 การเกิดผลึก (crystal formation) หรือที่เรียกว่า นิวคลีเอชั่น (nucleation)

2.2 การเติบโตของผลึก (crystal growth)

นิวคลีเอชั่นเป็นจุดเริ่มต้นของการแช่แข็ง ที่ก่อให้เกิดนิวคลีไอ (nuclei) ขนาดเล็กๆ ซึ่งจะเป็นจุดศูนย์กลางของผลึกต่อไป อาจกล่าวได้ว่านิวคลีเอชั่นเป็นการกำเนิดอนุภาคที่เล็กที่สุดในสถานะเสถียรที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนิวคลีเอชั่นจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ โฮโมจีเนียส (homogeneous) และเฮทเทอร์โรจีเนียส (heterogeneous) แบบแรกจะเกิดค่อนข้างน้อยจะพบในระบบที่เป็นน้ำบริสุทธิ์อย่างมาก โดยนิวคลีไอดจะเป็นกลุ่มของโมเลกุลน้ำที่รวมตัวกันอย่างสุ่ม ส่วนการเกิดแบบเฮทเทอร์โรจีเนียสนั้น อนุภาคเล็กที่มีอยู่ในสารละลายจะกระทำตัวเป็นนิวคลีไอแล้วเกิดเป็นผลึกขึ้น อนุภาคเหล่านี้ต้องมีโครงสร้างคล้ายกับที่เกิดจากน้ำแข็ง

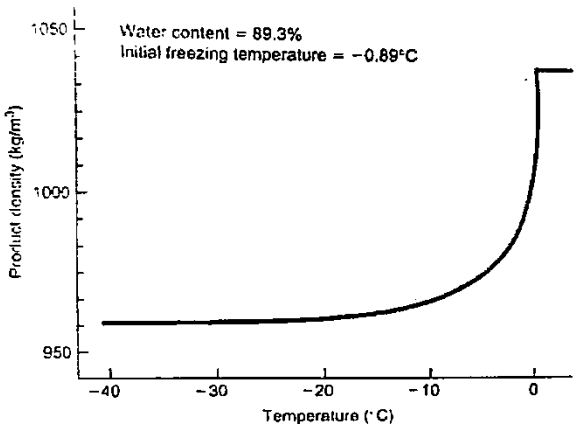
นิวคลีเอชั่นเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการหาอัตราการแช่แข็ง และโครงสร้างผลึกที่เกิดในผลิตภัณฑ์อาหาร จากภาพที่ 4.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดนิวคลีเอชั่นจะเห็นได้ว่า หลังจากที่ทำให้เย็นอย่างยิ่งยวดจะเกิดนิวคลีเอชั่นและอัตราการเกิดจะเร็วมากเมื่ออุณหภูมิลดลง



ภาพที่ 4.2 ผลของการทำให้เย็นยิ่งยวดต่ออัตราการเกิดนิวคลีเอชั่นและการเติบโตของผลึกระหว่างการแช่แข็ง
ที่มา : Fenema และ Powrie (1964) อ้างโดย รุ่งนภา (2535, หน้า 126)

3. ความหนาแน่น (density)

ความหนาแน่นของผลึกน้ำแข็งจะมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของน้ำในสถานะของเหลว ซึ่งน้ำในอาหารเช่นเดียวกันเมื่อน้ำในอาหารกลายเป็นน้ำแข็งก็จะมีความหนาแน่นน้อยกว่าในขณะที่ยังไม่แข็งตัว ภาพที่ 4.3 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของสตรอเบอรี่แช่แข็ง การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นจะค่อยๆเปลี่ยนไปเมื่อน้ำเริ่มเป็นน้ำแข็ง ทั้งนี้ความแตกต่างของความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการแช่แข็งจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นเริ่มต้นของอาหารนั้นๆ

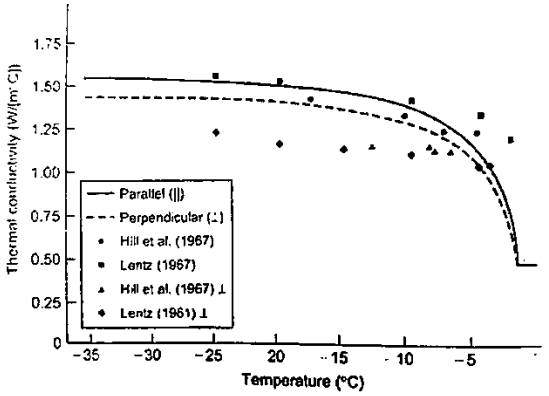


ภาพที่ 4.3 อิทธิพลของการแช่แข็งต่อความหนาแน่นของสตรอเบอรี่
ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 531)

4. สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity)

การถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติของน้ำแข็งมากกว่าการนำความร้อนในน้ำที่เป็นของเหลวถึง 4 เท่า ซึ่งสมบัตินี้จะเป็นเช่นเดียวกันกับอาหารแช่แข็ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำในอาหารจะค่อยๆเปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิลดลง การเปลี่ยนแปลงการนำความร้อนของชิ้นอาหารในขณะแช่แข็งดังแสดงในภาพที่ 4.4 การนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนชิ้นอาหารมี

อุณหภูมิประมาณ –10 องศาเซลเซียส แต่ถ้าชิ้นอาหารมีเยื่อใยเป็นองค์ประกอบมากการนำความร้อนก็จะลดลง

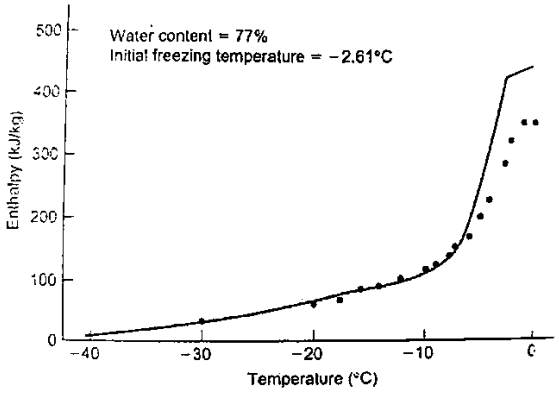


ภาพที่ 4.4 การนำความร้อนของเนื้อแกะแช่แข็ง

ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 532)

5. เอนทาลปี (enthalpy)

ปริมาณความร้อนและเอนทาลปีเป็นสมบัติที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณความเย็นที่จะต้องใช้ในการเก็บรักษาอาหารแช่แข็งซึ่งโดยทั่วไปแล้วปริมาณความร้อนจะเข้าใกล้ 0 ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีจะเกิดขึ้นอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิของอาหารต่ำกว่าจุดเยือกแข็งประมาณ 10 องศาเซลเซียส

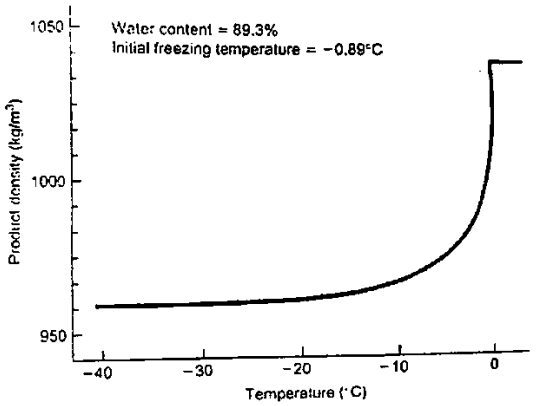


ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของเชอรี่แช่แข็ง

ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 532)

6. ความร้อนจำเพาะปรากฏ (apparent specific heat)

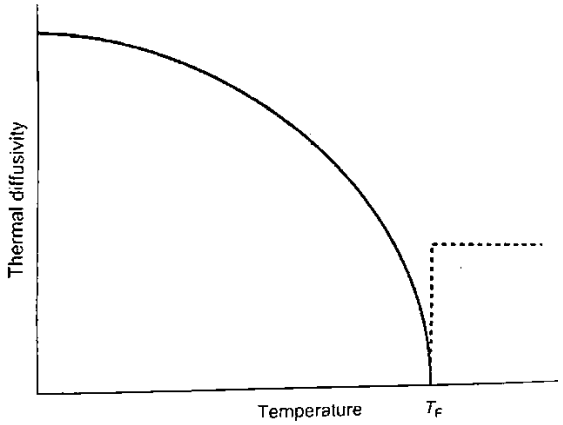
ความหมายของความร้อนจำเพาะปรากฏตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถอธิบายได้ด้วยภาพที่ 4.6 จากภาพแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียส ความร้อนจำเพาะปรากฏของอาหารแช่แข็งจะไม่มีความแตกต่างจากความร้อนจำเพาะปรากฏของอาหารที่ยังไม่แข็งตัว ซึ่งความร้อนจำเพาะปรากฏเป็นค่าที่จะแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิใดที่น้ำโดยส่วนใหญ่ของอาหารเกิดการแข็งตัว



ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความร้อนจำเพาะปรากฏของเชอรี่แช่แข็ง
ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 533)

7. การแพร่ความร้อนปรากฏ (apparent thermal diffusivity)

เมื่อทราบค่าความหนาแน่น การนำความร้อน และความร้อนจำเพาะปรากฏของอาหารแล้วก็สามารถที่จะคำนวณค่าการแพร่ความร้อนปรากฏได้ การเปลี่ยนแปลงการแพร่ความร้อนปรากฏเมื่อเทียบกับอุณหภูมิสามารถแสดงดังภาพที่ 4.7 จากภาพสามารถอธิบายได้ว่าการแพร่ความร้อนปรากฏเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ซึ่งการแพร่ความร้อนปรากฏสามารถเกิดขึ้นได้ดีในอาหารแช่แข็งมากกว่าอาหารที่ยังไม่แข็งตัว



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการแพร่ความร้อนปรากฏและอุณหภูมิระหว่างการแช่แข็ง
ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 534)

การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีระหว่างการแช่เยือกแข็ง

ในการออกแบบระบบการแช่เยือกแข็งจำเป็นต้องพิจารณาความต้องการของระบบทำความเย็นในการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อาหารให้ถึงระดับที่ต้องการ กระบวนการแช่แข็งอาหารนั้นมีกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากอาหารมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ส่งผลให้จุดเยือกแข็งนั้นลดต่ำลง การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีทั้งหมดเพื่อลดอุณหภูมิจะใช้ในการประมาณความต้องการของระบบทำความเย็น โดยให้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\Delta H = \Delta H_S + \Delta H_V + \Delta H_L + \Delta H_I$$

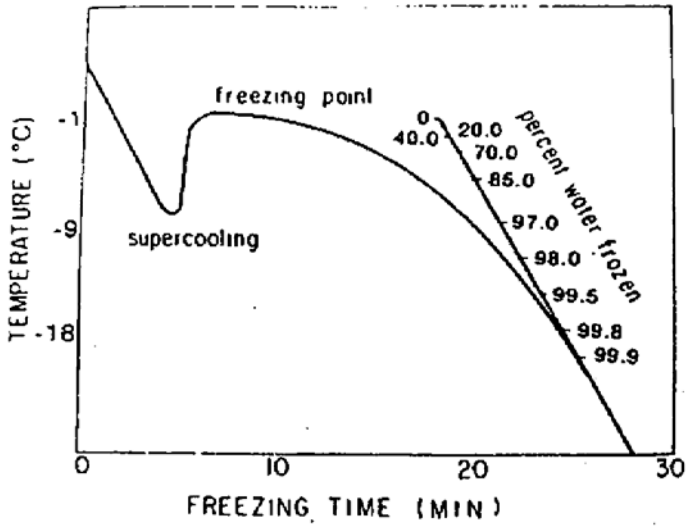
เมื่อ H_S คือ ความร้อนสัมผัสที่กำจัดออกจากผลิตภัณฑ์ของแข็ง

H_V คือ ความร้อนสัมผัสที่กำจัดออกจากน้ำที่ยังไม่แข็ง

H_L คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเนื่องจากความร้อนแฝง

H_I คือ ความร้อนสัมผัสที่กำจัดออกจากน้ำแข็ง

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่าความร้อนจำเพาะ สัดส่วนของน้ำที่แข็งตัวและที่ยังไม่แข็งตัวล้วนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและจำเป็นต้องทราบค่าเอนทาลปีทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อลดอุณหภูมิอาหารให้ถึงระดับที่ต้องการ ภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนโมลของตัวทำละลายซึ่งเป็นน้ำจะลดลง ในขณะที่เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายในส่วนที่ยังไม่แข็งตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จุดเยือกแข็งของสารละลายนั้นลดต่ำลงเรื่อยๆ



ภาพที่ 4.8 กราฟแช่แข็งเนื้อ

ที่มา : Desrosier และ Desrosier (1977) อ้างโดย รุ่งนภา (2535, หน้า 127)

เวลาในการแช่แข็ง

การคำนวณที่เป็นหลักสำคัญในการแช่แข็งคือการคำนวณเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง ซึ่งจะเป็นปัจจัยที่ใช้เลือกระบบแช่แข็ง เพื่อให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ช่วงเวลาที่สำคัญที่เกิดขึ้นระหว่างการแช่แข็งมีด้วยกัน 3 ช่วงคือ ช่วงก่อนการแข็งตัว ช่วงการเปลี่ยนเฟส และช่วงหลังการแข็งตัว

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการแช่แข็งประกอบด้วย

1. ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผลิตภัณฑ์และตัวกลางทำความเย็น
2. ลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากผลิตภัณฑ์ หรือภายในผลิตภัณฑ์
3. ขนาด ชนิด รูปร่างของภาชนะบรรจุ
4. ขนาด รูปร่าง และสมบัติทางด้านความร้อนของผลิตภัณฑ์

1. สมการของแพลงค์ (Plank's equation)

สมการที่นิยมใช้ในการคำนวณเพื่อทำนายเวลาในการแช่แข็งคือสมการของแพลงค์ซึ่งถูกนำเสนอโดย Plank และถูกดัดแปลงเพื่อใช้กับอาหารโดย Ede โดยสมการนี้ได้อธิบายเฉพาะในช่วงของการเปลี่ยนเฟสระหว่างกระบวนการแช่แข็งการประมาณการอัตราเร็วของการแช่แข็งโดยสมการของแพลงค์นั้นมีสมมุติฐานว่า

1.1 เมื่อเวลาเริ่มต้น อาหารทั้งหมดยังไม่แข็งตัว แต่มีอุณหภูมิที่จุดเยือกแข็ง

1.2 การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในชั้นของอาหารที่แข็งตัวแล้วภายใต้สภาวะที่เรียกว่า steady state (สมบัติคงที่ไม่เปลี่ยนไปตามเวลา)

เมื่อพิจารณาวัตถุอาหารที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมชิ้นบาง (slab) ที่มีความหนา a ดังแสดงใน ภาพที่ 4.9 สมมุติว่าองค์ประกอบของวัตถุชนิดนี้เป็นน้ำบริสุทธิ์เนื่องจากวิธีนี้จะไม่สนใจในช่วงก่อนการแช่แข็ง อุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นอาหารจึงเท่ากับอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง (T_F) ซึ่งอุณหภูมิจุดเยือกแข็งของน้ำเท่ากับ 0 องศาเซลเซียสเมื่อชิ้นอาหารถูกให้ความเย็นด้วยสารทำความเย็นจนมีอุณหภูมิเท่ากับ T_a เมื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสักระยะจะได้ชั้นของการแช่แข็งเป็น 3 ชั้น คือ 2 ชั้นนอกที่แข็งตัวความหนาเท่ากับ x และอีก 1 ชั้นที่ไม่แข็งตัวตรงกึ่งกลางของชิ้นอาหาร จากภาพกำหนดให้

T_a คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็น (freezing medium) (C°)

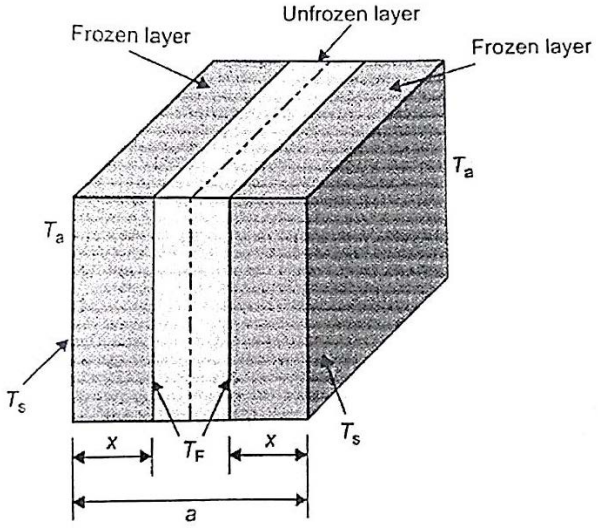
T_F คือ จุดเยือกแข็งเริ่มต้นของอาหาร และเป็นอุณหภูมิที่ยังไม่แข็งตัว (C°)

T_S คือ อุณหภูมิที่ผิวอาหาร (C°)

K คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารแช่แข็ง (W/m•K)

L คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของอาหาร (kJ/kg)

ρ คือ ความหนาแน่นของอาหาร (kg/m^3)



ภาพที่ 4.9 การใช้สมการของแพลงค์ในการหาเวลาแช่แข็ง

ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 536)

ให้ความร้อน (q) ที่เกิดขึ้นในแนวของการแช่แข็งเกิดในระนาบ x

$$q = AL\rho \frac{dx}{dt}$$

และสมการการถ่ายเทความร้อนแบบการนำ คือ

$$q = A(T_F - T_S)\,(k/x)$$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวอาหารไปยังตัวทำความเย็น

$$q = Ah_S(T_S - T_a)$$

เมื่อ h_S คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว

ดังนั้นปริมาณการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดในอาหาร คือ

$$q = \frac{A(T_F - T_a)}{(\frac{1}{h_S} + \frac{x}{k})}$$

จะได้ $$AL\rho\frac{dx}{dt} = \frac{A(T_F - T_a)}{(\frac{1}{h_S} + \frac{x}{k})}$$

$$dt(T_F - Ta) = (\frac{1}{h_S} + \frac{x}{k})$$

กำหนดให้ a = ความหนาของชิ้นอาหาร

เมื่อเวลา t = 0 ความหนา x = 0

เวลาของการแช่แข็ง $= t_F$ ความหนา x = a/2

$$\int_0^{t_F} dt = (\frac{L\rho}{t_F - T_a}\int_0^{a/2} [\frac{1}{h_s} + \frac{x}{k}]\,dx$$

$$t_F = \frac{\rho L}{T_F - T_a}\,[\frac{a}{2h_s} + \frac{a^2}{8k}]$$

ดังนั้นจะได้สมการของแพลงค์ คือ

$$t_F = \frac{\rho L}{T_F - T_a}\,[\frac{Pa}{h_s} + \frac{Ra^2}{k}]$$

เมื่อ ค่า P และ R ขึ้นกับลักษณะของอาหาร คือ ถ้ามีรูปร่าง

เป็นสี่เหลี่ยมชิ้นบาง	P = 1/2;	R = 1/8
เป็นทรงกระบอกยาว	P = 1/4;	R = 1/16
เป็นทรงกลมหรือลูกบาศก์	P = 1/6;	R = 1/24

และ a คือ ความหนาของทรงสี่เหลี่ยมชิ้นบางหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมหรือทรงกระบอก

ตัวอย่างที่ 4.1

แช่แข็งอาหารทรงกลมด้วยเครื่องแช่แข็งแบบ air-blast freezer โดยอุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นอาหาร เท่ากับ 10 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของอากาศเย็นเท่ากับ -40 องศาเซลเซียส ชิ้นอาหารมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 7 เซนติเมตรความหนาแน่น 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อุณหภูมิจุดเยือกแข็งเริ่มต้นเท่ากับ -1.25 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 1.2 W/(m.k) ความร้อนแฝงของการหลอมละลายเท่ากับ 250 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน เท่ากับ 50 W/(m^2•K) จงคำนวณหาเวลาในการแช่แข็ง

วิธีทำ โจทย์กำหนดให้

อุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นอาหาร (T_i) = 10°C

อุณหภูมิของอากาศเย็น (T_∞) = -40°C

อุณหภูมิจุดเยือกแข็งเริ่มต้น (T_F) = -1.25°C

เส้นผ่านศูนย์กลางของอาหาร (a) = 7 cm = 0.07 m

ความหนาแน่น (ρ) = 1,000 kg/m^3

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) = 1.2 W/(m•K)

ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย (H_L) = 250 kJ/kg

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_C) = 50 W/(m^2•K)

ค่าคงที่ของรูปทรงกลม P = 1/6 ; R = 1/24

แทนค่าในสมการของแพลงค์ จะได้

$$t_F = \frac{(1{,}000\ kg/m^3)(250kJ/kg)}{[-1.25°C-(-40°C)]} \times \frac{0.07\ m}{6(50W/[m^2•K)} + \frac{(0.07)^2}{24(1.2W/[m•K]}$$

t_F = 2.6 kJ/W

เนื่องจาก 1,000 J = 1 kJ และ 1 W = 1 J/s

ดังนั้น t_F = 2.6 x 10^3 s = 0.72 h

ตัวอย่างที่ 4.2

ถ้าชิ้นเนื้อรูปทรงสี่เหลี่ยมบางนำไปแช่แข็งในเครื่องแช่แข็งแบบ plate freezer มีอุณหภูมิของแผ่น -34 องศาเซลเซียส เนื้อมีความหนา 10 เซนติเมตร และห่อด้วยกระดาษหนา 1 มิลลิเมตรทั้งสองด้าน อยากทราบว่าต้องใช้เวลาในการแช่แข็งนานเท่าใด ถ้าไม่ห่อด้วยกระดาษใช้เวลาแช่แข็งนานเท่าใด เมื่อกำหนดให้

เครื่องแช่แข็งแบบแผ่นมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน = 600 J/m^2•s•°C

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของกระดาษ = 0.06 J/m•s•°C

คุณสมบัติของเนื้อ

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเนื้อแช่แข็ง = 1.6 J/m•s•°C

ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว = 2.56×10^5 J/kg

ความหนาแน่น = 1,090 kg/m^3

จุดเยือกแข็ง = -2°C

วิธีทำ 1) การนำความร้อนของกระดาษบรรจุ = x/k = 0.001/0.06

= 0.017

2) หาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของอาหาร จากสมการ

$$1/h_s = 1/h_c + (x/k) + 1/h_r$$

เมื่อ h_s คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวทั้งหมด W/(m^2•K)

H_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพา W/(m^2•K)

H_r คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสี W/(m^2•K)

X คือ ความหนาของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ (m)

K คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ W/(m^2•K)

แทนค่าจะได้

$1/h_s = 1/h_c + (x/k) = 0.017 + 1/600 = 0.019$

$h_s = 52.63$ J/m^2•s•°C)

3) ค่าคงที่ของรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบบาง P = 1/2 ; R = 1/8

ดังนั้นเวลาในการแช่แข็งโดยสมการของแพลงค์เท่ากับ

$$t_F = \frac{(1{,}090 \text{kg/m}^3)\,(2.56\times10^5 \text{ J/kg})}{[-2°\text{C}-(-34°\text{C})\,]} \times \left[\frac{0.1\text{m}}{2(52.63)[\text{J/m}^2\cdot\text{s}\cdot°\text{C}]} + \frac{(0.1)^2}{8(1.6)[\text{J/m}^2\cdot\text{s}\cdot°\text{C}]}\right]$$

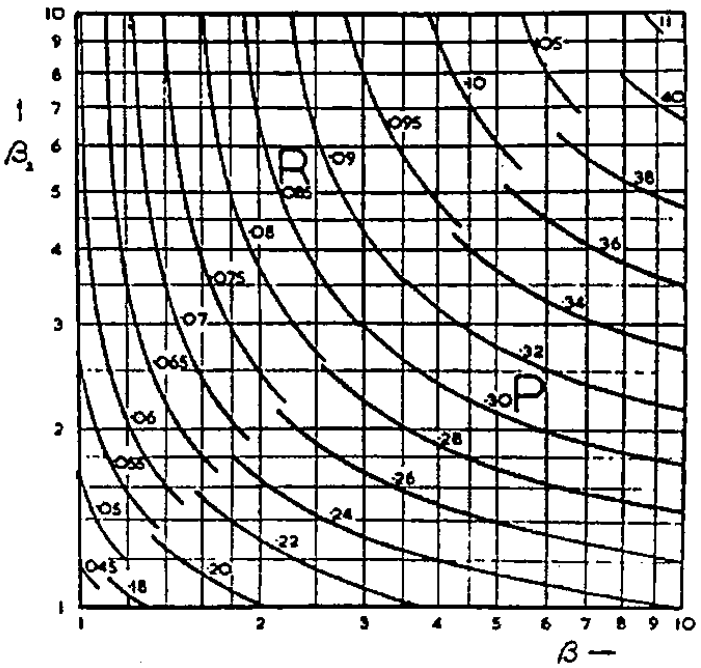
$t_F = 1.51\times10^4$ s = 4.19 h

เมื่อไม่ห่อด้วยกระดาษ $h_s = 600$ J/m^2•s•°C

$$t_F = \frac{(1{,}090 \text{kg/m}^3)\,(2.56\times10^5 \text{ J/kg})}{[-2°\text{C}-(-34°\text{C})\,]} \times \left[\frac{0.1\text{m}}{2(600)[\text{J/m}^2\cdot\text{s}\cdot°\text{C}]} + \frac{(0.1)^2}{8(1.6)[\text{J/m}^2\cdot\text{s}\cdot°\text{C}]}\right]$$

$t_F = 7{,}539$ s = 2.09 h

เมื่ออาหารมีลักษณะสัณฐานเป็นก้อน ค่า P และ R จะอยู่ระหว่างค่าของชิ้นบางและลูกบาศก์ และจะใช้แผนภาพที่ 4.10 ในการหาค่า P และ R ขนาดของ a ที่ใช้ในสมการจะเป็นขนาดที่เล็กที่สุดของอาหารรูปทรงดังกล่าว โดยค่าผลคูณระหว่างค่าคงที่ (β1) และค่า a เท่ากับขนาดที่เล็กที่สุด อันดับสอง ในทำนองเดียวกัน ผลคูณระหว่างค่าคงที่ (β2) และค่า a เท่ากับขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสัณฐานอาหารที่พิจารณา ค่าคงที่ β1 และ β2 ที่ได้จะนำไปหาค่า P และ R จากแผนภาพแล้วจึงทำการหาเวลาในการแช่แข็งต่อไป



ภาพที่ 4.10 แผนภาพหาค่าคงที่ P และ R สำหรับสมการของแพลงค์เมื่อใช้กับอาหารทรงสี่เหลี่ยม
ที่มา : Ede (1949) อ้างโดย รุ่งนภา (2535, หน้า 136)

ตัวอย่างที่ 4.3

ชิ้นเนื้อรูปทรงบล็อกมีขนาด 1 เมตร x 0.25 เมตร X 0.6 เมตร นำไปแช่แข็งในห้องเย็นแบบ Convection freezer) (ค่า hc = 30 $W/m^2 \cdot K$) ซึ่งมีอุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส เนื้อชิ้นนี้มีอุณหภูมิเริ่มต้น 5 องศาเซลเซียส ให้คำนวณหาเวลาที่ต้องการในการแช่แข็งให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิเป็น -10 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นเท่ากับ 1,050 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวเท่ากับ 248.25 กิโลจูลต่อกิโลกรัมสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชิ้นเนื้อเท่ากับ 1.108 W/m•K จุดเยือกแข็งเริ่มต้นเท่ากับ -1.75 องศาเซลเซียส

วิธีทำ 1) หาค่า P และ R จากภาพที่ 4.10 โดยที่

β_1 = 0.6/0.25 = 2.4

β_2 = 1/0.25 = 4

จะได้ค่า P = 0.3 และ R = 0.085

2) แทนค่าที่ได้ลงในสมการของแพลงค์

$$t_F = \frac{(1{,}050 kg/m^3)(248.25 \times 10^3 J/kg)}{[-1.75°C-(-30°C)][3{,}600s]} \times \left[\frac{0.3(0.25m)}{30[W/m \cdot K]} + \frac{0.085(0.25)^2}{1.108[W/m \cdot K]}\right]$$

t_F = 18.7 h

จะเห็นได้ว่าสมการของแพลงค์นั้นมีข้อจำกัดค่อนข้างมาก ในการคำนวณเวลาที่ต้องใช้ในการแช่แข็งก็ไม่ได้พิจารณาถึงความร้อนสัมผัสที่กำจัดออกไปเรื่อยๆตลอดช่วงเวลาหนึ่งของการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหาร

(เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิให้ถึงจุดเยือกแข็ง) โดยใช้จุดเยือกแข็งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของการคำนวณ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (k) ซึ่งใช้ที่อุณหภูมิคงที่นั้นเป็นสิ่งที่ไม่ถูกต้อง เนื่องจากช่วงของการแช่แข็งจะมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างคงที่ ซึ่งค่า k นี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์มักจะถูกสมมุติขึ้นให้มีสถานะเป็นของเหลวทั้งหมด ทำให้สมการของแพลงค์มีความถูกต้องลดลง เมื่อร้อยละของน้ำในผลิตภัณฑ์ลดลง อย่างไรก็ตาม Ede ได้พิสูจน์ว่า สมการของแพลงค์ก็สามารถคำนวณหาเวลาในการแช่แข็งได้ค่อนข้างถูกต้อง

2. สมการอื่นๆที่ใช้ในการคำนวณเวลาในการแช่แข็ง

มีความพยายามหลายครั้งในการปรับปรุงความถูกต้องสำหรับการสร้างสมการทำนายเวลาในการแช่แข็ง Mannapperuma และ Singh ได้ค้นพบสมการที่ใช้ในการทำนายเวลาแช่แข็งและเวลาในการละลายน้ำแข็งของอาหารโดยใช้สมการทางตัวเลขโดยอาศัยค่าเอนทาลปีของการนำความร้อนและการเปลี่ยนเฟส ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

2.1 สมการของ Pham (Pham's method)

Pham ได้เสนอวิธีในการทำนายเวลาในการแช่แข็งอาหารและเวลาในการทำละลาย วิธีของเขาสามารถใช้ได้กับชิ้นอาหารที่มีลักษณะรูปร่างที่ไม่ปกติ (irregular shape) โดยการประมาณให้รูปร่างของอาหารใกล้เคียงกับทรงรี (ellipsoid) ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างง่ายแต่ยังคงมีคำถามถึงความแม่นยำของวิธีการนี้ ข้อกำหนดที่ใช้ในการสร้างสมการนี้มีดังต่อไปนี้คือ

1) สภาวะของสิ่งแวดล้อมต้องคงที่

2) อุณหภูมิเริ่มต้น (T_i) คงที่

3) มีการกำหนดอุณหภูมิสุด (T_c) ท้ายไว้

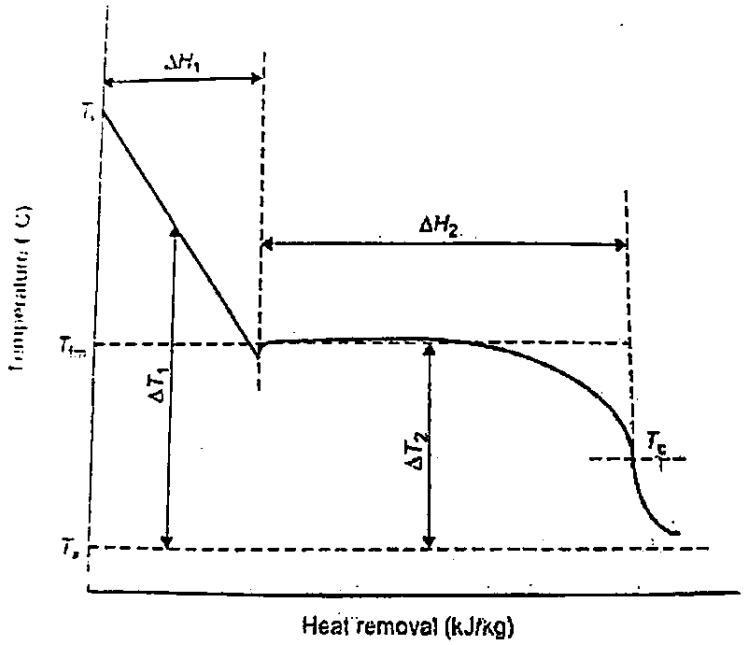
4) การถ่ายเทความร้อนแบบการพาที่ผิวของอาหารเป็นไปตามกฎของนิวตันที่ว่าด้วยการทำเย็น (Newton's law of cooling)

เมื่อพิจาณาแผนภาพการแช่แข็งอาหาร ดังแสดงในภาพที่ 4.11 จะใช้อุณหภูมิแช่แข็งเฉลี่ย (mean freezing temperature; T_{fm}) ในการแบ่งแผนภาพออกเป็น 2 ส่วน และสามารถคำนวณค่า T_{fm} ได้ดังต่อไปนี้ ซึ่งสมการนี้เหมาะสำหรับอาหารที่มีความชื้นสูง

$$T_{fm} = 1.8 + 0.263T_c + 0.105T_a$$

เมื่อ T_c คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่จุดกึ่งกลาง (°C)

T_a คือ อุณหภูมิสารทำความ (°C)



ภาพที่ 4.11 แผนภาพการแช่แข็งอาหารตามวิธีของ Pham

ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 541)

สามารถคำนวณเวลาในการแช่แข็งอาหารที่มีรูปร่างทั่วๆไป จากสมการต่อไปนี้

$$t = \frac{d_c}{E_f h}\left[\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2}\right]\left(1 + \frac{N_{Bi}}{2}\right)$$

เมื่อ d_c คือ มิติทางกายภาพ เช่น ความยาวที่สั้นที่สุดเข้าสู่ศูนย์กลาง เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

E_f คือ ค่าคงที่ของรูปทรงโดยที่ $E_f = 1$ (infinite slab); $E_f = 2$ (infinite cylinder); $E_f = 3$ (sphere)

ΔH_1 คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีสำหรับช่วง precooling

$$\Delta H_1 = \rho_u c_u (T_i - T_{fm})$$

เมื่อ c_u คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุที่ไม่แข็งตัว (J/[kg•K])

T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)

ΔH_2 คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีสำหรับช่วง post cooling

$$\Delta H_2 = \rho_F [L_f + C_f (T_{fm} - T_c)]$$

เมื่อ C_f คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุที่ไม่แข็งตัว (J/[kg•K])

L_f คือ ความร้อนแฝงของการละลายของอาหาร (J/kg)

ρ คือ ความหนาแน่นของอาหาร

ΔT_1 และ ΔT_2 คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ สามารถหาได้ดังนี้

$$\Delta T_1 = \left(\frac{T_i + T_{fm}}{2}\right) - T_a$$

$$\Delta T_2 = T_{fm} - T_a$$

ตัวอย่างที่ 4.4

ลงคำนวณเวลาในการแช่แข็งในตัวอย่างที่ 4.1 โดยใช้วิธีของ Pham กำหนดข้อมูลเพิ่มเติมให้ดังนี้ อุณหภูมิสุดท้ายที่จุดกึ่งกลาง เท่ากับ -18 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของอาหารที่ยังไม่แข็งตัว 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรความหนาแน่นของอาหารที่แข็งตัวแล้ว 950 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรปริมาณความชื้นในอาหาร 75 เปอร์เซ็นต์ความร้อนจำเพาะของอาหารที่ไม่แข็งตัว 3.6 kJ/kg•K และค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่แข็งตัว 1.8 kJ/kg•K

วิธีทำ 1) ใช้สมการในการหาค่า T_{fm}

$$T_{fm} = 1.8 + 0.263T_c + 0.105T_a$$
$$= 1.8 + 0.263(-18) + 0.105(-40)$$
$$= -7.134°C$$

2) ใช้สมการในการหาค่า ΔH_1

$$\Delta H_1 = 1{,}000[kg/m^3] \times 3.6[kJ/kg\ K] \times 1{,}000[J/kJ) \times (10-(-7.134))[°C]$$
$$= 61{,}682{,}400\ J/m^3$$

3) ใช้สมการในการหาค่า ΔH_2

$$\Delta H_2 = 950[kg/m^3] \times [(0.75 \times 333.2\ [KJ/kg] \times 1{,}000[J/kJ])] + [(1.8[kJ/kg\ K] \times 1{,}000[J/kJ) \times (-7.134-(-18))[°C])]$$
$$= 255{,}985{,}860\ J/m^3$$

4) ใช้สมการในการหาค่า ΔT_1

$$\Delta T_1 = \frac{10+(-7.134)}{2} - (-40) = 41.43°C$$

5) ใช้สมการในการหาค่า ΔT_2

$$\Delta T_1 = -7.134-(40) = 32.87°C$$

6) คำนวณค่า N_{Bi}

$$N_{Bi} = \frac{50[W/m^2 \cdot K] \times 0.035[m]}{1.2[W/m \cdot K]} = 1.46$$

7) แทนค่าทั้งหมดในสมการ โดยให้ $E_f = 3$

$$t = \frac{0.035[m]}{3 \times 50[W/m^2 \cdot K]} \left[\frac{61{,}682{,}400[J/m^3]}{41.43°C} + \frac{255{,}985{,}860[J/m^3]}{32.87°C}\right]\left(1+\frac{1.46}{2}\right)$$

t = 3,745.06 s = 1.04 h

จะเห็นได้ว่าเวลาการแช่แข็งที่ได้จากการทำนายด้วยสมการของแพลงค์ ซึ่งมีค่า เท่ากับ 0.75 ชั่วโมงแต่เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธีของ Phamต้องใช้เวลาถึง 1.04 ชั่วโมงเนื่องจากสมการของแพลงค์ไม่ได้คำนึงถึงเวลาในการดึงความร้อนออกในช่วงก่อนและหลังการแช่แข็งนั่นเอง

2.2 สมการของ Nagaoka (Nagaoka's method)

Nagaoka และคณะ (1955) ได้ทำการดัดแปลงสมการของแพลงค์ โดยอาศัยการทดลองมาปรับใช้ ได้เป็นสมการแช่แข็งปลาสดดังนี้

$$t_f = \frac{\rho \Delta H'}{T_F - T_a}\left[\frac{P_a}{h_s} + \frac{R_a^2}{k}\right]$$

เมื่อ $\Delta H' = [1 + 0.00445(T_i - T_F)][C_{pU}(T_i - T_F) + L + C_{pl}(T_F - T)]$

จะเห็นได้ว่าสมการของ Nagaoka แม้จะคำนึงถึงความร้อนสัมผัสที่เหนือและต่ำกว่าจุดเยือกแข็งเริ่มต้นก็ตาม แต่ก็ยังสมมุติว่าความร้อนแฝงที่ถูกกำจัดทั้งหมดเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิคงที่ (T_F)

ตัวอย่างที่ 4.5

ให้เปรียบเทียบเวลาการแช่แข็งของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีสภาวะต่างๆดังตัวอย่างที่ 4r.3 โดยใช้สมการของ Nagaoka

วิธีทำ ใช้ค่าต่างๆ จากตัวอย่างที่ 4.3 และข้อมูลต่อไปนี้

C_{pU} = 3.52 kJ/kg•K (จากตารางในภาคผนวก ตารางที่ 21)

C_{pl} = 2.05 kJ/kg•K (จากตารางในภาคผนวก ตารางที่ 22)

k_l = 1.108 W/m•K

ดังนั้น $\Delta H'$ = $[1 + 0.00445(5 - (-1.75)][3.52(5 - (-1.75) + 248.25 + 2.05(-1.75 - (-10)]$

= 297.59 kJ/kg

แทนค่าในสมการ

$$t_F = \frac{(1{,}050)(297.59)(1{,}000)}{[-1.75-(-30)][3{,}600]}\left[\frac{0.3\,(0.25)}{30} + \frac{0.085(0.25)^2}{1.108}\right] = 22.41 \text{ h}$$

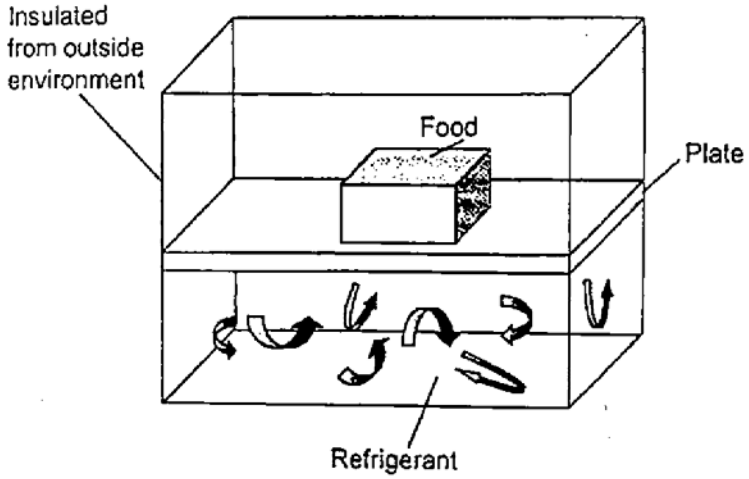
ระบบแช่แข็งและเครื่องแช่แข็ง

เมื่อต้องการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารจำเป็นต้องให้ผลิตภัณฑ์สัมผัสกับตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำช่วงเวลาหนึ่งเพื่อกำจัดความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝงของการหลอมเหลวออกจากผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลง และน้ำภายในอาหารเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง (โดยทั่วไปมักมีน้ำในสถานะของเหลวเหลืออยู่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ณ อุณหภูมิที่เก็บอาหารแช่แข็ง)

กระบวนการแช่แข็งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ การสัมผัสโดยตรง (direct-contact system) และการสัมผัสโดยทางอ้อม (indirect-contact system) การที่จะเลือกใช้ระบบใดนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการแช่แข็ง

1. ระบบการสัมผัสโดยทางอ้อม (indirect-contact system)

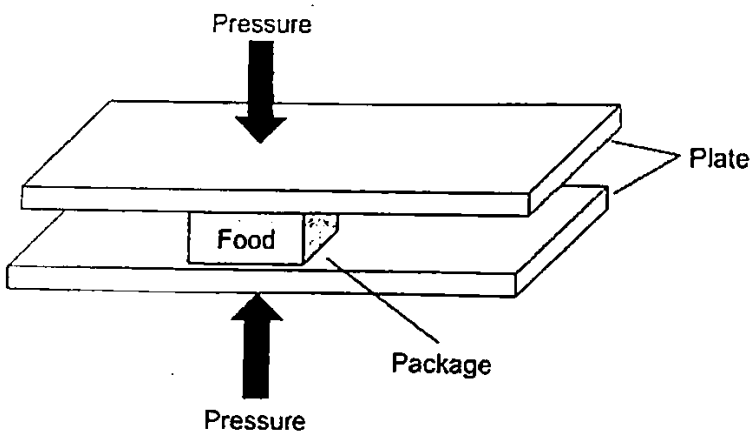
ระบบการแช่แข็งหลายชนิดที่อาหารและสารทำความเย็นถูกแยกออกจากกันโดยตัวกั้นตลอดทั้งกระบวนการแช่แข็ง ดังแสดงในภาพที่ 4.12 ซึ่งตัวกั้นนี้รวมถึงภาชนะบรรจุที่ห่อหุ้มอาหารทำให้ไม่มีการสัมผัสโดยตรงระหว่างอาหารและสารทำความเย็น เครื่องแช่ระบบนี้ได้แก่ เครื่องทำความเย็นแบบแผ่นทำความเย็น เครื่องทำความเย็นแบบใช้ลมเป่า เครื่องแช่แข็งสำหรับอาหารเหลว เป็นต้น



ภาพที่ 4.12 ระบบแช่แข็งแบบสัมผัสทางอ้อม
ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 523)

1.1 เครื่องทำความเย็นแบบแผ่นทำความเย็น (plate freezer)

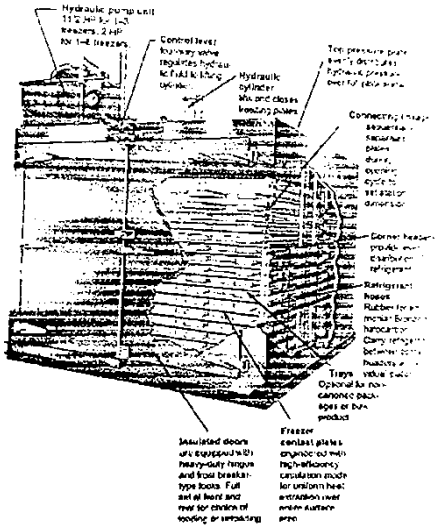
เครื่องแช่แข็งประเภทนี้ประกอบด้วยโลหะหลายๆแผ่นจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ดังแสดง ในภาพที่ 11.13 ผลิตภัณฑ์จะถูกแช่แข็ง ขณะที่วางอยู่ระหว่างแผ่นทำความเย็น 2 แผ่น ซึ่งจะคงอุณหภูมิแช่แข็งที่ต้องการทำให้การแช่แข็งเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยออกแบบให้แผ่นทำความเย็นสัมผัสกับสารทำความเย็นโดยทั่วไปแล้วตัวกั้นอาจจะเป็นแผ่นทำความเย็นอย่างเดียว หรือแผ่นทำความเย็นกับภาชนะบรรจุได้ การถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกั้นสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการใช้ความดัน เพื่อลดความต้านทานการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกั้น ความดันที่ใช้อยู่ระหว่าง 10-30 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ในบางกรณีอาจใช้แผ่นทำความเย็นเพียงแผ่นเดียวที่สัมผัสกับอาหารและถ่ายเทความร้อน ผ่านผิวของภาชนะบรรจุเพียงด้านเดียว ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องจะน้อยกว่าแต่มีข้อดีคือต้นทุนต่ำ



ภาพที่ 4.13 เครื่องแช่แข็งแบบแผ่นทำความเย็น
ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 523)

การแช่แข็งโดยใช้แผ่นทำความเย็นอาจจะทำงานแบบกะ ซึ่งผลิตภัณฑ์จะวางอยู่บนแผ่นทำความเย็นในช่วงเวลาหนึ่งก่อนนำออกจากเครื่อง หรือเรียกว่า residence-time ช่วงเวลานี้คือเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งและเป็นเวลาทั้งหมดที่ใช้ลดอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ไปยังอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการ ซึ่งเป็นระบบการทำงานที่ไม่ต่อเนื่อง มีข้อดีคือสามารถแช่แข็งผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิดและหลายขนาด

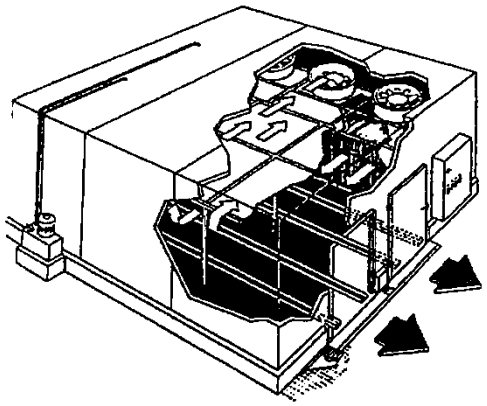
เครื่องแช่แข็งแบบแผ่นทำความเย็นแบบต่อเนื่อง (continuous) โดยเคลื่อนแผ่นทำความเย็นที่มีผลิตภัณฑ์วางอยู่ตลอดเครื่อง ผลิตภัณฑ์จะวางอยู่ระหว่างแผ่นทำความเย็น 2 แผ่น ตลอดทั้งกระบวนการแช่แข็ง แผ่นทำความเย็นจะเปิดให้ผลิตภัณฑ์ส่งเข้าออกจากระบบแช่แข็งที่จุดเข้าและออกจากระบบในระบบต่อเนื่องนี้เวลาที่ใช้ในการแช่แข็งจะเป็นเวลาที่ผลิตภัณฑ์เข้าสู่ระบบจนออกจากระบบ ซึ่งเวลาดังกล่าวนี้ปริมาณความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงจำเป็นต้องถูกกำจัดออกไปเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิถึงจุดเยือกแข็งตามที่ต้องการ ภาพที่ 4.14 แสดงเครื่องแช่แข็งแบบแผ่นชนิดทำงานแบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.14 เครื่องแช่แข็งแบบแผ่นทำความเย็นชนิดทำงานแบบต่อเนื่อง
ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 524)

1.2 เครื่องแช่แข็งแบบลมเป่า (air-blast freezer)

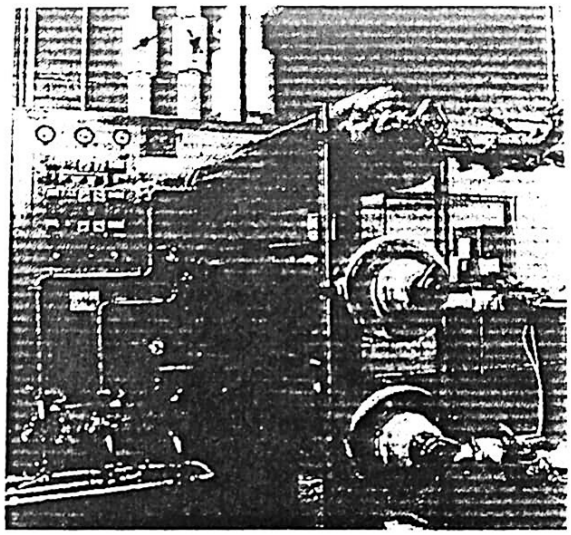
ผลิตภัณฑ์บางชนิดอาจมีขนาดรูปร่างที่ไม่เหมาะสมกับการแช่แข็งแบบแผ่น จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องแช่แข็งแบบลมเป่าซึ่งมีความเหมาะสมกว่าในบางกรณี โดยลมเย็นที่ใช้จะเป็นสารทำความเย็นในระบบ เครื่องแช่แข็งแบบลมเป่าแบบง่ายๆ ได้แก่ ห้องเย็น โดยผลิตภัณฑ์จะวางอยู่ในห้องและอากาศเย็นจะหมุนเวียนอยู่ในห้องรอบๆผลิตภัณฑ์ วิธีนี้จะเป็นแบบกะ เครื่องแช่แข็งแบบนี้จะใช้เวลานานมาก เนื่องจากอากาศที่พัดผ่านอาหารนั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ การสัมผัสระหว่างผลิตภัณฑ์และอากาศเย็นยังไม่มีการสัมผัสที่ดีพอ ภาพที่ 4.15 แสดงเครื่องแช่แข็งแบบต่อเนื่องซึ่งผลิตภัณฑ์จะวางอยู่บนสายพานเคลื่อนที่ผ่านกระแสลมเย็นอุณหภูมิประมาณ -20 ถึง -40 องศาเซลเซียส ที่มีความเร็วของกระแสลมสูงมาก ความเร็วและความยาวของสายพานจะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง ซึ่งจะใช้เวลาที่สั้นมากเมื่อใช้ลมที่มีอุณหภูมิต่ำและความเร็วที่สูงมาก



ภาพที่ 4.15 เครื่องแช่แข็งแบบลมเป่าชนิดการทำงานแบบต่อเนื่อง
ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 525)

1.3 เครื่องแช่แข็งอาหารเหลว (liquid food freezer)

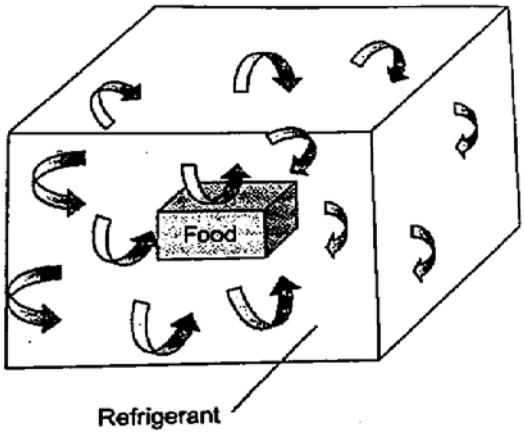
เครื่องแช่แข็งชนิดนี้ออกแบบสำหรับอาหารเหลวโดยเฉพาะ โดยทั่วไปการกำจัดความร้อนออกจากอาหารเหลวที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือกระทำก่อนที่อาหารจะถูกบรรจุในภาชนะ ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่นิยมมากที่สุดคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีมีดขูดผิว (scraped surface system) เมื่อทำการแช่แข็งอาหารเหลวเวลาที่ใช้ในส่วนของการแช่แข็งจะต้องเพียงพอที่จะลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่จะเกิดผลึกน้ำแข็งเริ่มแรกหลายองศา ที่อุณหภูมิเหล่านี้ ความร้อนแฝงประมาณ 60-80 เปอร์เซ็นต์ จะถูกกำจัดออกจากผลิตภัณฑ์และทำให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปที่เป็นของเหลวกึ่งแข็ง (frozen slurry) ซึ่งไหลง่ายและส่งเข้าสู่ภาชนะบรรจุเพื่อทำการแช่แข็งในขั้นตอนสุดท้ายในห้องแช่แข็ง ระบบการแช่แข็งสำหรับอาหารเหลวอาจเป็นได้ทั้งระบบต่อเนื่องและแบบกะ ในระบบแบบกะนั้นจะให้ของเหลวที่ยังไม่แข็งตัวปริมาณหนึ่งอยู่ในห้องซึ่งจะมี กระบวนการแช่แข็งต่อไปจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ ภาพที่ 4.16 แสดงระบบการแช่แข็งอาหารเหลวแบบต่อเนื่อง โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีใบมีดขุดผิวที่ใช้สารทำความเย็นเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพที่ 4.16 เครื่องแช่แข็งอาหารเหลวแบบต่อเนื่อง
ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 527)

2. ระบบสัมผัสโดยตรง (direct-contact system)

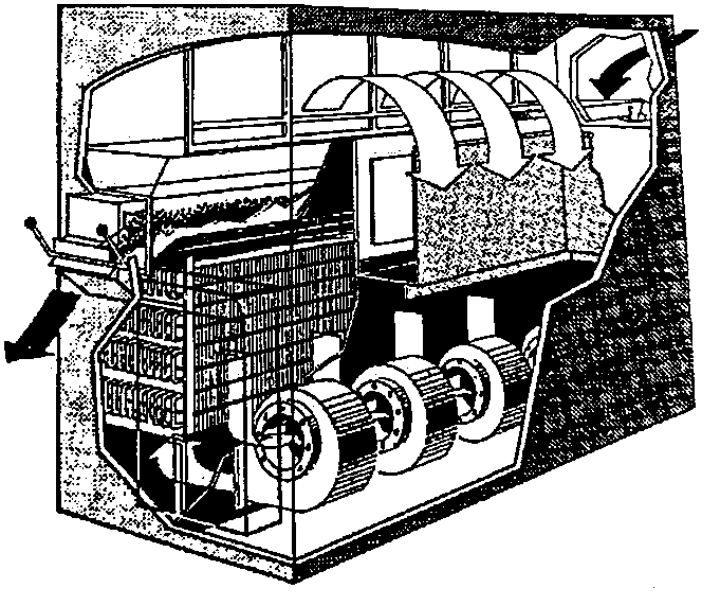
ระบบการแช่แข็งแบบสัมผัสโดยตรงแสดงในภาพที่ 4.17 ซึ่งเป็นระบบที่อาหารสัมผัสกับสารทำความเย็นโดยตรง เป็นระบบการทำงานที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากไม่มีตัวกั้นการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและผลิตภัณฑ์ สารทำความเย็นในระบบนี้อาจเป็นลมเย็นอุณหภูมิต่ำมากที่มีความเร็วสูง หรือสารทำความเย็นที่เป็นของเหลว ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเมื่อสัมผัสกับอาหาร ระบบการแช่แข็งแบบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการแช่แข็งอย่างรวดเร็ว (rapid freezing) หรือที่เรียกกันว่า individual quick freezing : IQF



ภาพที่ 4.17 ระบบการแช่แข็งแบบสัมผัสโดยตรง
ที่มา : Singh uas Heldman (2014, p. 528)

2.1 การใช้ลมเป่า (air blast)

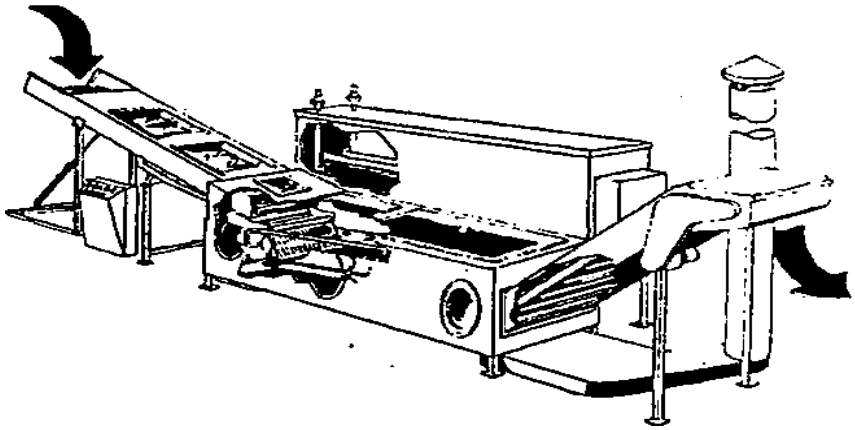
การใช้ลมเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำและความเร็วสูงสัมผัสกับอาหารขนาดเล็ก เป็นลักษณะหนึ่งของการให้ความเย็นแบบ IQF เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงทำให้ใช้เวลาสั้นในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์ ภาพที่ 4.18 แสดงเครื่องแช่แข็งแบบฟลูอิไดเบด



ภาพที่ 4.18 เครื่องแช่แข็งแบบฟลูอิไดเบด
ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 529)

2.2 การจุ่ม (immersion)

อุณหภูมิที่ผิวผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างมากเมื่อจุ่มผลิตภัณฑ์อาหารลงในสารทำความเย็นเหลว ถ้าผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กมาก กระบวนการแช่แข็งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหรือเกิดขึ้นใต้สภาวะ IQF ภาพที่ 4.19 แสดงระบบการแช่แข็งแบบ IQF แบบจุ่มที่ใช้ในอุตสาหกรรม ข้อเสียของระบบนี้คือราคาสารทำความเย็นสูง



ภาพที่ 4.19 เครื่องแช่แข็ง IQF แบบจุ่ม
ที่มา : Singh และ Heldman (2014, p. 530)

บทสรุป

การแช่เยือกแข็ง เป็นกรรมวิธีการแปรรูปอาหารเพื่อถนอมอาหารด้วยการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่า -18 องศาเซลเซียส น้ำในอาหารจะเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง เป็นกรรมวิธีการถนอมอาหารที่คงความสดและรักษาคุณภาพอาหารได้ดีกว่าการถนอมอาหารด้วยวิธีอื่น ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งมีหลากหลายรูปแบบและใช้ได้ดีกับอาหารแทบทุกชนิด เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ หรืออาหารที่ผ่านการปรุงสุกเพื่อเป็นอาหารพร้อมรับประทาน เช่น ติ่มซำ ผลิตภัณฑ์ไก่แปรรูป การแช่เยือกแข็งสามารถใช้ร่วมกับกรรมวิธีการแปรรูปอาหารวิธีอื่น เช่น การพาสเจอร์ไรซ์ การทำให้เข้มข้น การฉายรังสี การหมัก เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหารให้ยาวขึ้น การแช่เยือกแข็งไม่ได้เป็นกรรมวิธีที่มุ่งทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียและจุลินทรีย์ก่อโรค แต่เป็นการใช้อุณหภูมิต่ำเพื่อยับยั้งการเพิ่มจำนวน ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า -18 องศาเซลเซียสตลอดเวลา เพื่อรักษาคุณภาพ ป้องกันการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ และป้องกันการเกิดผลึกใหม่ของน้ำแข็ง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมคุณภาพ

เอกสารอ้างอิง

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2535. วิศวกรรมแปรรูปอาหาร : การถนอมอาหาร. โอ.เอส.พริ้นติ้ง เฮ้าส์ : กรุงเทพมหานคร.

Fenema, O. and Powrie, W.D. 1964 Fundamental of low temperature food preservation. Advance Food Research. 13: 219-347.

Singh, R. P. and Heldman, D. R. 2014. Introduction to Food Engineering (5rd, Eds.). Academic Press, New York.