

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนความร้อนของอาหาร
ขณะแช่แข็งด้วยระบบไครโอแมคคานิค

**Improvement of Heat Transfer Model for Cryomechanical
Freezing of Food Material**

เสนอ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

หัวหน้าโครงการ

นายชัยรัตน์ ตั้งดวงดี

มิถุนายน 2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การถ่ายโอนความร้อนระหว่างการแช่เยือกแข็งอาหารแบบโครโอแมคคานิค ซึ่งเป็นการแช่แข็งที่รวมเอาวิธีการแช่เยือกแข็งแบบโครโอจินิกและการแช่เยือกแข็งแบบเชิงกลมาประกอบกัน สมการการนำความร้อนแบบไฮเพอร์โบลิก ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายการถ่ายโอนความร้อนระหว่างการแช่เยือกแข็งแบบโครโอจินิก ซึ่งใช้ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของตัวอย่างที่มีความหนาแน่นในการหาการกระจายของอุณหภูมิ ในขณะที่ขั้นตอนการแช่เยือกแข็งแบบเชิงกลใช้สมการการนำความร้อนแบบพาราโบลิก โดยใช้โปรแกรม MATLABTM ในการคำนวณผลการแช่แข็งทั้งสองขั้นตอน เมื่อสังเกตอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งผิวของตัวอย่างที่ได้จากแบบจำลองพบว่า อุณหภูมิลดลงทันทีที่ตัวอย่างถูกจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวด้วยอัตราที่สูงกว่าผลการทดลองที่วัดได้เฉพาะอุณหภูมิใกล้ผิว แต่อย่างไรก็ตาม ผลจากการทำนายอุณหภูมิที่ตำแหน่งอื่นๆ ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ ยังพบว่า การใช้ค่าสมบัติทางความร้อนที่ดัดแปลงจากทฤษฎีสถานะทำให้ผลการทำนายอุณหภูมิสอดคล้องกับการทดลองมากกว่าการใช้ค่าสมบัติทางความร้อนที่ได้จากกระบวนการให้ความร้อน

คำสำคัญ: การแช่เยือกแข็งแบบโครโอแมคคานิค / การแช่เยือกแข็ง / การจำลองกระบวนการ / สมการการนำความร้อนแบบไฮเพอร์โบลิก

Abstract

The objective of this work was to improve the existing mathematical model of heat transfer during cryomechanical freezing, which is a combination of cryogenic and air-blast freezing. An analytical solution of the hyperbolic heat conduction equation for a semi-infinite slab was used to simulate the temperature profile during the cryogenic stage, whereas the classical Fourier's equation was applied for the mechanical freezing stage. The problem was numerically solved using MATLABTM program. Step change of the surface temperature as soon as the sample was immersed in liquid nitrogen was attained, but could not observe from the experiment from which only the near surface was measured. However, the predicted temperature profiles at any locations had a good agreement with the experimental data available in the literature. In addition, the effect of heat capacity on the prediction was examined and found that the correlation obtained from theoretical adiabatic calorimetry of cooling process gave better results than that from the heating process, especially during the phase change period.

Keywords: Cryomechanical freezing / Freezing / Simulation / Hyperbolic heat conduction

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

สารบัญเรื่อง

บทคัดย่อ	ก
Abstract.....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง.....	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.2 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและการสำรวจเอกสาร	3
2.1 กระบวนการแช่แข็ง.....	3
2.2 ชนิดของเครื่องแช่แข็ง.....	6
2.3 สมการการนำความร้อนแบบไฮเพอร์โบลิก	10
2.4 การหาคำตอบด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม	12
2.5 วิธีปริมาตรควบคุม	14
บทที่ 3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	15
3.1 สมมติฐาน	16
3.2 ช่วงไครโอจินิก	16
3.3 ช่วงการแช่แข็งแบบเชิงกล	19
3.4 อัลกอริทึมสำหรับหาคำตอบของแบบจำลอง	22
3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง	23

บทที่ 4 วัสดุและวิธีการดำเนินการทดลอง	25
4.1 วัสดุดิบ	23
4.2 วิธีการดำเนินการทดลอง	23
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง	27
5.1 การหาจำนวนพจน์ที่เหมาะสมในการการอินทิเกรตเชิงวิเคราะห์	
สำหรับการหาค่าตอบแบบไฮเพอร์โบลิก	27
5.2 การหาเงื่อนไขเสถียรภาพ	29
5.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนระหว่างการแช่เยือกแข็ง	27
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	34
เอกสารอ้างอิง	36
ภาคผนวก	38

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	การเปรียบเทียบวิธีการแข่งขันต่างๆ	7
ตารางที่ 2.2	สมบัติของสารไครโอเจน	9
ตารางที่ 5.1	เวลาที่ใช้สำหรับจำนวนพจน์ในการอินทิเกรต.....	28

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	เส้นแสดงอุณหภูมิ-เวลาขณะแช่แข็งของระบบสารละลายทั่วไป	3
รูปที่ 3.1	ไออะแกรมของอาหารรูปทรงแผ่นราบ	15
รูปที่ 3.2	ปริมาตรควบคุมสำหรับการถ่ายโอนความร้อนในมิติเดียวของวัสดุแผ่นราบ.....	20
รูปที่ 3.3	อัลกอริทึมของการคำนวณแบบจำลอง.....	22
รูปที่ 4.1	ตะกร้าสแตนเลส	25
รูปที่ 4.2	ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	26
รูปที่ 5.1	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวไร้นหน่วยที่คำนวณจากจำนวนพจน์ที่แตกต่างกัน และจากงานวิจัยที่ผ่านมา	28
รูปที่ 5.2	เปรียบเทียบการจำลองอุณหภูมิใจกลางด้วยค่าเกณฑ์เสถียรภาพค่าต่าง ๆ	29
รูปที่ 5.3	อุณหภูมิใจกลางตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง (Lan และ Farid, 2004) และการทำนาย ของตัวอย่างที่หนา 1 cm โดยจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 วินาที ตามด้วยจุ่มลงใน น้ำเกลือ โดยใช้ค่าความจุความร้อนโดยรวมของ Tocci และคณะ (1997)	30
รูปที่ 5.4	เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนโดยรวมที่ได้จาก Tocci และคณะ(1997) และ Schwartzberg (1976).....	31
รูปที่ 5.5	อุณหภูมิใจกลางตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง (Lan และ Farid, 2004) และการทำนาย ของตัวอย่างที่หนา 1 cm โดยจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 วินาที ตามด้วยจุ่มลงใน น้ำเกลือ โดยใช้ค่าความจุความร้อนโดยรวมของ Schwartzberg (1978)	31
รูปที่ 5.6	อุณหภูมิใกล้ผิวตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง (Lan และ Farid, 2004) และการทำนายของ ตัวอย่างที่หนา 1 cm โดยจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 วินาที ตามด้วยจุ่มลงในน้ำเกลือ.....	32
รูปที่ 5.7	อุณหภูมิลึกจากผิวตัวอย่าง 3 mm ที่ได้จากผลการทดลอง (Lan และ Farid, 2004) และการทำนายของตัวอย่างที่หนา 1 cm โดยจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 วินาที ตามด้วยจุ่มลงในน้ำเกลือ.....	33

บทที่ 1

บทนำ

การแช่เยือกแข็ง เป็นวิธีการถนอมอาหาร โดยการใช้อุณหภูมิต่ำเพื่อยับยั้งการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์และเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีของอาหาร เช่น การทำงานของเอนไซม์ และปฏิกิริยาทางเคมีที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมคุณภาพของอาหาร วิธีแช่เยือกแข็งที่มีในอุตสาหกรรมอาหารมีหลายระบบ เช่น การแช่เยือกแข็งแบบเป่าลมเย็น (Air-blast freezing) การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก (Cryogenic Freezing) เป็นต้น ความแตกต่างที่สำคัญของการแช่แข็งแต่ละวิธี คือ อัตราการแช่แข็ง ซึ่งเป็นที่ทราบว่ามีผลโดยตรงต่อคุณภาพของอาหารแช่แข็ง กล่าวคือ การแช่แข็งอย่างรวดเร็วจะทำให้ได้ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก ในขณะที่การแช่แข็งอย่างช้าๆ จะทำให้ได้ผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ที่สามารถทำลายโครงสร้างของเซลล์ ทำให้เนื้อสัมผัสเสียไป นอกจากนี้ การแช่เยือกแข็งแบบเป่าลมเย็นแม้จะมีอัตราการแช่แข็งที่ต่ำกว่า เพราะใช้เวลานาน แต่สามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ในขณะที่ การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกแม้จะใช้เวลานาน สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักได้ แต่มีต้นทุนของสารทำความเย็นที่ราคาค่อนข้างแพง ดังนั้น จึงเกิดแนวคิดที่จะรวมข้อดีของทั้งสองวิธีเข้าด้วยกัน คือ การลดเวลาแช่แข็งและลดการสูญเสียน้ำหนัก เรียกเทคนิคนี้ว่า การแช่เยือกแข็งแบบไครโอแมคคานิก (Cryomechanical Freezing) ข้อดีอีกประการหนึ่งของวิธีนี้คือ การเพิ่มกำลังการผลิตโดยมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก (Agnelli และ Mascheroni, 2001) กระบวนการประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกซึ่งเป็นการทำให้อาหารสัมผัสโดยตรงกับสารไครโอเจนโดยการจุ่มหรือสเปรย์ ก่อนนำอาหารไปแช่เยือกแข็งต่อในเครื่องแช่เยือกแข็งเชิงกล การผสมผสานข้อดีของระบบไครโอจินิก และการแช่เยือกแข็งเชิงกล เข้าด้วยกันจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแช่เยือกแข็งอาหารทอดที่มีอุณหภูมิสูง การลดอุณหภูมิอาหารก่อนนำเข้าเครื่องแช่แข็งเชิงกล (Mechanical Freezing) จึงเป็นการลดภาระของเครื่องและเพิ่มกำลังการผลิต

การออกแบบกระบวนการผลิตจำเป็นต้องทำนายโปรไฟล์อุณหภูมิและเวลาการแช่เยือกแข็งทั้งหมด ที่ขณะที่มีการถ่ายโอนความร้อน ทั้งนี้การแช่เยือกแข็งแบบไครโอแมคคานิกมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงที่อุณหภูมิต่ำมากในช่วงแรก ส่งผลให้การติดตามปรากฏการณ์ถ่ายเทความร้อนนั้นยุ่งยากซับซ้อน Jumras (2002) ศึกษาการแช่แข็งซาลาเปาขนาด 70 กรัม พบว่า การจุ่มตัวอย่างลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 80 วินาทีก่อนการแช่แข็งต่อด้วยเครื่องแช่แข็งแบบเป่าลมเย็น ส่งผลให้เวลาในการแช่แข็งทั้งหมดลดลง 36% และจำลองการถ่ายโอนความร้อนภายในอาหารด้วยสมการฟูเรียร์ (Fourier's equation) และแก้สมการด้วย FEMLAB[®] หาคำตอบด้วยวิธี Finite Element แต่คำตอบกลับลู่ออก (Divergence) ในช่วงการแช่แข็งแบบไครโอจินิก ไม่สามารถหาคำตอบได้ Agnelli และ Mascheroni (2001) จำลองการถ่ายโอนความร้อนของการแช่เยือกแข็งแบบไครโอแมคคานิกผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และแก้คำตอบเชิงแบบตัวเลขด้วยวิธีเอนทัลปี อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่แสดงอุณหภูมิของสถานะขอบที่เป็นไนโตรเจนเหลว Leeratanarak และคณะ

(2004) ยืนยันผลการทดลองของ Agnelli และ Mascheroni (2001) โดยจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี เอนทัลปีและใช้อุณหภูมิสถานะขอบเป็น -40°C ทั้งสองช่วงของการแช่แข็งซึ่งสามารถหาคำตอบได้ สอดคล้องกับผลการทดลอง และไม่สามารถหาคำตอบได้เมื่อใช้อุณหภูมิในโตรเจนเหลวเท่ากับ -196°C จาก งานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ในช่วงการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกยังมีข้อ สงสัย ดังนั้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนความร้อนของ อาหารขณะแช่แข็งด้วยระบบไครโอแมคคานิค

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนความร้อนของอาหารขณะแช่แข็งด้วยระบบไครโอแมคคานิค

1.2 ขอบเขตของการวิจัย

1.2.1 เน้นปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนความร้อนในช่วงไครโอจินิก

1.2.2 สมบัติทางกายภาพและความร้อน (thermophysical properties) ของอาหารอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.3 ทดสอบแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการสำรวจเอกสาร

1.2.4 เวลาระหว่างการเคลื่อนย้ายจากช่วงไครโอจินิกไปยังช่วงแช่เยือกแข็งแบบเชิงกลสั้นมาก สามารถตัดทิ้งได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

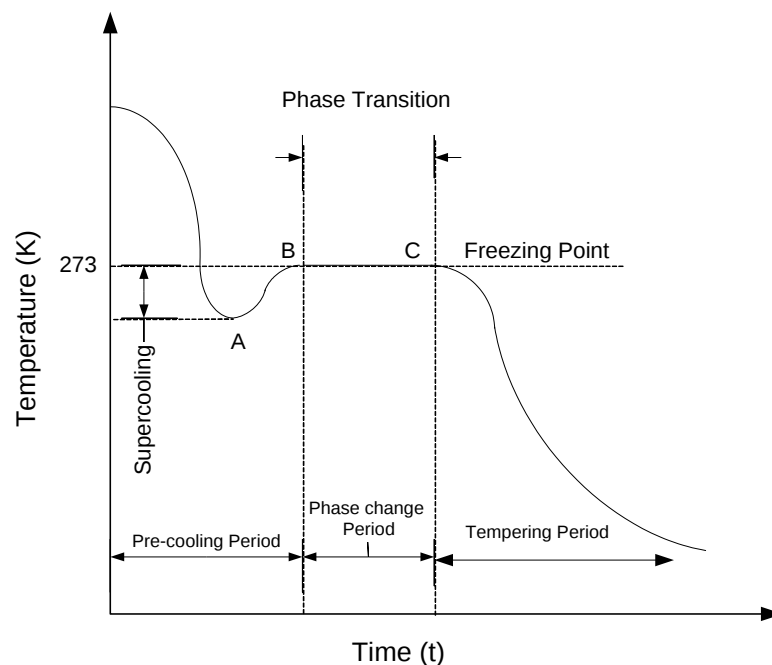
สามารถใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและเข้าใจถึงกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบไครโอแมคคานิค

บทที่ 2

ทฤษฎีและการสำรวจเอกสาร

2.1 กระบวนการแช่แข็ง

การแช่แข็ง (Freezing) เป็นวิธีการถนอมอาหารโดยลดอุณหภูมิให้น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง เพื่อยับยั้งและชะลอปฏิกิริยาเคมีและเอนไซม์ โดยให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -10°C สามารถยับยั้งกิจกรรมต่างๆ ของเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้มีผลต่อการถนอมอาหาร ในกระบวนการแช่แข็งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะ ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นแสดงอุณหภูมิ-เวลาขณะแช่แข็งของระบบสารละลายทั่วไป

ระยะที่ 1 เป็นการลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงจุดเยือกแข็งของอาหาร เรียกช่วงนี้ว่า Pre-cooling Period ความร้อนที่ถูกดึงออกเป็นความร้อนสัมผัส (Sensible Energy) จนถึงจุด A ซึ่งต่ำกว่าจุดเยือกแข็งแต่น้ำยังอยู่ในสถานะเป็นของเหลว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า *Supercooling* หลังจากนั้นอุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วไปที่จุดเยือกแข็ง น้ำเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งและคายความร้อนแฝงออกมา เข้าสู่ระยะที่ 2 เป็นช่วงที่น้ำส่วนใหญ่และตัวถูกละลายบางชนิดมีการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง เรียกว่า Phase Change Period ระยะนี้ ความร้อนสัมผัสบางส่วนและความร้อนแฝงจะถูกดึงออกจากระบบอาหาร และระยะที่ 3 เป็นการลด

อุณหภูมิจากจุดเยือกแข็งไปจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งความร้อนสัมผัสจะถูกดึงออกอีกครั้ง เรียกช่วงนี้ว่า Tempering Period ซึ่งโดยทั่วไปจะลดอุณหภูมิถึง -18°C หรือต่ำกว่า ขึ้นกับระยะเวลาที่ต้องการเก็บรักษา (Bald, 1991)

ปรากฏการณ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกิดขึ้นขณะมีการเปลี่ยนสถานะ ได้แก่ การเย็นตัวรวดเร็ว (Super cooling) และการตกผลึก (Crystallization) การเกิดผลึกน้ำแข็งมี 2 ขั้นตอน คือ การก่อตัวของผลึก (Nucleation) และการเจริญของผลึกน้ำแข็ง (Crystal Growth) ส่วนการเย็นตัวรวดเร็ว เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดต่ำกว่าจุดเยือกแข็งแต่ยังไม่มีผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้น ปริมาณความร้อนที่ถูกดึงออกในช่วงการเย็นตัวรวดเร็วจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการก่อตัวของผลึกน้ำแข็ง ปริมาณของผลึก และขนาดของผลึก เริ่มต้น ขั้นตอนของการก่อตัวของผลึกเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการแช่แข็งและเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด ที่มีผลต่อการเติบโตของผลึกและปริมาณของผลึกน้ำแข็ง

ขั้นตอนการก่อตัวของผลึก (Nucleation) เป็นการเกิดนิวคลีโอไที่เสถียรและเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการก่อตัวของผลึกมี 2 แบบ คือ การก่อตัวแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation) และ การก่อตัวแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Nucleation) การก่อตัวของผลึกแบบเอกพันธ์จะเกิดขึ้นในสารบริสุทธิ์ การแกว่งตัวของค่าความหนาแน่นแบบสุ่มในเฟสของเหลวทำให้เกิดนิวคลีโอ ส่วนการก่อตัวของผลึกแบบวิวิธพันธ์จะเกิดกับระบบต่างๆ ไป ซึ่งมีอนุภาคของสิ่งแปลกปลอม (Impurity) และอื่นๆ เป็นนิวคลีโอ ซึ่งจะก่อให้เกิดอนุภาคอื่นๆ มารวมตัวกันและทำให้ผลึกโตขึ้น ดังนั้น ผลึกของระบบเช่นนี้ จึงมีขนาดและตำแหน่งที่ไม่สม่ำเสมอ การก่อตัวของผลึกและลักษณะของผลึกมีความสัมพันธ์กับอัตราการแช่แข็ง อัตราการก่อตัวของผลึกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิหลังการเย็นตัวรวดเร็วลดลง

เมื่อเกิดนิวคลีโอขึ้น โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่จากเฟสของเหลวไปจับกับผิวของผลึกในตำแหน่งที่ทำให้ผลึกเสถียรและทำให้ผลึกโตขึ้น ซึ่งขั้นตอนที่ 2 ของกระบวนการตกผลึก กระบวนการในช่วงนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดเยือกแข็ง อัตราการเจริญของผลึกจะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำๆ ที่อุณหภูมิต่ำๆ น้ำส่วนใหญ่จะกลายเป็นน้ำแข็ง และอัตราการเจริญของผลึกก็เริ่มลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก การแพร่ของน้ำของจากเซลล์ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูงขึ้น จนทำให้ความหนืดของสารละลายสูงขึ้น อันเป็นสาเหตุทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้อัตราการเติบโตของผลึกช้าลง แต่อย่างไรก็ตาม การเติบโตของผลึกน้ำแข็งขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง อาทิเช่น อัตราการทำปฏิกิริยาของโมเลกุลน้ำบนผิวของผลึก อัตราการแพร่ของน้ำจากสารละลายไปยังผิวของผลึก และอัตราการดึงเอาความร้อนออกจากระบบ

คุณภาพของอาหารได้รับผลกระทบจาก ขนาด ตำแหน่งและจำนวนผลึกน้ำแข็ง เพราะขนาดและตำแหน่งของผลึกน้ำแข็งที่ไม่เหมาะสมอาจทำลายโครงสร้างทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีอันไม่พึงประสงค์ของอาหารแช่แข็งล้วนมีสาเหตุมาจากการเกิดผลึกของน้ำและตัวถูกละลายบางชนิด อัตราการแช่แข็งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบโดยตรงต่อลักษณะของผลึกน้ำแข็ง การลดเวลาในช่วง

การเปลี่ยนสถานะให้สั้นที่สุดจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี การแช่แข็งอย่างรวดเร็ว (Rapid Freezing) ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กสม่ำเสมอจำนวนมาก ในทางตรงกันข้าม จำนวนนิวคลีโอที่น้อยจะก่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์แช่แข็ง เนื่องจากโครงสร้างของอาหารเสียหาย นอกจากนั้น การแช่แข็งอย่างรวดเร็วผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นภายในเซลล์ (Intracellular region) ในขณะที่การแช่แข็งอย่างช้าๆ (Slow Freezing) ผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ (Extracellular region) ส่งผลให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสที่ไม่แข็งตัวจะสูงขึ้น น้ำภายในเซลล์ก็จะแพร่ออกมาภายนอก ทำให้เกิดการสูญเสียของน้ำภายในเซลล์ การลดการสูญเสียภายในเซลล์ทำได้โดยการแช่แข็งอย่างรวดเร็ว

นิยามของศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการแช่แข็งที่สำคัญ คือ เวลาการแช่แข็ง (Freezing Time) และอัตราการแช่แข็ง (Freezing Rate) ซึ่งมีนิยามที่แตกต่างกัน ดังนี้ (Ramaswamy และ Marcotte, 2006)

1. เวลาการแช่แข็ง คือ เวลารวมทั้งหมดนับตั้งแต่เริ่มแช่แข็งจนเสร็จสิ้นกระบวนการ ด้วยนิยามนี้ เวลาการแช่แข็งจะขึ้นกับอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารก่อนแช่แข็งและอุณหภูมิสุดท้ายหลังการแช่แข็ง
2. เวลาการแช่แข็ง คือ เวลาที่ใช้ นับตั้งแต่เริ่มต้นไปจนถึงอุณหภูมิเป้าหมาย เช่น -10°C หรือ -18°C นิยามนี้เป็นกำหนดจุดสิ้นสุดกระบวนการ ดังนั้น เวลาการแช่แข็งจะขึ้นกับอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการแช่แข็ง
3. เวลาการแช่แข็ง คือ เวลาที่นับตั้งแต่อาหารมีอุณหภูมิ 0°C ไปจนกระทั่งอุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการ เช่น -10°C หรือ -18°C ซึ่งเป็นการกำหนดจุดเริ่มและสิ้นสุด บางครั้งอาจกำหนดโดยนับเวลาจากที่อุณหภูมิผิวของอาหารถึงจุดเยือกแข็งไปจนกระทั่งอุณหภูมิใจกลางต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง 10°C ด้วยนิยามเช่นนี้ เวลาการแช่แข็งเป็นการกำหนดเวลาเฉพาะในช่วงกลางของกระบวนการซึ่งจะสั้นกว่าเวลาทั้งหมด

แต่อย่างไรก็ตาม นิยามที่มักนิยมใช้กันคือ เวลาที่ใช้ นับตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้นไปจนถึงอุณหภูมิเป้าหมายที่ -10°C ภายใต้สมมุติฐานว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเริ่มต้นเพียงเล็กน้อยมีผลต่อเวลาการแช่แข็งน้อยมาก ส่วนอัตราการแช่แข็งก็มีการนิยามไว้หลายนิยาม กล่าวคือ

1. อัตราการเคลื่อนที่ของชั้นเยือกแข็ง (Rate of propagation of ice front) จากผิวหน้าเข้าสู่ใจกลาง คำนวณได้จากการหารความหนาครึ่งหนึ่งด้วยเวลาการแช่แข็ง
2. อัตราการเคลื่อนที่ของชั้นเยือกแข็ง (Ice propagation rate) แบ่งเป็น
 - การแช่แข็งอย่างช้า อัตราการเคลื่อนที่ $<1\text{ cm/h}$
 - การแช่แข็งเร็วปานกลาง อัตราการเคลื่อนที่ $1-5\text{ cm/h}$
 - การแช่แข็งอย่างรวดเร็ว อัตราการเคลื่อนที่ $>5\text{ cm/h}$

3. เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะในช่วงที่เกิดผลึกน้ำแข็งสูงสุด เนื่องจากเป็นช่วงที่มีสัดส่วนที่เป็นน้ำแข็งมากที่สุด ซึ่งอยู่ระหว่างอุณหภูมิ -1 ถึง -5°C ในกรณีที่ใช้เวลาในช่วงนี้สั้นกว่าหรือเท่ากับ 30 นาทีจะถือว่าเป็นการแช่แข็งอย่างรวดเร็ว หากมากกว่า 30 นาทีก็ถือว่าเป็นการแช่แข็งอย่างช้า

2.2 ชนิดของเครื่องแช่แข็ง (Freezer Types) (Fellow, 2000)

เครื่องแช่แข็งที่มีใช้อุตสาหกรรมอาหารมีหลายชนิด การเลือกเครื่องแช่แข็งต้องพิจารณาหลายปัจจัย ได้แก่ อัตราการแช่แข็งที่ต้องการ ขนาด รูปทรงและภาชนะบรรจุของอาหาร ลักษณะการทำงานของเครื่องว่าเป็นแบบกะหรือแบบต่อเนื่อง กำลังการผลิต จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและเงินลงทุน เครื่องแช่แข็งอาจแบ่งได้กว้างๆ เป็น 2 ประเภท คือ

- เครื่องทำความเย็นเชิงกล (Mechanical Refrigerators) ซึ่งประกอบด้วยวัฏจักรทำความเย็นที่มีวงจรน้ำยาทำความเย็นให้เกิดการระเหยที่คอยล์เย็น (Evaporator) และอัดตัวกลับไประบายความร้อนออกที่คอยล์ร้อน (Condenser) ตัวกลางในการดึงความร้อนออกจากอาหารอาจเป็นลมเย็น น้ำเย็น หรือแม้กระทั่งพื้นผิวที่เย็น เช่นในกรณีของ Contact Plate Freezer เป็นต้น
- เครื่องทำความเย็นระบบไครโอเจนิค (Cryogenic Freezers) ซึ่งใช้คาร์บอนไดออกไซด์แข็งหรือเหลว หรือไนโตรเจนเหลว หรือฟรอนเหลวให้สัมผัสโดยตรงกับอาหาร

วิธีการจำแนกเครื่องแช่แข็งอาจใช้อัตราการเคลื่อนที่ของระนาบน้ำแข็งเป็นเกณฑ์ ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

- Slow/Sharp freezers อัตราเร็ว 0.2 cm/h ได้แก่ เครื่องแช่แข็งแบบอากาศนิ่ง และห้องเย็น (Cold storage)
- Quick freezers อัตราเร็ว $9.5\text{--}3\text{ cm/h}$ ได้แก่ Air-blast และ Plate freezers
- Rapid freezers อัตราเร็ว $5\text{--}10\text{ cm/h}$ ได้แก่ เครื่องแช่แข็งแบบฟลูอิดไดเบด
- Ultrarapid freezers อัตราเร็ว $10\text{--}100\text{ cm/h}$ ได้แก่ Cryogenic freezers

2.2.1 เครื่องแช่แข็งที่ใช้อากาศเย็น (Cooled-air freezers)

ตู้แช่ที่ไม่มีการไหลเวียนของอากาศ เรียกว่า Chest freezers อุณหภูมิอากาศภายในอยู่ที่ -20 ถึง -30°C ไม่มีการใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เพราะอัตราการแช่แข็งต่ำ ใช้เวลานาน $3\text{--}72$ ชั่วโมงและคุณภาพอาหารต่ำ ส่วนห้องเย็น (Cold store) ใช้แช่แข็งซากสัตว์ เก็บอาหารที่แช่แข็งมาแล้ว มีการทำให้อากาศไหลเวียนด้วยพัดลมเพื่อให้มีความสม่ำเสมอ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนต่ำ แสดงใน [ตารางที่ 2.1](#)

Blast freezers ใช้อากาศเย็นที่ความเร็ว $1.5\text{--}6.0\text{ m/s}$ ที่อุณหภูมิ -30 ถึง -40°C ไหลผ่านผิวหน้าอาหาร เพื่อลดความหนาของชั้นฟิล์มอากาศที่ผิว ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น การทำงานมีทั้งแบบ

กะและเป็นต่อเนื่องที่ไ้ร่ดเช้นให้อาหารเรียงเป็นชั้น หรือให้อาหารเคลื่อนที่ด้วยสายพานลำเลียง ทิศทางการไหลของอากาศอาจไหลขนานหรือตั้งฉากก็ได้ แต่ต้องกระจายให้ทั่วถึง การแช่แข็งด้วยวิธีนี้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และใช้กับอาหารได้หลายขนาดหลายรูปทรง อัตราการผลิตมีตั้งแต่ 200-1500 kg/h แต่อย่างไรก็ตาม อากาศปริมาณมากที่ไหลเวียนภายในเครื่องอาจเป็นสาเหตุของการสูญเสียน้ำหนักของอาหารได้ถึง 5% หรือเกิด freezer burn โดยเฉพาะในกรณี IQF

Belt/Spiral freezers อาหารจะถูกลำเลียงด้วยสายพานถัก (mesh belt) เรียงซ้อนกันเป็นวง ลำเลียงอาหารผ่านบริเวณที่ทำเย็น บางชนิดมีการออกแบบในสายพานบนวางบนขอบของสายพานล่าง เพื่อให้มีการเรียงตั้งขึ้นเอง (Self-stacking) เพื่อไม่ต้องใช้แรงงานรับทำให้เพิ่มกำลังการผลิตได้อีก 50% อากาศเย็นหรือในโตรเจนเหลวจะถูกเป่าสวนทางกับการเคลื่อนที่ของอาหารเพื่อลดการสูญเสียน้ำหนักจากการระเหย ข้อดีของเครื่องประเภทนี้ คือ พื้นที่น้อย ป้อนและลำเลียงอัตโนมัติ ค่าบำรุงรักษาต่ำ ใช้กับอาหารได้หลากหลายชนิด และมีกำลังการผลิตสูง เช่น สายพานหน้ากว้าง 50-75 cm 32 ชั้น สามารถผลิตได้ถึง 3000 kg/h

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบวิธีการแช่แข็งต่างๆ

Method of freezing	Typical film heat transfer coefficients (W m ⁻² K ⁻¹)	Typical freezing times for specified foods to -18°C (min)	Food
Still air	6-9	180-4320	meat carcass
Blast (5 m/s)	25-30	15-20	unpackaged peas
Blast (3 m/s)	18		
Spiral Belt	25	12-19	Hamburgers, fish fingers
Fluidised bed	90-140	3-4	unpackaged peas
		15	Fish fingers
Plate	100	75	25 kg blocks of fish
		25	1 kg carton vegetables
Scraped surface		0.3-0.5	Ice cream (layer approximately 1 mm thick)
Immersion (Freon)	500	10-15	170 g card cans of orange juice
		0.5	Peas
		4-5	Beefburgers, fish fingers
Cryogenic (liquid N ₂)	1500	1.5	454 g of bread
		0.9	454 g of cake
		2-5	Hamburgers, seafood
		0.5-6	Fruits and vegetables

ที่มา: Fellow (2000), หน้า 426

Fluidised-bed freezers ใช้อากาศเย็นที่ความเร็ว 2-6.0 m/s ที่อุณหภูมิ -25 ถึง -35°C เป่าผ่านชั้นอาหารหนา 2-13 cm ที่วางบนตะแกรงหรือสายพานถัก บางชนิดออกแบบเป็น 2 ชั้นตอน เริ่มจากการทำเย็นอย่างรวดเร็วด้วยเบดบางๆ เพื่อให้เกิดชั้นน้ำแข็ง (Ice glaze) ป้องกันการเกาะติดกันของชนิดอาหาร จากนั้นจึงทำเย็นต่อในเบด 10-15 cm ความหนาของเบดและความเร็วลมขึ้นกับรูปทรงและขนาดของอาหาร ข้อดีของ

เครื่องประเภทนี้คือ อาหารจะสัมผัสกับอากาศเย็นได้อย่างทั่วถึง สม่าเสมอว่าการแช่แข็งด้วย air-blast สัมผัสประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนสูง ใช้เวลานับ อัตราการผลิตสูง (10,000 kg/h) และสูญเสียน้ำหนักจากการระเหยน้อย แต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดคือ ใช้ได้เฉพาะกับอาหารที่เป็นชิ้นเล็ก (Particulate foods) เท่านั้น เช่น ถั่ว เมล็ดข้าวโพด ถั่ว สตรอเบอรี่ มันฝรั่งทอด เป็นต้น

2.2.2 เครื่องแช่แข็งที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Cooled-liquid Freezers)

เครื่องแช่แข็งแบบจุ่ม (Immersion freezers) ใช้กับอาหารที่มีภาชนะห่อหุ้มก่อนแล้วให้จุ่มลงในอ่างที่มีสารละลายทำความเย็น เช่น Propylene glycol, น้ำเกลือ, กลีเซอรอล หรือสารละลายกลีเซอรอล คอลไรด์ ซึ่งต่างจากการแช่แข็งแบบไครโอเจนิกที่สารทำความเย็นมีการเปลี่ยนสถานะ เครื่องแช่แข็งแบบจุ่มมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูง เงินลงทุนต่ำ ใช้กับน้ำผลไม้ที่บรรจุในภาชนะกึ่งแข็ง (laminated card-polyethylene cans) และใช้กับเนื้อสัตว์ปีกที่มีการหุ้มพลาสติกก่อน เป็นการ pre-freeze ก่อนเข้าเครื่อง air-blast

2.2.3 เครื่องแช่แข็งที่ให้ผลิตภัณฑ์สัมผัสผิวเย็นจัด (Cooled-surface freezers)

เครื่องประเภทมี 2 ชนิด คือ Plate freezers และ Scraped-surface freezers ประเภทแรกใช้กับอาหารบางและเรียบ หรือต้องเติมน้ำลงในอาหารในบล็อกก่อน วางเรียงเป็นชั้นเดียว บนเพลตกลวงที่มีสารทำความเย็นที่อุณหภูมิ -40°C ไหลอยู่ภายใน ทั้งเพลตบนและล่าง การทำให้อาหารสัมผัสกับเพลตเย็นโดยตรงทำให้อัตราการแช่แข็งเพิ่มขึ้น กำลังการผลิตตั้งแต่ 90-2700 kg/h ข้อดี คือ คุ่มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ประหยัดพื้นที่ ค่าดำเนินการต่ำ การละลายน้ำแข็งจากคอนเดนเซอร์น้อย การสูญเสียของผลิตภัณฑ์ต่ำ ส่วนข้อเสียคือ ลงทุนสูง และมีข้อจำกัดเรื่องรูปทรงของอาหาร ส่วน Scraped-surface freezers ใช้กับอาหารเหลวหรือกึ่งแข็ง เช่น ไอศกรีม มีลักษณะคล้ายเครื่องระเหย หรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แต่มีใบปาดหมุนเพื่อกวาดเอาอาหารออกจากผิว ในกรณีของไอศกรีมจะมีการปั๊มอากาศเข้าผสมเพื่อเพิ่มปริมาตร การแช่แข็งด้วยวิธีนี้มีอัตราการแช่แข็งเร็วมาก กล่าวคือ 50% ของน้ำจะถูกทำให้เป็นน้ำแข็งภายใน 2-3 วินาที อุณหภูมิอาหารจะลดลงถึง -4 ถึง -7°C ก่อนบรรจุและแช่แข็งต่อในห้องแช่แข็ง (Hardening Room) ต่อไป

2.2.4 เครื่องแช่แข็งแบบไครโอเจนิก (Cryogenic freezers)

เครื่องแช่แข็งประเภทนี้อาศัยการเปลี่ยนสถานะของสารไครโอเจนโดยการระเหยหรือการระเหิด สารไครโอเจนอาจเป็นไนโตรเจนเหลว หรือคาร์บอนไดออกไซด์เหลว/แข็ง ทั้งไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็นสารที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร เมื่อเป่าไนโตรเจนเหลวลงบนอาหาร 48% ของความสามารถในการแช่แข็งทั้งหมดหรือเอนทาลปีจะถูกใช้ไปในการระเหยเป็นไอเย็น ส่วนที่เหลืออีก 52% ของเอนทาลปีอยู่ในอากาศเย็น จะหมุนเวียนนำกลับมาใช้ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์จะมีเอนทาลปีต่ำกว่าไนโตรเจน ความสามารถในการทำเย็นส่วนใหญ่ (85%) ได้จากการระเหิดของคาร์บอนไดออกไซด์แข็ง นอกจากนี้ คาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นสารยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Bacteriostat) และเป็นพิษ

ดังนั้น ต้องมีการคัดออกจากโรงงาน ปริมาณการใช้ต่อผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าไนโตรเจน แต่การสูญเสียระหว่างการเก็บต่ำกว่า ข้อดีของเครื่องประเภทนี้เทียบกับเครื่องแช่แข็งเชิงกล คือ ลงทุนต่ำกว่า ใ้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด น้ำหนักสูญเสียน้อย ช่วงเวลาเริ่มเดินเครื่องเร็ว ไม่ต้องละลายน้ำแข็ง อัตราการแช่แข็งเร็วมาก ซึ่งมีผลต่อคุณภาพอาหารที่ดีขึ้น ไม่มีออกซิเจนมาเกี่ยวข้องในขณะแช่แข็ง แต่ข้อเสีย คือ ราคาของไครโอเจนสูง อาหารบางชนิดเกิด thermal shock ทำให้ผิวหนังอาหารแตก เช่น สตรอเบอรี่ เป็นต้น แต่เหมาะกับอาหารจำพวกกุ้ง ราชเบอร์รี่ และชิ้นเนื้อหั่น (diced meat) เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 สมบัติของสารไครโอเจน

Property	Liquid Nitrogen	Carbon dioxide
Density (kg/m^3)	784	464
Specific heat ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1.04	2.26
Latent heat (kJ kg^{-1})	358	352
Total usable refrigeration effect (kJ kg^{-1})	690	565
Boiling point ($^{\circ}\text{C}$)	-196	-78.5 (sublimation)
Thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.29	0.19
Consumption per 100 kg of product frozen (kg)	100-300	120-375

ที่มา: Fellow (2000), หน้า 430

การแช่แข็งแบบไครโอแมคคานิค ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ 1) Cryogenic freezing ซึ่งเป็นการจุ่มอาหารในไนโตรเจนเหลวเพื่อให้เกิดชั้น crust ของน้ำแข็งบางๆ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความต้านทานเชิงกลให้อาหารที่บอบบางและป้องกันเกาะติดกันของอาหารขนาดเล็กที่เปียกชื้น 2) Mechanical freezing เป็นการนำอาหารที่มีชั้นน้ำแข็งบางๆ ไปแช่แข็งต่อในเครื่องแช่แข็งเชิงกล เช่น Air-blast freezer หรือตู้แช่แข็ง (Chest freezer) จนกว่าอุณหภูมิใจกลางจะถึงจุดที่ต้องการ การแช่แข็งแบบ 2 ขั้นนี้ จะช่วยลดเวลาการแช่แข็งและลดการสูญเสียน้ำระหว่างกระบวนการได้ แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแช่แข็งด้วยวิธีนี้ยังมีอยู่อย่างจำกัด วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องที่น่าสนใจมีดังนี้

Agneli และ Mascheroni (2002) พบว่า การแช่แข็ง chicken escallops แสมเบอร์เกอร์ และหน่อไม้ฝรั่ง ด้วยระบบไครโอแมคคานิคช่วยทำให้คุณภาพของอาหารดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยพิจารณาจาก การสูญเสียน้ำหนัก(Drip loss) เนื้อสัมผัสและสีที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับการแช่แข็งด้วย Air-blast freezer สำหรับหัตถ์พบว่าคุณภาพของหัตถ์แช่แข็งที่แช่แข็งด้วยสองวิธีไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัย แต่กลับพบว่า การแช่แข็งที่เร็วเกินไปทำให้ผิวหนังอาหารแตก ส่วนสตรอเบอรี่ การแช่แข็งด้วยระบบไครโอแมคคานิค แม้จะช่วยลดการสูญเสียน้ำหนัก ได้ถึง 60% แต่คุณภาพด้านอื่นๆกลับไม่ดีขึ้น และพบว่า คุณภาพโดยรวมขึ้นกับความแข็ง (Firmness) ของสตรอเบอรี่เริ่มต้น

Gennadois , Hanna และ Ling (1997) ศึกษาผลการเก็บรักษาในสภาพแช่แข็งของหอมหัวใหญ่หั่นแว่นชุบแป้งทอด (deep-fat fried breaded onion rings) และการใช้สารดูดความชื้นกับตัวอย่างแช่แข็งเพื่อชะลอการเสื่อมคุณภาพ จากการทดลอง พบว่า การเก็บตัวอย่างไว้ที่ -20°C 1 อาทิตย์ มีผลทำให้ความชื้นในหัวหอมลดลง แต่ความชื้นในส่วนแป้งกลับเพิ่มขึ้นในตัวอย่างที่ไม่มีการใส่สารดูดความชื้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสรุปว่า การใช้สารดูดความชื้นในถุงบรรจุผลิตภัณฑ์ช่วยดูดซับความชื้นส่วนเกินในแป้ง (coating) ที่มาจากการเคลื่อนที่มาจากส่วนของหัวหอมและความชื้นจากการแพร่ผ่านจากภายนอกได้ ส่วนการเปลี่ยนแปลงของสีไม่มีผลกระทบจากการแช่แข็งอย่างมีนัยสำคัญ การวัดเนื้อสัมผัสจะวัดออกมาในรูปของแรงเฉือน (Shearing force) ซึ่งเป็นตัวแทนของค่าความกรอบ (Crispiness) และงานที่หาจากพื้นที่ของเส้นกราฟของแรง-เวลา ซึ่งเป็นตัวแทนของค่าความเหนียว (Toughness/ Chewiness) งานวิจัยนี้ยังพบว่า สารดูดความชื้นช่วยรักษาความกรอบของส่วนแป้งได้ แม้จะผ่านการแช่แข็งมาก่อนส่วนค่าความเหนียวก็ไม่ต่างจากตัวอย่างทอดใหม่ๆ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้สารดูดความชื้นไม่สามารถป้องกันการสูญเสียความชื้นของอาหารแช่แข็งได้ และอาจยังทำให้ความชุ่มน้ำในอาหารลดลง

2.3 สมการการนำความร้อนแบบไฮเพอร์โบลิก

โดยทั่วไป สมการที่ใช้อธิบายการถ่ายโอนความร้อนโดยการนำสามารถใช้สมการ Fourier ได้ แต่มีสมมุติฐานที่สำคัญประการหนึ่ง คือ ต้องเกิดสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ทันทีทันใด (Immediately Equilibrium thermodynamic transition) และเกิดการถ่ายเทฟลักซ์ความร้อนทันทีทำให้เกิดเกรเดียนท์หรือผลต่างของอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงมากๆ หรือมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงๆ การเข้าสู่สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ต้องการ เวลาช่วงหนึ่ง (Ozisik and Tzou, 1994) ซึ่งปรากฏในเทอมของ *Thermal relaxation time* (τ) ซึ่งนิยามว่าเป็นเวลา เวลาในการหน่วงความร้อนที่ต้องการเพื่อสะสมพลังงานความร้อนให้เกิดการถ่ายเทไปยังอิลิเมนต์ที่ใกล้ที่สุดภายในโครงสร้างวัสดุ สมการดังกล่าวเรียกว่า สมการ *Non-Fourier's heat conduction* และมีรูปแบบสมการเป็นสมการไฮเพอร์โบลิกดังนี้

$$q + \tau \frac{\partial q}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

เมื่อ τ คือ เวลาในการหน่วงความร้อน Thermal relaxation time (s) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ความร้อน (Thermal wave speed, c) ดังนี้ $\tau = \alpha / c^2$

นอกจากนี้ Kaminski (1990) กล่าวว่า วัสดุใดๆ ที่มีเนื้อไม่เป็นเอกพันธ์ (Non-homogeneous materials) ซึ่งประกอบไปด้วยของแข็ง ของเหลวและแก๊ส เช่น ระบบที่มีรูพรุน ระบบที่เป็นโครงข่าย สารแขวนลอย และ paste เป็นต้น การถ่ายโอนความร้อนในวัสดุเช่นนี้จะเกิดจากกลไกที่แตกต่างกันภายในวัสดุเอง ทั้งการนำ

ความร้อนระหว่างอนุภาค การพาความร้อนแบบธรรมชาติภายในพื้นที่ปิด และการแผ่รังสี ทำให้เกิดปรากฏการณ์สะสมความร้อน (Cumulative effect) เช่นเดียวกับกรณีของอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงๆ ดังนั้น การถ่ายโอนความร้อนในวัสดุที่มีเนื้อไม่เป็นเอกพันธ์จึงอธิบายได้ด้วยสมการไฮเพอร์โบลิก ค่า τ อาจมีค่าได้ตั้งแต่ 10^{-3} ถึง 10^3 วินาที ขึ้นกับความเข้มของกระบวนการ นอกจากนั้น สำหรับวัสดุที่มีเนื้อเป็นเอกพันธ์ ค่า τ จะต่ำมาก เช่น แก้วมีค่า τ 10^{-8} ถึง 10^{-10} วินาที ส่วนของเหลวและของแข็งไดอิลด์ทริก ค่า τ มีค่า 10^{-10} ถึง 10^{-12} ส่วนผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ ค่า τ มีค่า 20 ถึง 30 วินาที (Osizik, 1994) ในกรณีที่ Thermal relaxation time ($\tau=0$) เป็นศูนย์ หมายความว่า การตอบสนองความร้อนเกิดขึ้นทันที สมการไฮเพอร์โบลิกจะกลายเป็นสมการการนำความร้อนของ Fourier หรืออีกนัยหนึ่ง อาจกล่าวได้ว่าความเร็วของคลื่นความร้อน (c) มีค่าเป็นอนันต์ (Infinite value)

สมมูลพลังงานความร้อนสำหรับการถ่ายโอนความร้อนแบบหนึ่งมิติ จะได้ว่า

$$-\frac{\partial q}{\partial x} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

รวมสมการ (2.1) และ (2.2) ได้สมการการนำความร้อนแบบไฮเพอร์โบลิกสำหรับสภาวะไม่คงตัวของอุณหภูมิ ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \tau \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ α คือ ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity), $\partial T / \partial t$ คือ การหน่วงของคลื่น (Wave damping) และ $\partial^2 T / \partial x^2$ การแพร่กระจายคลื่นความร้อน (Wave propagation of heat)

Antaki (1997) หาคำตอบเชิงวิเคราะห์ของสมการการนำความร้อนแบบไฮเพอร์โบลิกของวัสดุแผ่นราบกึ่งอนันต์ (Semi-infinite slab) ที่มีการพาความร้อนที่ผิว สมการจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติและแก้สมการด้วยวิธี Laplace transform คำตอบของสมการบ่งบอกลักษณะสำคัญของคลื่นทั้งในกรณีทำร้อนและทำเย็น 2 ประการคือ ประการที่หนึ่ง การมี step function ที่แยกแยะระหว่างบริเวณที่ได้รับความร้อนและส่วนที่ไม่ได้รับความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ประการที่สอง step change ของอุณหภูมิที่ผิว เมื่อเปรียบเทียบกับคำตอบจากสมการ Fourier ที่ทอมอุณหภูมิไร้มิติเริ่มต้นที่ศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 การเกิด step change ที่ผิวเกิดจากความล่าช้าจากการนำความร้อน (Heat conduction delay) ซึ่งถูกจำกัดด้วยคลื่นความร้อนในชั้นภายในที่ถัดจากผิวเข้าไป แต่เมื่อเวลาผ่านไป คำตอบของสมการไฮเพอร์โบลิกก็จะลู่เข้าหาคำตอบของสมการพาราโบลาของ Fourier

แม้ว่าจะมีนักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจต่อการหาคำตอบของสมการการนำความร้อนแบบไฮเพอร์โบลิก แต่มีเพียงงานของ [Mitra และคณะ \(1995\)](#) เท่านั้นที่ทดสอบความถูกต้องของคำตอบกับการทดลองกับแผ่นเนื้อโบลีอกน่า (Bologna) โดยมีสภาวะขอบ 4 แบบ ผลการทดสอบ พบว่า การกระจายอุณหภูมิของตัวอย่างจากการทดลองเบี่ยงเบนไปจากการทำนายจากสมการ Fourier อย่างเห็นได้ชัดและมากกว่าคำตอบจากสมการไฮเพอร์โบลิก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในช่วงต้นๆ ของกระบวนการ คณะผู้วิจัยจึงสรุปว่า การใช้สมการ Hyperbolic non-Fourier ในการอธิบายการนำความร้อนในสภาวะไม่คงตัวของเนื้อแปรรูป (Processed meat) มีเหมาะสมมากกว่า

2.4 การหาคำตอบด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method)

การหาคำตอบสมการอนุพันธ์ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) เป็นวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) มักใช้กับปัญหาที่เกี่ยวกับสมการไม่เชิงเส้น (Nonlinearity) ระบบที่มีรูปทรงซับซ้อนและสภาวะขอบที่ยู่ยาก ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีผลต่างสืบเนื่อง สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการถ่ายโอนความร้อนในช่วงการแช่แข็งแบบเชิงกล โดยการแบ่งระบบออกเป็นโหนด สมการอนุพันธ์ที่ควบคุมกระบวนการและสภาวะขอบจะถูกแปลงให้เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic equations) วิธีการแปลงสมการที่นิยมใช้มากมี 2 วิธี คือ 1) วิธีกระจายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) และ 2) วิธีปริมาตรคงที่ (Control volume approach) ([Ozisik, 1993](#))

2.4.1 อนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series Formulation)

แนวคิดของผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference) มาจากนิยามของอนุพันธ์ฟังก์ชัน $F(x,y)$ ที่ $x=x_0, y=y_0$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x_0 + \Delta x, y_0) - F(x_0, y_0)}{\Delta x} \quad (2.4)$$

เทอมขวามือจะเป็นค่าประมาณที่ดีของฟังก์ชัน $\partial F / \partial x$ เมื่อค่า Δx เล็กพอในช่วงที่ฟังก์ชัน $F(x,y)$ มีความต่อเนื่อง

พิจารณาการกระจายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) ของฟังก์ชัน $f(x)$ รอบจุด x_0 ในรูปผลต่างแบบไปข้างหน้าและข้างหลัง (forward and backward form)

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \left. \frac{df}{dx} \right|_0 \Delta x + \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_0 \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_0 \frac{(\Delta x)^3}{3!} + \dots \quad (2.5)$$

$$f(x_0 - \Delta x) = f(x_0) - \left. \frac{df}{dx} \right|_0 \Delta x + \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_0 \frac{(\Delta x)^2}{2!} - \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_0 \frac{(\Delta x)^3}{3!} + \dots \quad (2.6)$$

สมการ (2.5) และ (2.6) สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_0 = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (2.7)$$

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_0 = \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (2.8)$$

เมื่อ $O(\Delta x)$ คือ ค่าความผิดพลาดจากการตัดทอน (truncation error)

สำหรับผลต่างแบบไปข้างหน้า (Forward difference)

$$O(\Delta x) = \frac{\Delta x}{2} f''(x_0) + \frac{(\Delta x)^2}{6} f'''(x_0) + \dots \quad (2.9)$$

สำหรับผลต่างแบบไปข้างหลัง (Backward finite difference)

$$O(\Delta x) = \frac{\Delta x}{2} f''(x_0) - \frac{(\Delta x)^2}{6} f'''(x_0) + \dots \quad (2.10)$$

สำหรับผลต่างตรงกลาง (central difference) ได้จากนำสมการ (2.5)-(2.6)

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_0 = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} - O(\Delta x)^2 \quad (2.11)$$

$$\text{เมื่อ } O(\Delta x)^2 = \frac{(\Delta x)^2}{6} f'''(x_0) + \frac{(\Delta x)^5}{120} f^{(5)}(x_0) + \dots$$

เมื่อกำหนดให้ i คือ กริด (grid point) ที่ x_0 สมการ (2.7), (2.8) และ (2.11) เขียนได้เป็น

$$f'_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (\text{forward}) \quad (2.12a)$$

$$f'_i = \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (\text{backward}) \quad (2.12b)$$

$$f'_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} + O(\Delta x)^2 \quad (\text{central}) \quad (2.12c)$$

สำหรับอนุพันธ์อันดับสองเขียนได้เป็น

$$f''_i = \frac{f_i - 2f_{i+1} + f_{i+2}}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x) \quad (\text{forward}) \quad (2.13a)$$

$$f''_i = \frac{f_{i-2} - 2f_{i-1} + f_i}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x) \quad (\text{backward}) \quad (2.13b)$$

$$f''_i = \frac{f_{i-1} - 2f_i + f_{i+1}}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x)^2 \quad (\text{central}) \quad (2.13c)$$

2.5 วิธีปริมาตรควบคุม (Control Volume Approach)

แนวคิดของวิธีปริมาตรควบคุมคือ การทำสมดุล ในที่นี้คือ พลังงานบนปริมาตรควบคุมเล็กๆ รอบ grid point วิธีนี้มีความแม่นยำมากกว่าวิธีแรกโดยเฉพาะอย่างยิ่ง สำหรับรูปทรงกระบอกและทรงกลม และเหมาะกับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสถานะขอบที่มีการพาความร้อน ระยะของเมสและคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงได้ (Mannapperuma and Singh, 1988)

สมการการนำความร้อนแบบ transient ที่มี energy generation แสดงดังสมการ

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot q + g \quad (2.14)$$

เมื่อ q คือ heat flux vector สัมพันธ์กับอุณหภูมิในกฎของฟูเรียร์: $q = -k\nabla T$
 g คือ volumetric heat generation rate.

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.14) รอบปริมาตร V

$$\int_V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int_V \nabla \cdot q dV + \int_V g dV \quad (2.15)$$

$$V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \int_S q \cdot n dS + Vg \quad (2.16)$$

เมื่อ s คือ พื้นที่ผิวของปริมาตรควบคุม (surface area of the control volume)

เมื่อแทนที่ กฎของฟูเรียร์ได้เป็น

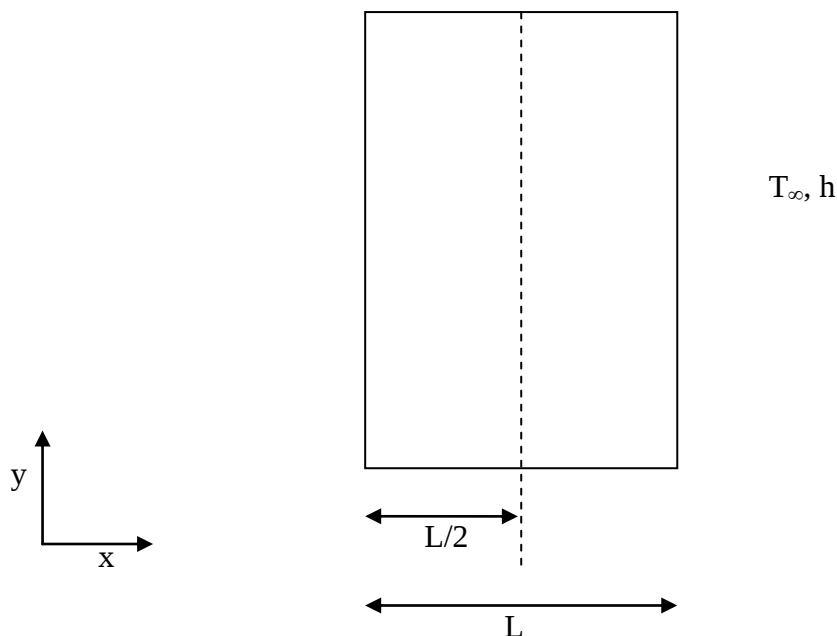
$$V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \int_S k \frac{\partial T}{\partial n} dS + Vg \quad (2.17)$$

การสมดุลรอบปริมาตรในแต่ละจุด จะแปลงเทอมอนุพันธ์ให้เป็นผลต่างสืบเนื่องโดยอาศัยนิยามของอนุพันธ์

บทที่ 3

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองเพื่อเข้าใจถึงปรากฏการณ์การถ่ายโอนความร้อนและการคำนวณเวลาทั้งหมดในการแช่เยือกแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็งแบบโครโอแมคคานิค โดยใช้ตัวอย่างอาหารแบบแผ่น slab มีความหนา L สำหรับการแช่เยือกแข็งแบบโครโอแมคคานิค เป็นการแช่เยือกแข็ง 2 ขั้นตอนคือ การแช่แข็งโครโอจินิกในช่วงแรก และตามด้วยการแช่เยือกแข็งแบบเชิงกลเพื่อให้อุณหภูมิใจกลางของตัวอย่างได้ตามที่กำหนด อย่างไรก็ตาม ระหว่างการย้ายตัวอย่างอาหารจากการแช่แข็งโครโอจินิกไปยังการแช่เยือกแข็งแบบเชิงกลไม่รวมอยู่ในแบบจำลองในงานวิจัยนี้ เนื่องจากไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการกระจายอุณหภูมิของตัวอย่างและเวลาแช่แข็งทั้งหมด (Agnelli และ Masheroni, 2001) สมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การถ่ายโอนความร้อนของทั้งสองช่วงเวลามีสถานะขอบและสถานะเริ่มต้นแตกต่างกัน การหาคำตอบของสมการจะอยู่ในรูปของคำตอบเชิงวิเคราะห์หรือคำตอบแม่นยำตรง (Analytical solution) ในช่วงของการแช่เยือกแข็งแบบโครโอจินิกและในรูปของคำตอบเชิงตัวเลข (Numerical solution) และคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาคำตอบของการกระจายอุณหภูมิของตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมของอาหารรูปทรงแผ่นราบ

3.1 สมมติฐาน

สมมติฐานมีดังนี้

1. พิจารณาการนำความร้อนในมิติเดียว
2. ในช่วงไครโอจินิก พิจารณาตัวอย่างเป็น semi-infinite slab หรือระบบมีเวลาการสัมผัสกับตัวกลางด้วยเวลาสั้นๆ
3. ตัวอย่างอาหารมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน
4. ตัวอย่างสมมาตรในแกน y
5. เริ่มต้นอุณหภูมิของอาหารเท่ากันทุกจุด
6. ผลของการเคลื่อนย้ายตัวอย่างระหว่างเครื่องแช่แข็งทั้งสองเครื่องสามารถตัดทิ้งได้
7. สมบัติเชิงกายภาพและความร้อน ได้แก่ การนำความร้อน (k) และค่าความจุความร้อน (C_p) มีค่าคงที่ในช่วงไครโอจินิก แต่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิช่วงการแช่เยือกแข็งแบบเชิงกล
8. ความหนาแน่นคงที่
9. ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะ
10. สมมติให้อินเตอร์เฟซระหว่างส่วนที่เป็นน้ำแข็งและไม่เป็นน้ำแข็ง (frozen/ unfrozen regions) เป็นระนาบเคลื่อนที่ (Sharp moving boundary)

3.2 ช่วงไครโอจินิก

3.2.1 สมการควบคุม (Governing Equation)

เมื่อจุ่มตัวอย่างลงในไนโตรเจนเหลวอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงมาก สามารถอธิบายด้วยการนำความร้อนในภายในตัวอย่างด้วยการนำความร้อนมิติเดียวแบบไฮเปอร์โบลิก ได้สมการควบคุมดังสมการ 3.1

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \tau \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.1)$$

- T คือ อุณหภูมิของตัวอย่าง ($^{\circ}\text{C}$)
 t คือ เวลา (second)
 τ คือ thermal relaxation time (second)
 α คือ ค่าการแพร่ความร้อนของตัวอย่าง (m^2/s)

3.2.2 สถานะเริ่มต้น (Initial condition)

จากสมมติฐานที่ว่าตัวอย่างมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากัน ดังนั้นสถานะเริ่มต้นแสดงดังสมการ 3.2

$$T(x,0) = T_0 \quad (3.2)$$

3.2.3 สภาวะขอบเขต (Boundary condition)

สภาวะขอบเขตที่ผิวเป็นแบบ third kind ได้แก่ การนำความร้อนที่ผิวซึ่งมีผลมาจากการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาจากสารไครโอเจน ตัวอย่างถูกจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลานานๆ ดังนั้นจึงพิจารณาตัวอย่างเป็น semi-infinite slab ส่งผลให้อุณหภูมิใจกลางไม่เปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของช่วงนี้

B.C.1: สภาวะขอบเขตของการพาความร้อนที่ผิว

$$h(T_\infty - T_s) = k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} \quad (3.3a)$$

B.C.2: สภาวะขอบเขตที่จุดกึ่งกลาง

$$T\left(\frac{L}{2}, t\right) = T_0 \quad (3.3b)$$

เมื่อ

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่าง ($^{\circ}\text{C}$),

T_∞ คือ อุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$), ซึ่งเท่ากับ -196°C สำหรับไนโตรเจนเหลว,

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$).

3.2.4 คำตอบของแบบจำลอง (Model Solution)

ในขั้นตอนนี้นำวิธีการแก้สมการหาคำตอบแบบเชิงวิเคราะห์จาก [Antaki \(1997\)](#) มาใช้คำนวณโปรไฟล์อุณหภูมิจากที่ผิวไปยังระนาบคลื่น (wave front)

ดังที่กล่าวไปแล้ว คำตอบแบบเชิงวิเคราะห์เป็นคำตอบของสมการการนำความร้อนแบบไฮเพอร์โบลิกในวัสดุแผ่นราบกึ่งอนันต์ (semi-infinite slab) ที่มีการพาที่ผิว นั่นหมายความว่า ระบบมีขนาดใหญ่มากการนำความร้อนภายในระบบเกิดขึ้นทิศทางเดียว หรือในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะขอบไม่มีผลต่ออุณหภูมิภายในระบบในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งในกรณีหลังจะสอดคล้องกับปัญหาของการแช่แข็งแบบไครโอเจนิก คำตอบในเทอมไร้มิติ จะอยู่ในรูป

$$\bar{\theta} = \frac{(1 + \varepsilon p)}{p} \frac{\exp\{-\eta[p(1 + \varepsilon p)]^{1/2}\}}{\{(1 + \varepsilon p) - [p(1 + \varepsilon p)]^{1/2}\}} \quad (3.4)$$

$$\theta \quad \text{คือ} \quad \text{อุณหภูมิไร้มิติ} = \frac{T - T_0}{T_\infty - T_0}$$

p คือ พารามิเตอร์ของการแปลงลาปลาซ (Laplace transform)

$$\begin{aligned}\xi & \text{ คือ } \text{เวลาไร้มิติ} = \frac{t\alpha h^2}{k^2} \\ \eta & \text{ คือ } \text{ตำแหน่งไร้มิติ} = \frac{xh}{k} \\ \varepsilon & \text{ คือ } \text{thermal relaxation time ไร้มิติ} = \frac{\tau\alpha h^2}{k^2}\end{aligned}$$

จากสมการที่ 3.4 อุณหภูมิไร้มิตินำมาได้อีกดังนี้:

$$\theta = (1 - I / \pi) H(\xi - \eta \varepsilon^{1/2}) \quad (3.5)$$

$$\text{เมื่อ } I \text{ คือ } \int_{\varepsilon}^{\infty} \frac{e^{-\xi/z}}{z} \left[\frac{(z - \varepsilon) \sin\{(\eta/z)(z - \varepsilon)^{1/2}\} + (z - \varepsilon)^{1/2} \cos\{(\eta/z)(z - \varepsilon)^{1/2}\}}{1 + (z - \varepsilon)} \right] dz$$

z คือ integration variable ของ I

$$H(\xi - \eta \varepsilon^{1/2}) \text{ คือ step unit function} = \begin{cases} 0, \eta > \frac{\xi}{\varepsilon^{1/2}} \\ 1, \eta < \frac{\xi}{\varepsilon^{1/2}} \end{cases}$$

ดังนั้น การหาอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใดๆ จะเริ่มการหาตำแหน่งของระนาบคลื่น (wave front) ก่อน เนื่องจากตำแหน่งถัดจากระนาบนี้ไป เทอมอุณหภูมิไร้มิติจะมีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ ไม่เปลี่ยนแปลง ตำแหน่งของระนาบคลื่นจะเป็นตำแหน่งที่แยกระหว่างบริเวณที่ได้รับความร้อนและไม่ได้รับความร้อน ซึ่งหาได้ดังนี้

$$\eta_{\text{wave}} = \frac{\xi}{\varepsilon^{1/2}} \quad (3.6)$$

เมื่อแปลงไปเป็นตัวแปรปกติ ตำแหน่งของ ระนาบคลื่นสามารถหาได้แสดงได้ดังสมการ

$$x_{\text{wave}} = ct \quad (3.7)$$

$$c \text{ คือ } \text{ความเร็วของคลื่นความร้อน (m/s)} = \sqrt{\frac{\alpha}{\tau}}$$

การคำนวณอุณหภูมิจะเกิดขึ้นเมื่อ ฟังก์ชันหนึ่งชั้น (H) มีค่าเป็น 1 เท่านั้น ซึ่งต้องคำนวณหาฟังก์ชัน I สำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าของฟังก์ชัน I โดยการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชัน $I(z)$ ดังแสดงในสคริปโปรแกรมใน [ภาคผนวก ก-3](#)

จากการสำรวจเอกสาร ไม่พบข้อมูลสมบัติเชิงความร้อนและกายภาพ (Thermophysical properties) ของอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่า -40°C ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าคุณสมบัติที่ -40°C แทน ยกเว้นที่ตำแหน่งของระนาบคลื่นจะใช้คุณสมบัติที่อุณหภูมิ -1°C ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลง

3.3 ช่วงการแช่แข็งแบบเชิงกล

3.3.1 สมการควบคุม (Governing Equation)

หลังจากผ่านการแช่แข็งอาหารด้วยสารไครโอเจน ตัวอย่างถูกนำมาแช่แข็งต่อการแช่แข็งแบบเชิงกลหรือในสารละลายน้ำเกลือ การถ่ายโอนความร้อนภายในตัวอย่างในช่วงนี้ อธิบายด้วยการนำความร้อนของฟูเรียร์ สมการการนำความร้อนมิติเดียวแบบพาราโบลาแสดงดังสมการ 3.8

$$\rho \frac{\partial C_p T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.8)$$

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง (kg/m^3)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนโดยรวม is the effective heat capacity ($\text{kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$)

k คือ ค่าการนำความร้อนของตัวอย่าง ($\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$)

3.3.2 สถานะเริ่มต้น (Initial condition)

ในช่วงการแช่แข็งแบบเชิงกลเป็นช่วงที่ต่อจากการแช่แข็งแบบไครโอจินิก ดังนั้น อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารในช่วงนี้คือ อุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดช่วงการแช่แข็งแบบไครโอจินิก

3.3.3 สถานะขอบเขต (Boundary condition)

ขอบเขตที่ผิวในช่วงที่สองนี้มีสถานะเช่นเดียวกับช่วงแรก ยกเว้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน โดยที่ตำแหน่งกึ่งกลาง พลักซ์ความร้อนเท่ากับศูนย์เนื่องจากความสมมาตรของตัวอย่าง

B.C.1; สถานะขอบเขตของการพาความร้อนที่ผิว

$$h(T_{\infty} - T_s) = k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} \quad (3.9a)$$

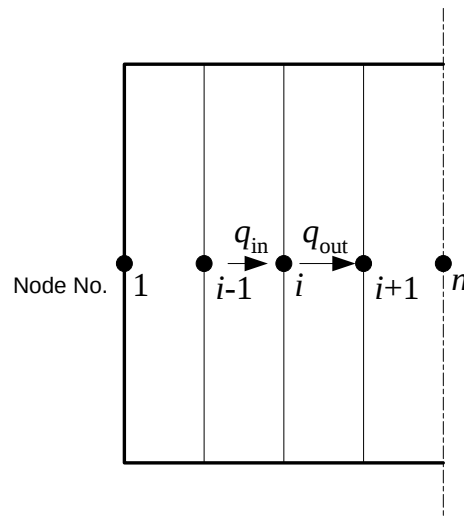
B.C.2; สถานะขอบเขตที่จุดกึ่งกลาง

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L/2} = 0 \quad (3.9b)$$

T_∞ คือ อุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$) ซึ่งขึ้นกับตัวกลางในการทำเย็นที่ใช้ สำหรับในกรณีของการแช่แข็งด้วยเครื่องแช่แข็งแบบเป่าลมเย็นมีค่าเท่ากับ -40°C อย่างไรก็ตามในกรณีของน้ำเกลือ T_∞ เท่ากับ -15°C .

3.3.4 การแก้สมการหาคำตอบของแบบจำลอง (Model Solution)

การแก้สมการหาคำตอบของสมการควบคุมที่มีสถานะเริ่มต้นและสถานะขอบเขตในงานวิจัยนี้ใช้วิธีหาคำตอบของสมการในเชิงตัวเลขแบบ explicit finite difference ความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างแบ่งเป็น n nodes เมื่อใช้วิธีวิเคราะห์ปริมาณควบคุมได้สมดุลพลังงานแต่ละ node แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ปริมาตรควบคุมสำหรับการถ่ายโอนความร้อนในมิติเดียวของวัสดุทรงแบนราบ

สมการอนุรักษ์พลังงานของปริมาณควบคุม (2.17) เมื่อไม่มีเทอมการสร้างความร้อน สมการจะลดรูปเป็น

$$\int_S k \frac{\partial T}{\partial n} dS = V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

เขียนเป็นสมการผลต่างสืบเนื่องที่ node i ได้เป็น

$$k_{i-1} A_{i-1} \left[\frac{T_{i-1}^t - T_i^t}{\Delta x} \right] - k_{i+1} A_{i+1} \left[\frac{T_i^t - T_{i+1}^t}{\Delta x} \right] = A_i \Delta x \rho C_{p_i} \left[\frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} \right] \quad (3.10)$$

เมื่อ Δt คือ time step ของการคำนวณ (s), i ตำแหน่งของ node, V ปริมาตรของอีลิเมนต์ (m^3) และ A พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (m^2) ซึ่งมีค่าเท่ากันในทุก nodes ดังนั้นลดรูปสมการและจัดเทอมเพื่อหาอุณหภูมิที่เวลาใหม่ ($t+\Delta t$) ได้เป็น

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \frac{\Delta t}{\rho C_{p_i} \Delta x^2} [k_{i-1} (T_{i-1}^t - T_i^t) - k_{i+1} (T_i^t - T_{i+1}^t)] \quad (3.11)$$

ที่ Node 1: มีการถ่ายโอนความร้อนที่ผิวเป็นแบบการพาและการนำความร้อน สมดุลความร้อนบนปริมาตรควบคุมในรูปของผลต่างสืบเนื่องได้เป็น

$$hA_1 \left[\frac{T_\infty - T_1^t}{\Delta x} \right] - k_2 A_2 \left[\frac{T_1^t - T_2^t}{\Delta x} \right] = A_1 \Delta x \rho C_{p_1} \left[\frac{T_1^{t+\Delta t} - T_1^t}{\Delta t} \right] \quad (3.12)$$

$$T_1^{t+\Delta t} = T_1^t + \frac{\Delta t}{\rho C_{p_1} \Delta x^2} [h \Delta x (T_\infty - T_1^t) - k_2 (T_1^t - T_2^t)] \quad (3.13)$$

ที่ Node กึ่งกลาง: มีเฉพาะเทอมการนำความร้อน

$$k_{n-1} A_{n-1} \left[\frac{T_{n-1}^t - T_n^t}{\Delta x} \right] = A_n \Delta x \rho C_{p_n} \left[\frac{T_n^{t+\Delta t} - T_n^t}{\Delta t} \right] \quad (3.14)$$

$$T_n^{t+\Delta t} = T_n^t + \frac{\Delta t}{\rho C_{p_n} \Delta x^2} [k_{n-1} (T_{n-1}^t - T_n^t)] \quad (3.15)$$

ในการหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง ค่าผิดพลาดจะมีอยู่ทุกขั้นของการคำนวณ (Ozisik, 1994) คำตอบจะมีความเสถียร (Stable) ภายใต้เงื่อนไขบางประการ พิจารณาอนุกรมที่ node i และจัดเทอมใหม่ดังนี้

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \frac{\Delta t}{\rho C_{p_i} \Delta x^2} [k_{i-1} (T_{i-1}^t - T_i^t) - k_{i+1} (T_i^t - T_{i+1}^t)] \quad (3.16)$$

$$T_i^{t+1} = T_i^t + \frac{k_i \Delta t}{C_{p_i} [\Delta x]^2} (T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t) \quad (3.17)$$

$$= T_i^t + S (T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t) \quad (3.18)$$

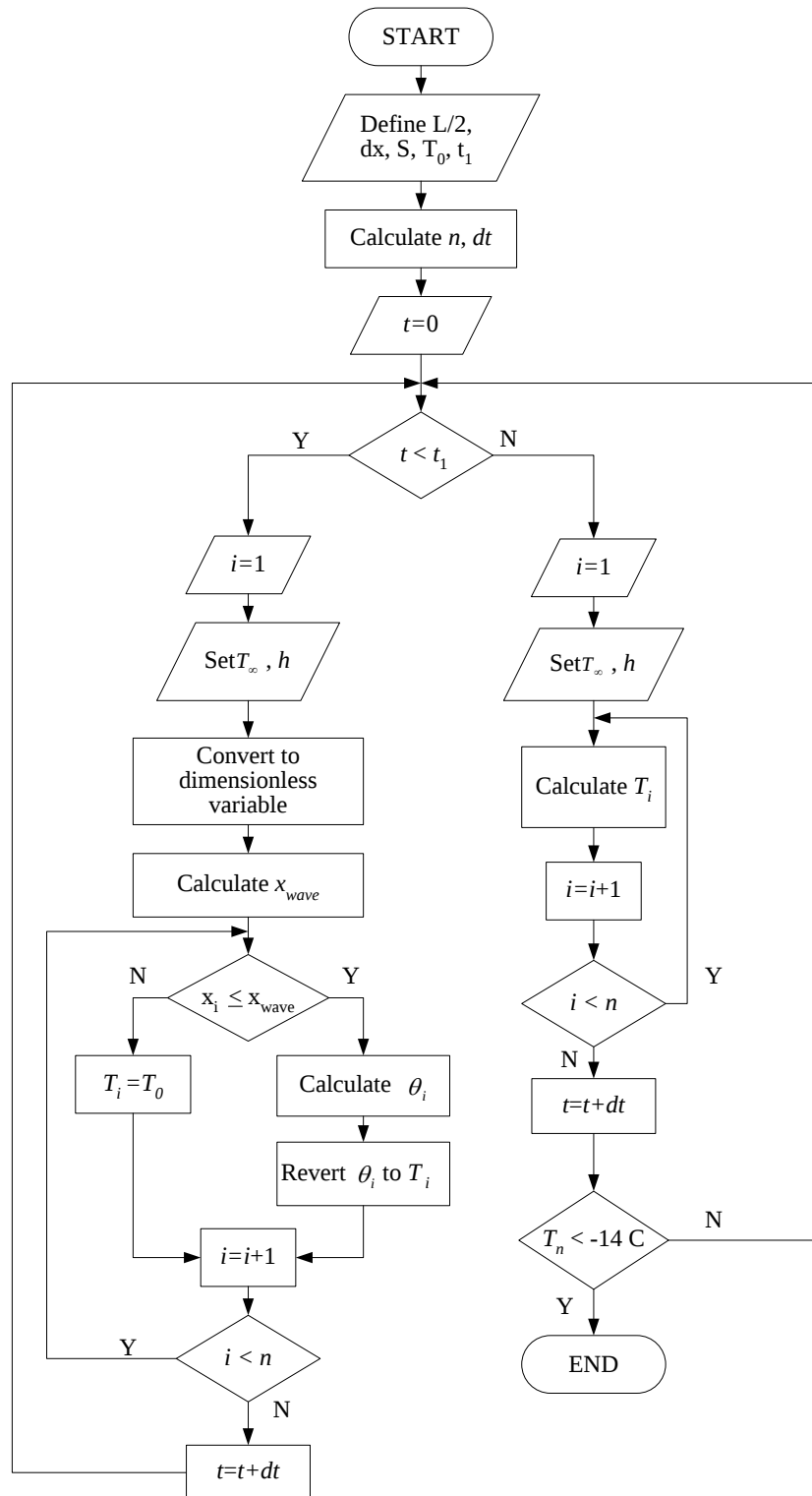
$$= ST_{i+1}^t + (1 - 2S)T_i^t + T_{i-1}^t \quad (3.19)$$

จากสมการ (3.19) คำตอบจะเสถียรภายใต้เงื่อนไข $S \leq \frac{1}{2}$ เพื่อให้สอดคล้องกับกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อ

$$S = \frac{k_i \Delta t}{C_{p_i} (\Delta x)^2} \quad (3.20)$$

3.4 อัลกอริทึมสำหรับหาคำตอบของแบบจำลอง

การหาคำตอบของสมการจากแบบจำลองที่เสนอมันจะเขียนเป็นโปรแกรมคำนวณด้วย MATLABTM (ภาคผนวก ก-3) โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อัลกอริทึมของการคำนวณแบบจำลอง

3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

3.5.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของเนื้อที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยกำหนดให้มีค่าคงที่ที่ 1053 kg/m^3 (Agnelli และ Mascheroni, 2000)

3.5.2 ค่าความจุความร้อนโดยรวม

ค่าความจุความร้อนโดยรวมที่ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการสำรวจเอกสาร 2 แหล่ง คือ

- **Tocci (1997)** ซึ่งเสนอความสัมพันธ์ของค่าความจุความร้อนโดยรวมเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นโดยตัวอย่างได้รับความร้อนจากอุณหภูมิ -40°C ถึง 40°C โดยใช้ Differential scanning calorimetry (DSC) ความสัมพันธ์แสดงดังนี้

$$\text{for } T < T_f, C_p = (-0.055 + 0.662w) - \frac{(233.883 - 2115.116w)}{(T-1)^2} - \frac{(72.5 - 4230.208w)}{(T-1)^3} \quad (3.21)$$

$$\text{for } T \geq T_f, C_p = 1.920 + 1.433w \quad (3.22)$$

w คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (decimal)

T_f คือ อุณหภูมิเยือกแข็งเริ่มต้นของตัวอย่างเนื้อ -1°C โดยประมาณ

- **Schwartzberg (1976)** ซึ่งมีการดัดแปลงจากสมการการลดลงของจุดเยือกแข็ง (freezing point depression) ดังสมการ:

$$\text{for } T < T_f, C_p = C_{po} + [w - b(1-w)] \left[C_{pi} - C_{pw} - \frac{\lambda T_f}{T^2} \right] \quad (3.23)$$

$$\text{for } T \geq T_f, C_p = C_{po} \quad (3.24)$$

C_{po} คือ ความจุความร้อนของตัวอย่างที่ไม่ได้แช่เยือกแข็ง $= 3.48 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$

C_{pi} คือ ความจุความร้อนของน้ำแข็ง $= 2.093 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$

C_{pw} คือ ความจุความร้อนของน้ำ $= 4.22 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$

b คือ ปริมาณน้ำไมอิสระ (bound water) $= 0.255$

λ คือ ความร้อนของการละลายน้ำแข็ง $= 335 \text{ kJ/kg}$

3.5.3 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

ค่าการนำความร้อนที่ใช้ในแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนได้จากงานวิจัยของ [Tocci \(1997\)](#) ซึ่งทดลองในช่วงสภาวะไม่คงตัว (Transient) โดยใช้ line heat source thermal conductivity probe ได้ความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิ ดังสมการ:

$$\text{for } T < T_f, \quad k = 1.1424 - 9.178 \times 10^{-3} T + \frac{0.5993}{T} \quad (3.25)$$

$$\text{for } T \geq T_f, \quad k = 0.4866 + 8.1560 \times 10^{-4} T \quad (3.26)$$

3.5.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective Heat Transfer Coefficient)

ในกระบวนการแช่เยือกแข็ง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) มีค่าเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงของการแช่เยือกแข็ง สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการแช่เยือกแข็งแบบโครโอจินิกและแบบเป่าลมเย็นมีค่าเท่ากับ 235 และ 40 W/m² °C ตามลำดับ ([Agnelli และ Mascheroni, 2000](#)) สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในกรณีตัวกลางเป็นสารละลายน้ำเกลือมีค่าเท่ากับ 210 W/m² °C ([Lucas และ Raoult-Wack, 1998](#))

บทที่ 4

วัสดุและวิธีการดำเนินการทดลอง

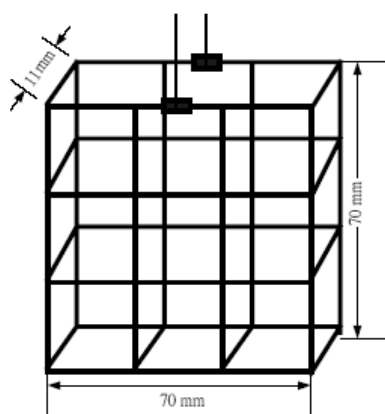
สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) ทำโดยเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ จากการทำนายด้วย MATLABTM กับผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากการทดลองเกี่ยวกับการแช่เยือกแข็งแบบไครโอแมคคานิคของอาหารมีค่อนข้างจำกัด พบเพียงงานวิจัยของ Lan และ Farid (2004) ซึ่งแช่แข็งเนื้อวัวหนา 10 mm โดยแบ่งการแช่เยือกแข็งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกจุ่มลงในไนโตรเจนเหลว ตามด้วยจุ่มลงในสารละลายน้ำเกลือ

4.1 วัสดุดิบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ เนื้อวัวดิบ ตัดให้มีรูปร่างแบบ bologna โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm และหนา 10 mm

4.2 วิธีการดำเนินการทดลอง

นำตัวอย่างเนื้อวัววางบนตะแกราสแตนเลสแสดงดังรูป 4.1



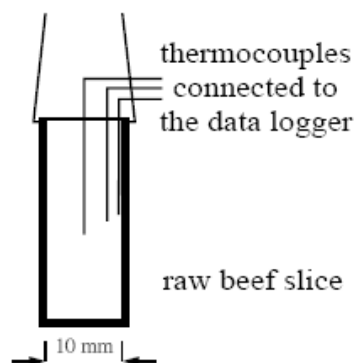
รูปที่ 4.1 ตะแกราสแตนเลส

วัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ได้แก่ ที่จุดกึ่งกลาง (5 mm จากผิว) 3 mm และใกล้ผิวด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K แสดงดังรูปที่ 4.2

บันทึกข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (ADC-16 High Resolution Data Logger) ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Excel[®]

วางตัวอย่างเนื้อ แล้วจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวซึ่งบรรจุอยู่ภาชนะที่หุ้มฉนวนเป็นเวลา 30 วินาที

นำตัวอย่างจุ่มอย่างรวดเร็วในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 20% wt/wt ซึ่งมีอุณหภูมิ -15°C โดยประมาณ จุ่มตัวอย่างในน้ำเกลือจนกระทั่งอุณหภูมิใจกลางของตัวอย่างเท่ากับ -14°C



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิ้ล

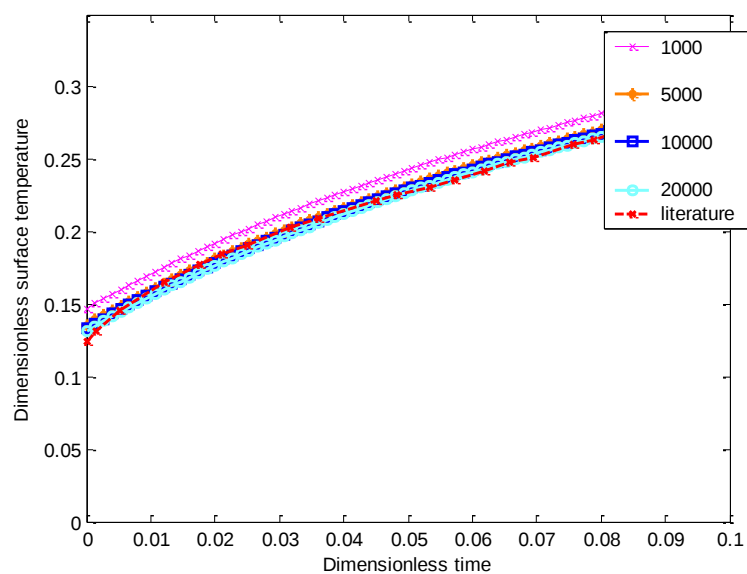
บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงกลไกการถ่ายโอนความร้อนของการแช่แข็งแบบไครโอแมคคานิคด้วยสมการไฮเพอร์โบลิกในช่วงการแช่แข็งแบบไครโอจินิกและสมการพาราโบลิกสำหรับช่วงการแช่แข็งแบบเชิงกล คำตอบของสมการเป็นคำตอบแบบไฮบริด (Hybrid solution) กล่าวคือ คำตอบของสมการไฮเพอร์โบลิกจะเป็นคำตอบเชิงวิเคราะห์ (Analytical solution) และคำตอบของสมการพาราโบลิกจะเป็นคำตอบเชิงตัวเลข (Numerical solution) โดยคำนวณด้วยโปรแกรม MATLABTM คำตอบจากการคำนวณจะนำมาตรวจสอบความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากการสำรวจเอกสาร ซึ่งใช้ในโตรเจนเหลวและสารละลายน้ำเกลือ (-15°C) ในสองขั้นตอน ตามลำดับ เพื่อหาเวลาในการประมวลผลที่สั้นที่สุด ในบทนี้จะกล่าวถึงการหาจำนวนพจน์ของอินทิกรัลฟังก์ชัน $I(z)$ ของคำตอบของสมการไฮเพอร์โบลิก การหาเงื่อนไขความมีเสถียรภาพของการคำนวณเชิงตัวเลข และสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดลอง

5.1 การหาจำนวนพจน์ที่เหมาะสมในการอินทิเกรตเชิงวิเคราะห์สำหรับการหาคำตอบแบบไฮเพอร์โบลิก
คำตอบของสมการไฮเพอร์โบลิกของ Antaki (1997) ฟังก์ชัน $I(z)$ เป็นอินทิกรัลฟังก์ชัน การคำนวณจะใช้วิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical integration) แบบ Trapezoidal method หาอัตราส่วนอนุกรมที่ผิวเปรียบเทียบคำตอบจากการสำรวจเอกสารซึ่งได้จากคำตอบแม่นยำ (Exact solution)

รูปที่ 5.1 แสดงอนุกรมที่ผิวแบบไร้หน่วยที่ได้จากการเปลี่ยนจำนวนพจน์เท่ากับ 1000, 5000, 10000 และ 20000 เปรียบเทียบกับการวิธีเชิงวิเคราะห์ โดยใช้พารามิเตอร์จากงานของ Antaki (1997) พบว่าคำตอบจากการใช้พจน์จำนวน 20000 ส่งผลให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามต้องใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์ 2.8 GHz ที่มี RAM 224 MB อย่างไรก็ตาม ผลการทำนายเมื่อใช้พจน์ในการอินทิเกรตเท่ากับ 10,000 แสดงผลที่มีเช่นเดียวกับผลจากวิธีเชิงวิเคราะห์ แต่ใช้เวลาน้อยกว่า (~10 นาที) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้จำนวนพจน์เท่ากับ 10,000 สำหรับทำนายช่วงการแช่แข็งแบบไครโอจินิก



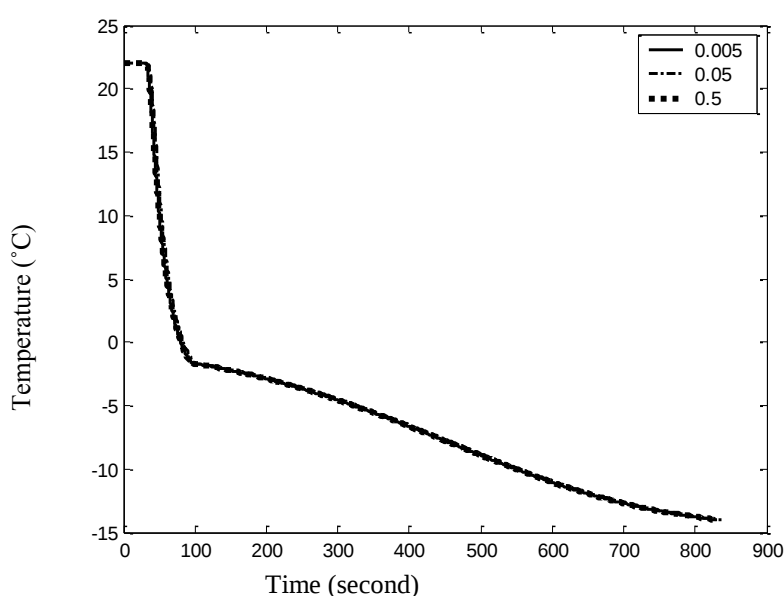
รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวไร้นหน่วยที่คำนวณจากจำนวนพจน์ที่แตกต่างกัน
และจากงานวิจัยที่ผ่านมา

ตารางที่ 5.1 เวลาที่ใช้สำหรับจำนวนพจน์ในการอินทิเกรต

จำนวนพจน์	เวลา (s)
1000	39.2
5000	187.0
10000	624
20000	3544

5.2 การหาเงื่อนไขเสถียรภาพ (Stability Criterion)

ในช่วงการแก้เชิงแบบเชิงกล วิธีเชิงตัวเลขแบบชัดแจ้ง (Explicit method) ถูกนำมาใช้โดยวิเคราะห์ความถูกต้องด้วย time-step และ grid space sizes ซึ่งแสดงด้วยค่าเกณฑ์เสถียรภาพ หาก time-step และ grid space sizes ยิ่งต่ำ ความถูกต้องยิ่งสูงขึ้น แต่จะใช้เวลานานการประมวลผลนานขึ้น ดังนั้น กำหนดค่าเกณฑ์เสถียรภาพให้ผันแปรอยู่ในช่วง 0.5, 0.05 และ 0.005 เพื่อให้มั่นใจว่า ความแม่นยำของคำตอบจะไม่ขึ้นกับเงื่อนไขเสถียรภาพ จากรูปที่ 5.2 พบว่าไม่มีความแตกต่างภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพที่ต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเกณฑ์เสถียรภาพที่ 0.5 เพื่อลดเวลาในการคำนวณ

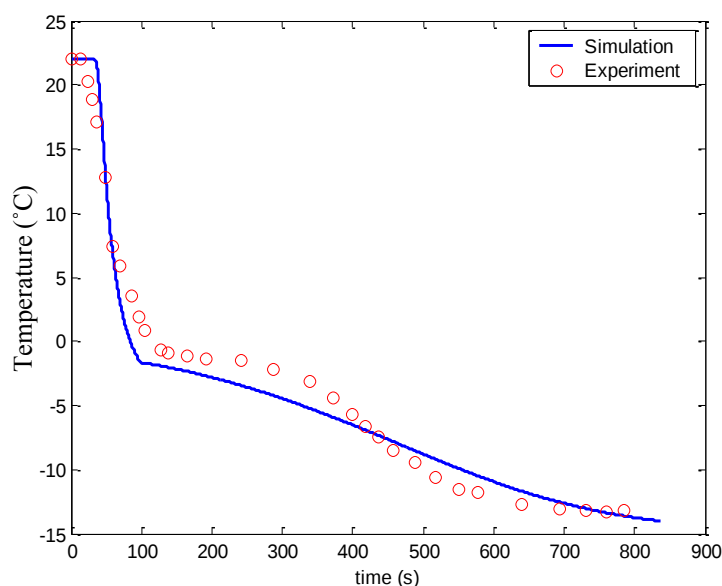


รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบการจำลองอุณหภูมิใจกลางด้วยค่าเกณฑ์เสถียรภาพค่าต่าง ๆ

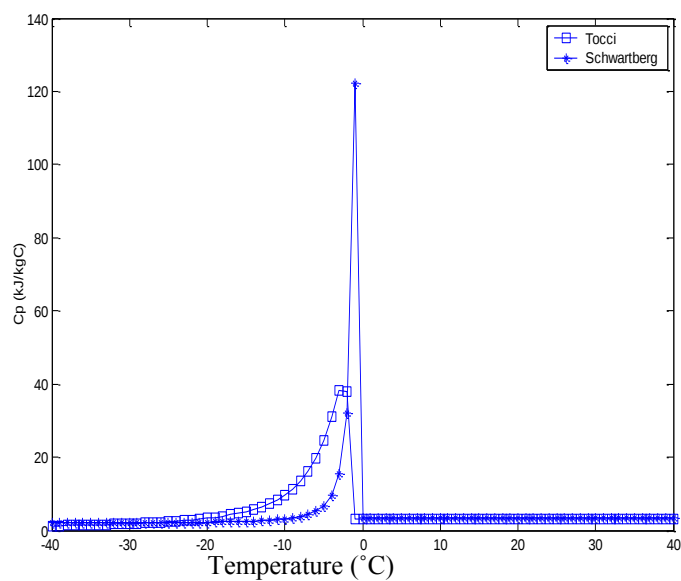
5.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนระหว่างการแช่เยือกแข็ง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนที่แก้สมการหาคำตอบด้วยโปรแกรม MATLAB™ ทำโดยใช้ข้อมูลจากการทดลองของ Lan และ Farid (2004) โดยใช้ค่าความจุความร้อนโดยรวม (C_p) จาก Tocci และคณะ (1997) ซึ่งหาค่าความจุความร้อนของตัวอย่างเนื้อ 14-18 มิลลิกรัมด้วยวิธี DSC (Differential Scanning Calorimetry) ซึ่งเป็นกระบวนการละลาย (Thawing) โดยเริ่มจากการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำกว่า -40°C ด้วยอัตรา $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิ 40°C รูปที่ 5.3 แสดงอุณหภูมิใจกลางตัวอย่างที่ได้จากทำนายเปรียบเทียบกับอุณหภูมิจากการทดลองที่ใช้ค่าความจุความร้อนตามที่เสนอโดย Tocci และคณะ พบว่ามีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้น โดยเฉพาะช่วงการเปลี่ยนสถานะ

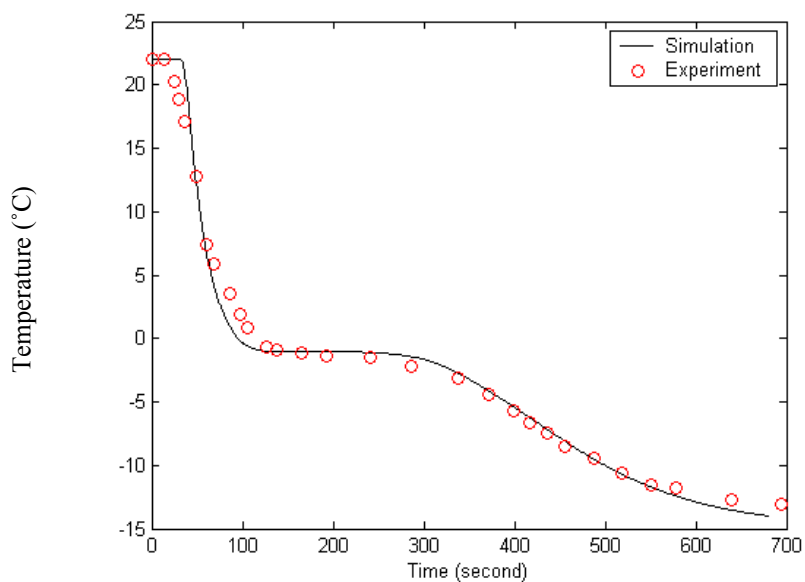
เพื่อหาสาเหตุของการเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าความจุความร้อน ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนที่ได้จาก DSC ที่ได้จากกระบวนการละลายกับค่าที่ได้จากวิธี Theoretical adiabatic calorimetry (Schwartzberg, 1976) ดังแสดงในรูปที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าค่าความจุความร้อนจากกระบวนการละลายในช่วงการเปลี่ยนสถานะจะมีค่าสูงและกว้างกว่าวิธีอะเดียบติกแคลอริเมตรี Morley และ Fursey (1988) แสดงให้เห็นว่า ค่าเอนทัลปีและค่าความจุความร้อนของกระบวนการทำเย็นมีค่าต่ำกว่าการให้ความร้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งอาหารที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบ การเปลี่ยนสถานะในกระบวนการแช่แข็งจะเกิดช้ากว่าการให้ความร้อนเนื่องจากการเกิด *supercooling* ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของอาหาร ดังนั้น การใช้ค่าสมบัติทางความร้อนของอาหารในแบบจำลองจึงขึ้นกระบวนการด้วย เมื่อปรับเปลี่ยนค่าความจุความร้อน (C_p) จากข้อมูลของ Schwartzberg (1978) พบว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิใจกลางตัวอย่างที่ได้จากการทดลองและทำนายดีขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.5 โดยเฉพาะข้อมูลในช่วงการเปลี่ยนสถานะ



รูปที่ 5.3 อุณหภูมิใจกลางตัวอย่างที่ได้จากผลการทดลอง (Lan และ Farid, 2004) และการทำนายของตัวอย่างที่หนา 1 cm โดยจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 วินาที ตามด้วยจุ่มลงในน้ำเกลือโดยใช้ค่าความจุความร้อนโดยรวมของ Tocci และคณะ (1997)



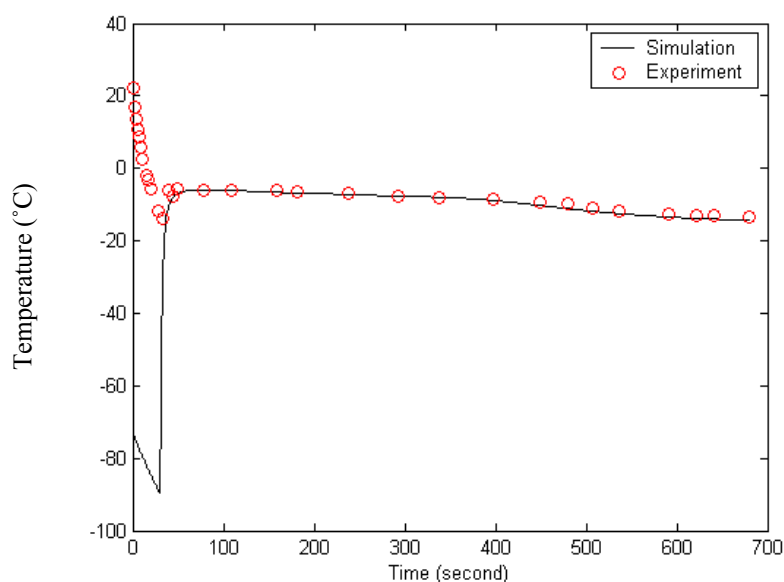
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนโดยรวมที่ได้จาก Tocci และคณะ(1997)และ Schwartzberg (1978)



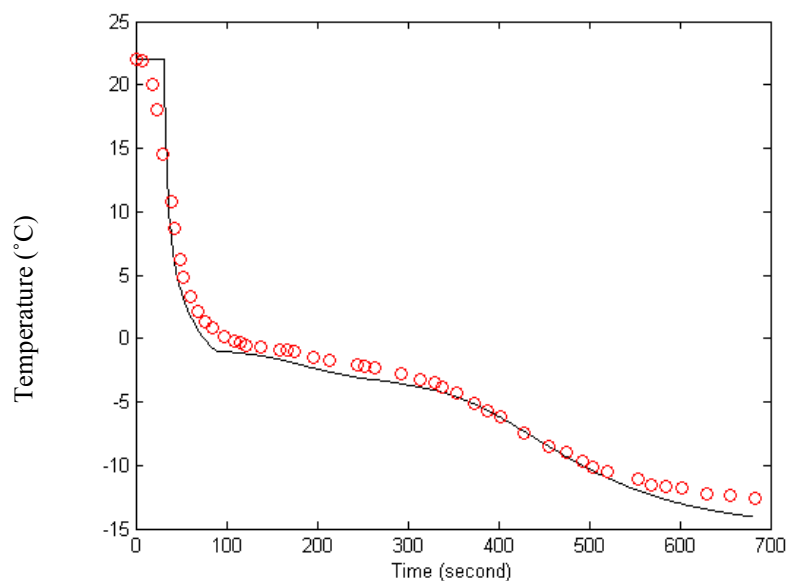
รูปที่ 5.5 อุณหภูมิใจกลางตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง (Lan และ Farid, 2004) และการทำนายของตัวอย่างที่หนา 1 cm โดยจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 วินาที ตามด้วยจุ่มลงในน้ำเกลือโดยใช้ค่าความจุความร้อนโดยรวมของ Schwartzberg (1978)

รูปที่ 5.6 แสดงอุณหภูมิใกล้ผิวตัวอย่างที่ได้จากการทำนายเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Lan และ Farid (2004) อุณหภูมิที่ได้จากการทำนายด้วยสมการไฮเพอร์โบลิกจะมี Step change ของอุณหภูมิที่ผิว ซึ่งไม่สามารถสังเกตได้ จากการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถวัดอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างได้ แต่วัดได้เพียงอุณหภูมิใกล้ผิว ซึ่งมีแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิเช่นเดียวกับผลการทำนาย ข้อผิดพลาดอีกประการหนึ่ง อาจเกิดจากความล่าช้าของสัญญาณจากการวัดอุณหภูมิเอง

รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิลึกจากผิวตัวอย่าง 3 มิลลิเมตร ที่ได้จากผลการทดลอง (Lan and Farid, 2004) และการทำนาย พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องอย่างดี เมื่อใช้ค่าความจุความร้อนโดยรวมจาก Schwartzberg (1976) ยกเว้นที่จุดเริ่มต้น จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิใจกลางลดลงเมื่อตัวอย่างจุ่มลงในตัวกลางให้ความเย็น อาจเกิดเนื่องจากเทอร์โมคัปเปิ้ลมีค่าการนำความร้อนสูง ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนจากแวนดลัมสู่ในกลางตัวอย่างผ่าน probe ของเทอร์โมคัปเปิ้ล (Jumras, 2003)



รูปที่ 5.6 อุณหภูมิใกล้ผิวตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง (Lan และ Farid, 2004) และการทำนายของตัวอย่างที่หนา 1 cm โดยจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 วินาที ตามด้วยจุ่มลงในน้ำเกลือ



รูปที่ 5.7 อุณหภูมิจากผิวตัวอย่าง 3 mm ที่ได้จากการทดลอง (Lan และ Farid, 2004) และ
การทำนายของตัวอย่างที่หนา 1 cm โดยจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 วินาที ตาม
ด้วยจุ่มลงในน้ำเกลือ

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนาย สรุปได้ว่า กลไกการถ่ายโอนความร้อนของอาหารใน
กระบวนการแช่แข็งแบบไครโอแมคคานิค สามารถแบ่งกระบวนการออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงการแช่แข็ง
แบบไครโอจินิกซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการไฮเพอร์โบลิก และช่วงการแช่แข็งเชิงกลซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการ
พาราโบลิก และค่าความจุความร้อนที่ใช้ในการทำนายต้องสอดคล้องกับกระบวนการ กล่าวคือ กระบวนการ
เย็นต้องใช้ค่าความจุความร้อนที่หาจากกระบวนการทำเย็น

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ เพื่อปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอาหารระหว่างการแช่เยือกแข็งแบบไครโอแมคคานิก เพื่อทำนายเวลาทั้งหมดในการแช่เยือกแข็งให้ถูกต้องยิ่งขึ้น ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้ มักใช้สมการพาราโบลิก หรือ สมการ Fourier ในการอธิบายกลไกการถ่ายโอนความร้อนของการแช่แข็งทุกแบบ งานวิจัยนี้ เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนความร้อนโดยแบ่งตามขั้นตอนการแช่แข็งเป็น การแช่แข็งช่วงไครโอจินิกโดยอธิบายการถ่ายโอนความร้อนด้วยสมการไฮเพอร์โบลิก หรือสมการ Non-Fourier เนื่องจากมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่สูงมาก ส่วนการแช่แข็งเชิงกลยังคงใช้สมการพาราโบลิกอธิบายกลไก เช่นเดิม คำตอบของสมการเป็นแบบไฮบริด กล่าวคือ ช่วงแรกเป็นคำตอบเชิงวิเคราะห์และช่วงที่สองเป็นคำตอบเชิงตัวเลข คำตอบที่ได้ถูกนำไปทดสอบความถูกต้อง (Validation) กับผลการทดลองจากการทำวาลูเอชัน โดยใช้ตัวอย่างเนื้อรูปทรงแผ่นราบ (Slab) จุ่มลงในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -196°C เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นจุ่มลงในสารละลายน้ำเกลืออุณหภูมิ -15°C จนกระทั่งอุณหภูมิใจกลางตัวอย่างมีอุณหภูมิตามที่กำหนด

เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายกับผลจากการทดลอง พบว่าการใช้ค่าสมบัติเชิงความร้อนและกายภาพที่เหมาะสมมีผลอย่างมากต่อการแก้ปัญหาที่มีการเปลี่ยนเฟส ความสัมพันธ์ของค่าความจุความร้อนโดยรวมที่เสนอโดย Schwartzberg (1978) ที่ได้มีการดัดแปลงสมการเชิงทฤษฎีของการทดลองของอุณหภูมิเยือกแข็ง ให้ผลการทำนายอุณหภูมิที่สอดคล้องผลการทดลองโดยเฉพาะในช่วงการเปลี่ยนสถานะ อย่างไรก็ตาม การเกิด step change ของอุณหภูมิผิวตามทฤษฎีของสมการไฮเพอร์โบลิกในช่วงแรกของการแช่แข็งไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากไม่สามารถวัดอุณหภูมิผิวที่แท้จริงได้ วัดได้เพียงอุณหภูมิใกล้ผิวซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทำนาย สำหรับตำแหน่งที่ลึกจากผิว 3 มิลลิเมตร พบว่าผลการทำนายสอดคล้องกับการทดลอง ยกเว้นที่จุดเริ่มต้น ซึ่งอาจมีผลของการนำความร้อนผ่าน probe ของเทอร์โมคัปเปิ้ลระหว่างการวัดอุณหภูมิ กล่าวโดยสรุป กระบวนการแช่แข็งแบบไครโอจินิกซึ่งมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงควรใช้สมการไฮเพอร์โบลิกในการอธิบายกลไกการถ่ายเท

ข้อจำกัดของแบบจำลองที่นำเสนอ ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากบางส่วนใช้วิธีการหาคำตอบเชิงวิเคราะห์ซึ่งได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งอยู่บนพื้นฐานของสถานะที่มีรูปร่าง semi-infinite slab ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถใช้ได้กับสถานะแวดล้อมที่อุณหภูมิใจกลางไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากสิ้นสุดช่วงไครโอจินิกซึ่งขึ้นกับความหนาของตัวอย่างและเวลาในการจุ่มลงในไนโตรเจนเหลว

ข้อเสนอแนะ

สมบัติเชิงความร้อนและกายภาพ เช่น C_p และ k ควรใช้ที่อุณหภูมิเข้าใกล้ศูนย์สัมบูรณ์ (-273°C) เพื่อปรับปรุงให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Agnelli M.E. and Mascheroni, R.H., 2000, Cryomechanical Freezing: A Model for Heat Transfer Process, **J. Food Eng.**, Vol. 47, pp. 263-270.
- Agnelli, M.E. and Mascheroni, R.H., 2001, “Cryomechanical Freezing A Model for the Heat Transfer Process”, **Journal of Food Engineering**, Vol. 47, pp. 263-270.
- Agnelli, M.E. and Mascheroni, R.H., 2002, “Quality Evaluation of Foodstuffs Frozen in a Cryomechanical Freezer”, **Journal of Food Engineering**, Vol. 52, pp. 257-263.
- Antaki, P.J., 1997, “Analysis of Hyperbolic Heat Conduction in a Semi-infinite Slab with Surface convection”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 40, No. 13, pp. 3247-3250.
- Bald W.B., 1991, Ice Crystal in Idealized Freezing Systems, In *Food Freezing Today and Tomorrow*, Bald, W.B. (Ed.), Springer-Verlage, London, pp. 60-86.
- Fellows P., 2000, **Food Process Technology: Principles and Practice**, 2nd ed., CRC Press., pp. 418-439.
- Gennadios, A., Hanna, M.A. and Ling, D., 1997, Effect of Frozen Storage on Deep-fat Fried Breaded Onion, **International Journal of Food Science and Technology**, Vol.32, pp. 121-125.
- Jumras, B., 2003, **Economic Comparison of Cryomechanical Freezing and Conventional Freezing of Minced Pork Steamed Bun**, Master of Engineering Thesis, Food Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 89 p.
- Lan, S.H. and Farid, M.M., 2004, “Experimental Analysis of Cryogenic Freezing of Food”, **Journal of Chemical Engineering of Japan**, Vol. 37, No. 2, pp. 304-309.
- Leeratanarak, N., Peamprasart, T. and Sathianpattaratane, P., 2004, **Finite Difference Scheme for Cryomechanical Freezing of Meatball**, Master of Engineering Report, Food Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 53 p.
- Morley, M.J. and Fursey, G.A.Y., 1988, “The Apparent Specific Heat and Enthalpy of Fatty Tissue During Cooling”, **International Journal of Food Science and Technology**, Vol. 23, pp. 467-477.
- Ramaswamy, H. and Marcotte., 2006, Low-Temperature Preservation, In **Food Processing: Principles and Applications**, Taylor & Francis Group, The USA, pp. 200-201.
- Schwartzberg, H.G., 1978, “Effective Heat Capacities for the Freezing and Thawing of Food”, **Journal of Food Science**, Vol. 41, pp. 152-156

Tocci, A.M., Flores, E.S.E. and Mascheroni, R.H., 1997, "Enthalpy, Heat Capacity and Thermal Conductivity of Boneless Mutton between -40°C and +40°C", **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, Vol. 30, pp. 184-191

ภาคผนวก

n1. Script File for the Effective Heat Capacities of Sample

```

%The effective heat capacity correlation of sample obtained from Schwartzberg
function Cp=Cpf(T)
w=0.6;           %the initial moisture content of sample (decimal)
Tf=-1;           %the initial freezing temperature of sample(C)
D=1053;           %the density of sample (kg/m3)
Cpo=3.48;         %the effective heat capacity of unfrozen food (kJ/kg C)
Cpw=4.22 ;        % the effective heat capacity of liquid water (kJ/kg C)
Cpi=2.093 ;       % the effective heat capacity of ice (kJ/kg C)
b=0.255;         %amount of bound water
lamda=335;        %the latent heat of fusion of ice (kJ/kg)
for i=1:max(size(T))
    if T(i)>=Tf
        Cp(i)=D*1000*Cpo;    %(J/m3 C)
    else %when T<Tf
        Cp(i)=D*1000*(Cpo+(y0-b*(1-y0))*(Cpi-Cpw-lamda*Tf/T(i)^2)); %(J/m3 C)
    end
end
end

```

ñ2. Script File for the Thermal Conductivity of Sample

```
%The thermal conductivity of sample obtained from Tocci
function k=kf(T)
w=0.6;           %the initial moisture content of sample (decimal)
Tf=-1;           %the initial freezing temperature of sample(C)
for i=1:max(size(T))
    if T(i)>=Tf
        k(i)=0.4866+8.156e-4*T(i);           % (w/m C)
    else %when T<Tf
        k(i)=1.1424-9.0178e-3*T(i)+0.5993/T(i);
    end
end
end
```

n3. Script File for Computational of the Temperature Profile

```

clc;                %clear command window
clear;              %clear variable

fclose('all')
delete *.txt
f5 = fopen('Tc.txt','w+');
t1=input('Enter the dipping time(sec) ');
%=====
%define parameters
%=====
L=0.005;            %half of thickness of sample(m)
dx=0.001;           %grid distance (m)
T0=22;              %initial sample temperature(degreeC)
s=0.5;              %the stability criteria of calculation
time=0;             %initial time (second)
%=====
%calculate number of nodes
%=====
n0=ceil(L/dx);
n=n0+1;             %number of node
N=[0:n];
T=T0*ones(1,n);
dT=zeros(1,n);      %dimensionless temperature
X=dx.*N;            %location of each node
dt=(s*Cpf(T0)*(dx^2))/(kf(T0)); %time step of calculation
while max(T)>-14 %core temp higher than -14 degreeC
    if time<=t1 %during cryogenic stage
        dt=1; %time step of calculation (second)
        Tinf=-196; %ambient temperature in C-degree
        h=235; %convective heat transfer coefficient (W/m2 degreeC)
        thr=40; %thermal relaxation time of sample (second)
        alpha=kf(-40)/Cpf(-40); %thermal diffusivity at -40 degreeC (m/s2)
    end
end

```

```

ditime=time*alpha*(h^2)/(kf(-40)^2);    %dimensionless time
diX=X.*h/kf(-40);                      %dimensionless location
dithr=thr*alpha*h^2/kf(-40)^2;          %dimensionless thermal relaxation time
z=[dithr:0.01:10000];                   %the number of integral term
% Determine the temperature profile for each node
%=====
for i=1:n
    alpai=kf(-1)/Cpf(-1); %thermal diffusivity at -1 degreeC (m/s2)
    c=(alpai/thr)^0.5;     %thermal wave speed(m/s)
    W=c*time;              %location of wave front (m)
    if X(i) <= W           %location in front of the wave front
        H=1;               %the step unit function
        y=(z.\exp(z.\-ditime)).*((z-dithr).*sin((z.\diX(i)).*((z-dithr).^0.5))+...
            ((z-dithr).^(1/2)).*cos((z.\diX(i)).*((z-dithr).^0.5)))/(1+(z-dithr));
        I=trapz(z,y);
        diT(i)=(1-I/pi)*H;    %dimensionless temperature at node i
        T(i)=diT(i)*(Tinf-T0)+T0; %temperature at node i
    else %location beyond the wave front
        diT(i)=0;
        T(i)=T0;
    end
end
end
else %time>t1 during mechanical stage
    h=210; %convective heat transfer coefficient (W/m2 degreeC
    Tinf=-15; %the ambient temperature
    %Checking stability at the surface node
    s=(kf(T(1))*dt)/(Cpf(T(1))*(dx^2));
    if s>=0.5
        dtc=(0.5*Cpf(T(1))*(dx^2))/(kf(T(1)));
        dt=dtc;
    end
    % Determine the new temperature of the internal nodes
    %=====
    for i=2:n-1

```

```

vi=1;    % volume factor at node i
aph=1;    % area factor at half forward node i
anh=1;    % area factor at half backward node i
Qp=aph*0.5*(kf(T(i-1))+kf(T(i)))*(T(i-1)-T(i));
Qn=anh*0.5*(kf(T(i))+kf(T(i+1)))*(T(i)-T(i+1));
Tn(i)=T(i)+((dt/(vi*dx^2))*(Qp-Qn))/Cpf(T(i));
end

% Determine the new temperature at the surface node (i=1)
%=====
v1=(1/2);
a1=1;
an1=1;
Q1h=a1*dx*h*(Tinf-T(1));
Qn1e=an1*0.5*(kf(T(1))+kf(T(2)))*(T(1)-T(2));
Tn(1)= T(1)+((dt*(Q1h-Qn1e)/(v1*dx^2)))/Cpf(T(1));
%Determine the new temperature at central node(i=n) assumming that it is insulated.
%=====
vn=1/2;
an=1;
%a2=(1+(1/2))^2;
Qnn=an*0.5*(kf(T(n))+kf(T(n-1)))*(T(n-1)-T(n));
Tn(n)=T(n)+(dt*(Qnn-0)/(vn*dx^2))/Cpf(T(n));
T=Tn
end
fprintf(f5,'%5.5f %5.5f %5.5f %5.5f %5.5f %5.5f %5.5f\n',time,T);
time=time+dt %end of if condition "if time<t1 elseif time>ti"
end %end of while loop
fclose('all')

```