

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหาร
COMPUTER PROGRAM FOR THE PREDICTION OF
FREEZING TIME OF FOOD PRODUCTS



ที่
ท 3
ค 548

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 42321
วัน, เดือน, ปี 7 พ.ค. 2545

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขา วิศวกรรมอาหาร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5115016 57

ปริญญาโทปีการศึกษา 2543

ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำนายเวลาในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหาร

ผู้จัดทำ

นายทัศนัย

คงสุข

นางสาวระพีพรรณ

จิระพิเชฐ

นางสาวสุภาวดี

ชูสมภพ



พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์

(อาจารย์ที่ปรึกษา)

(ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหาร

นายทัศนัย คงสุข
นางสาวระพีพรรณ จิระพิเชษฐ
นางสาวสุภาวดี ชูสมภพ

ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการแช่แข็ง การเลือกสภาวะการแช่แข็งที่เหมาะสม จะทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้มีคุณภาพดีเป็นไปตามต้องการของผู้บริโภค ซึ่งการทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง จึงทำให้ยุ่งยากและเสียเวลาในการคำนวณ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารจึงได้ถูกจัดสร้างขึ้นบนโปรแกรม Microsoft Visual Basic 6.0 เพื่ออำนวยความสะดวกในการทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารทั้ง 2 วิธี คือ วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) แบ่งเป็น Plank's Equation (1913), Nagaoka's Equation (1955), Pham's Equation (1984, 1985) กับวิธีเชิงเลข (Numerical Method) ซึ่งอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี (Mannapperuma and Singh, 1988)

โปรแกรมนี้ใช้ได้ทั้งผู้ที่เชี่ยวชาญและไม่เชี่ยวชาญในด้านการแช่แข็ง เพื่อทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง โดยให้ค่าคุณสมบัติของอาหารและสภาวะการแช่แข็ง การเปรียบเทียบผลการคำนวณเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งจากวิธีต่างๆ จะช่วยให้เข้าใจสมมติฐานของแต่ละสมการได้ดีขึ้น และผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งจะทำให้สามารถเลือกสภาวะการแช่แข็งที่เหมาะสมได้

COMPUTER PROGRAM FOR THE PREDICTION OF FREEZING TIME OF
FOOD PRODUCTS

Mr. Tassanai Kongsuk

Ms. Rapeephan Chiraphichet

Ms. Supavadee Chusompop

Dr. Pimpen Pornchalermpong Advisor

2000

Abstract

The qualities of frozen food product are directly related to rate of freezing. The suitable freezing rate will provide a good quality product with economical operation cost. Prediction of freezing time, which is a function of several factors, requires a complicate and tedious calculation.

A user friendly computer program for the prediction of freezing time of food products was developed on Microsoft Visual Basic 6.0. The program predicts freezing time using 2 methods; Analytical method (Plank's Equation (1913), Nagaoka's Equation (1955) and Pham's Equation (1984, 1985)) and Numerical method (Mannapperuma and Singh, 1988).

This program facilitates both professional and non-specialist in the field of food freezing to estimate freezing time when food's properties and freezing conditions are given. The results of freezing time calculated from different methods could be compared for the better understanding of each equation's basic assumptions. The effect of the parameters on freezing time can be easily evaluated and enable operator to chose suitable freezing conditions effectively.

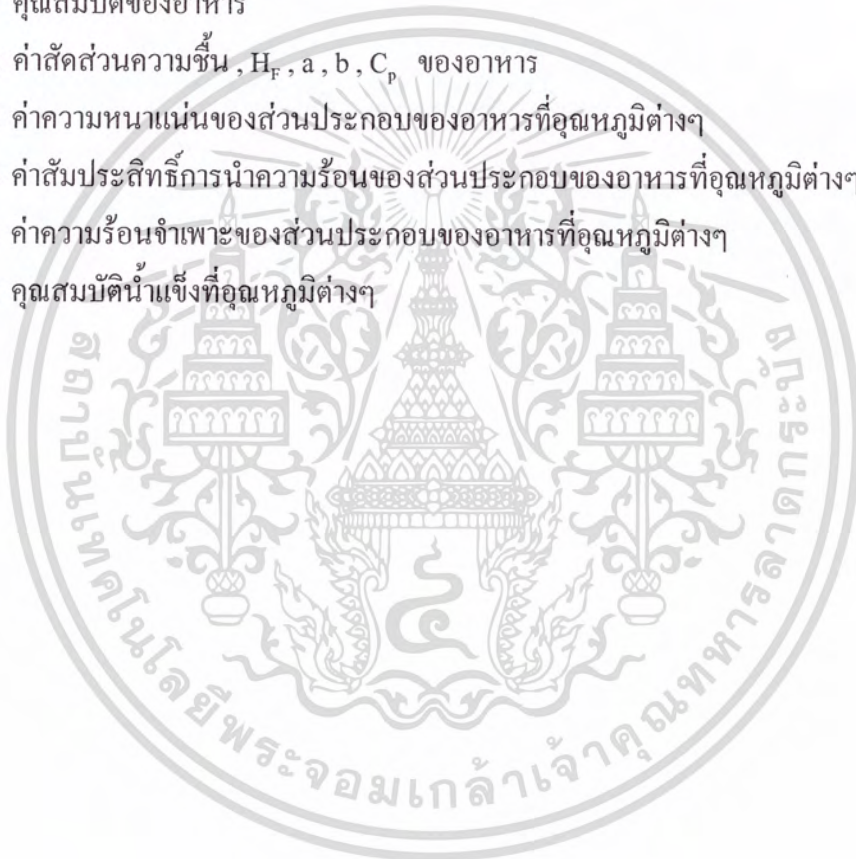
สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ข
สารบัญรูปภาพ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 คำนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสารและแหล่งข้อมูล	3
2.1 การแช่แข็งอาหาร	3
2.2 อัตราการแช่แข็ง	3
2.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทำนายเวลาที่แช่แข็งอาหาร	5
บทที่ 3 การคำนวณเวลาในการแช่แข็ง	20
3.1 Plank's Equation	21
3.2 Pham's Equation	22
3.3 Nagaoka's Equation	23
3.4 Numerical Method	25
บทที่ 4 การออกแบบและจัดสร้าง โปรแกรม	30
4.1 Plank's Equation	32
4.2 Pham's Equation	36
4.3 Nagaoka's Equation	40
4.4 Numerical Method	45
4.5 การทดสอบโปรแกรม	49
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	52
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก	55
ภาคผนวก ข	59
กิตติกรรมประกาศ	66
บรรณานุกรม	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าอาหาร	6
ตารางที่ 3.1 แสดงค่า Shape Factor ขึ้นกับรูปร่างชิ้นอาหาร	29
ตารางที่ 4.1 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณและผลการคำนวณของแต่ละสมการ	49
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบเวลาในการแช่แข็งของผลิตภัณฑ์อาหารทั้ง 3 รูปร่าง	51
ตารางที่ ข.1 คุณสมบัติของอาหาร	59
ตารางที่ ข.2 ค่าสัดส่วนความชื้น, H_F , a , b , C_p ของอาหาร	63
ตารางที่ ข.3 ค่าความหนาแน่นของส่วนประกอบของอาหารที่อุณหภูมิต่างๆ	64
ตารางที่ ข.4 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของส่วนประกอบของอาหารที่อุณหภูมิต่างๆ	64
ตารางที่ ข.5 ค่าความร้อนจำเพาะของส่วนประกอบของอาหารที่อุณหภูมิต่างๆ	65
ตารางที่ ข.6 คุณสมบัติน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ	65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองการเปลี่ยนเฟสระหว่างการแช่แข็ง	18
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของ Infinite Slab	20
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของ Infinite Cylinder	20
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของ Sphere	21
รูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบกราฟแช่แข็งของน้ำบริสุทธิ์และอาหาร	24
รูปที่ 3.5 การแบ่งระยะใดๆในชั้นอาหารของ Infinite slab	27
รูปที่ 3.6 การแบ่งระยะใดๆในชั้นอาหารของ Infinite cylinder	27
รูปที่ 3.7 การแบ่งระยะใดๆในชั้นอาหารของ sphere	27
รูปที่ 4.1 หน้าจอต้อนรับเข้าสู่โปรแกรม	30
รูปที่ 4.2 หน้าจอการเลือกวิธีที่ใช้ในการคำนวณ	31
รูปที่ 4.3 หน้าจอการคำนวณวิธี Plank 's Equation	32
รูปที่ 4.4 หน้าจอแสดงค่าสภาวะการแช่แข็ง	33
รูปที่ 4.5 หน้าจอสมมติฐานของ Plank 's Equation	34
รูปที่ 4.6 หน้าจอแสดงผลและกราฟของ Plank 's Equation	35
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างหน้าจอคำเตือนเมื่อผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าไม่ถูกต้อง	36
รูปที่ 4.8 หน้าจอการคำนวณวิธี Pham 's Equation	36
รูปที่ 4.9 หน้าจอสมมติฐานของ Pham 's Equation	38
รูปที่ 4.10 หน้าจอแสดงผลของ Pham 's Equation	38
รูปที่ 4.11 หน้าจอแสดงกราฟ Time – h ของ Pham 's Equation	39
รูปที่ 4.12 หน้าจอแสดงกราฟ Temp – Time ของ Pham 's Equation	40
รูปที่ 4.13 หน้าจอการคำนวณวิธี Nagaoka 's Equation	41
รูปที่ 4.14 หน้าจอสมมติฐานของ Nagaoka 's Equation	42
รูปที่ 4.15 หน้าจอแสดงผลของ Nagaoka's Equation	43
รูปที่ 4.16 หน้าจอแสดงกราฟ Time – h ของ Nagaoka's Equation	44
รูปที่ 4.17 หน้าจอแสดงกราฟ Temp – Time ของ Nagaoka's Equation	44
รูปที่ 4.18 หน้าจอการคำนวณวิธี Numerical Method	45
รูปที่ 4.19 หน้าจอแสดงผลสมมติฐานของ Numerical Method	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 4.20 หน้าจอแสดงผลของ Numerical Method	47
รูปที่ 4.21 หน้าจอแสดงข้อมูลและกราฟของ Numerical Method บนโปรแกรม Excel	48
รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการแก้แ่งและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ จากสมการของ Nagaoka และ Pham	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

คำนำ

การลดอุณหภูมิด้วยวิธีการแช่แข็ง เป็นวิธีรักษาคุณภาพอาหารและยืดอายุการเก็บรักษาอาหารที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับกันมาก ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งออกผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งมากขึ้น คุณภาพของการแช่แข็งจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการแช่แข็ง คือ อัตราการแช่แข็งแบบช้าจะทำให้มีผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ และเกิดภายนอกเซลล์จะไปบีบให้เซลล์แตก หลังจากละลายน้ำแข็งแล้วอาหารจะมีส่วนของของเหลวภายในเซลล์ไหลออกมา แต่อัตราการแช่แข็งแบบเร็วจะเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กและเกิดขึ้นทั้งภายในและนอกเซลล์ ซึ่งจะไม่ทำให้อาหารเสียสภาพเมื่อละลายน้ำแข็ง โดยหลักการทั่วไปแล้วต้องการให้มีอัตราการแช่แข็งสูงสุดซึ่งได้ประโยชน์ทั้งกำลังการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค วิธีที่ใช้ในการทำนายเวลาในการแช่แข็งอาหารมีหลายวิธี เช่น Plank 's Equation (1913) Nagaoka 's Equation (1955) Pham 's Equation (1984, 1985) Numerical Method (Mannapperuma and Singh, 1988) เป็นต้น ซึ่งแต่ละสมการจะมีปัจจัยที่มีผลต่อการทำนายเวลาในการแช่แข็ง ได้แก่ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผลิตภัณฑ์ และตัวกลางทำความเย็น (Cooling Medium) คุณสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลางทำความเย็น ขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลในการทำนายเวลาในการแช่แข็ง ในการคำนวณโดยทั่วไปมีความยุ่งยากและเสียเวลา เพราะถ้าต้องการเปลี่ยนค่าต่างๆ เช่น ขนาด และรูปร่างของอาหาร ต้องทำการคำนวณใหม่ เนื่องจากขนาดและรูปร่างของอาหารมีผลต่อเวลาในการแช่แข็ง จึงได้ทำการออกแบบ และจัดสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายเวลาในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหาร

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้จัดทำขึ้นนั้นจะช่วยอำนวยความสะดวกรวดเร็วในการทำนายเวลาในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหาร ทำให้สามารถเลือกสภาวะแช่แข็งที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ได้

วัตถุประสงค์

ออกแบบ จัดสร้าง และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งอาหาร โดยใช้สมการเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) 3 สมการ คือ Plank 's Equation Nagaoka 's Equation Pham 's Equation และสมการเชิงเลข (Numerical Method) ซึ่งทำการศึกษาอาหารจำนวน 3 รูปร่าง คือ สี่เหลี่ยมจตุรัส (Infinite slab) ทรงกระบอกยาว (Infinite cylinder) และ ทรงกลม (Sphere)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตรวจเอกสารและแหล่งข้อมูล

2.1 การแช่แข็งของอาหาร

การแช่แข็ง (Freezing) คือ กระบวนการเก็บรักษาอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง เช่น 0 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ -18 องศาเซลเซียส (เจ็มทอง นิมจินดา, 2538) โดยเมื่อผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิต่ำลงจนต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และการเสื่อมเสียเนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ลดลง รวมถึงปฏิกิริยาทางเคมีอื่นๆ อันเนื่องมาจากเอนไซม์ และปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วย โดยมีจุดประสงค์การแช่แข็งเพื่อรักษากลิ่น รส สี เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางอาหารให้เหมือนหรือใกล้เคียงของสดมากที่สุด การแช่แข็งอย่างมีประสิทธิภาพสามารถทำให้เก็บรักษาอาหาร ไว้ได้นาน ซึ่งคุณภาพของอาหารที่ได้จากการแช่แข็งจะขึ้นอยู่กับกระบวนการแช่แข็งที่เลือกใช้ และสภาวะการเก็บในสภาพแช่แข็งด้วย โดยอัตราการแช่แข็ง หรือเวลาที่ใช้ลดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งเริ่มต้น ไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยจะมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของอาหาร เช่น บางผลิตภัณฑ์ต้องการการแช่แข็งอย่างรวดเร็ว (Rapid Freezing) ซึ่งใช้เวลาในการแช่แข็งสั้น เพื่อให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กมาก ภายในโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ และก่อให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อสัมผัสน้อยที่สุด แต่ในบางผลิตภัณฑ์อาจจะมีรูปร่าง และขนาดที่ไม่เหมาะกับการแช่แข็งอย่างรวดเร็ว ส่วนสภาวะอุณหภูมิต่ำที่เก็บ ก็มีผลต่อคุณภาพของอาหารแช่แข็งด้วย ถ้าอุณหภูมิต่ำที่เก็บเพิ่มขึ้น หรืออุณหภูมิต่ำที่เก็บมีการขึ้นๆลงๆ จะยิ่งทำให้คุณภาพของอาหารแย่มากขึ้น

2.2 อัตราการแช่แข็ง (Freezing Rate)

อัตราการแช่แข็งอาหารเป็นประเด็นสำคัญของกระบวนการแช่แข็ง เพราะมีผลต่อคุณภาพของอาหาร ซึ่ง Fenema (1973) ได้อธิบายอัตราการแช่แข็งไว้ 4 อย่างด้วยกันคือ

1. Time-temperature methods
2. Velocity of ice front
3. Appearance of Specimen
4. Thermal method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอัตราการแช่แข็งแบบที่นิยมเป็น Time-temperature methods ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ อุณหภูมิตที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา และช่วงเวลาที่ให้อุณหภูมิที่กำหนด มักนิยมใช้หรือแสดงอัตราการแช่แข็งแบบอุณหภูมิตต่อเวลา

The International Institute of Refrigeration (1971) เสนอนิยามไว้ว่า อัตราการแช่แข็งอาหาร คือ อัตราส่วนระหว่างระยะทางจากผิวหน้าชิ้นอาหารถึงจุดศูนย์กลางความร้อนของอาหาร กับช่วงเวลาดั้งแต่อุณหภูมิมิวน้ำอาหารเท่ากับศูนย์จนถึงเวลาที่อุณหภูมิจุดศูนย์กลางความร้อนของอาหารมีค่าน้อยกว่าจุดเยือกแข็ง 5 องศาเซลเซียส โดยที่ระยะทางวัดเป็นหน่วยเซนติเมตร และเวลาวัดเป็นหน่วยชั่วโมง อัตราการแช่แข็งจึงมีหน่วยเป็น เซนติเมตร / ชั่วโมง

โดยเราสามารถแบ่งช่วงอัตราการแช่แข็งได้ดังนี้

2.2.1 การแช่แข็งแบบช้า (Slow Freezing) คือ การทำให้อาหารแข็งตัวที่อุณหภูมิตประมาณจุดเยือกแข็งอย่างช้าๆ มีอัตราการแช่แข็งประมาณ 0.2 เซนติเมตร / ชั่วโมง ใช้เวลาประมาณ 3 – 72 ชั่วโมง ใช้สำหรับแช่แข็งอาหารขนาดใหญ่ (Bulk) ในห้องที่ลมเย็นเป่า (Blast Room) หรือการแช่แข็งของตู้เย็นตามบ้าน ซึ่งมีอุณหภูมิตประมาณ -1 ถึง -15 องศาเซลเซียส การแช่แข็งแบบช้าพบว่า ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่อยู่ระหว่างเซลล์ซึ่งจะไปบีบให้เซลล์แตก และมีผลต่อคุณภาพอาหารหลังจากที่ผลึกน้ำแข็งละลายจนกลับสู่สภาพเดิม อาหารจะมีลักษณะและชุ่มน้ำและมีส่วนของของเหลวภายในเซลล์ไหลออกมามาก

2.2.2 การแช่แข็งอย่างรวดเร็ว (Quick Freezing) คือ การนำเอาอาหารมาแช่ในช่วงอุณหภูมิตที่สามารถทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งได้มากที่สุดในช่วงเวลาอันสั้น ไม่ควรเกิน 30 นาที มีอัตราการแช่แข็งประมาณ 0.5-3.0 เซนติเมตร / ชั่วโมง ใช้สำหรับแช่แข็งอาหารขนาดเล็กแต่ละชิ้นอย่างรวดเร็ว (Individual Quick Frozen , IQF) เช่นระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed) และที่ 10-100 เซนติเมตร / ชั่วโมง เป็นการแช่แข็งอย่างรวดเร็วมาก (Ultra rapid freezing) โดยวิธีการพ่นฝอยหรือจุ่มในก๊าซเหลว สำหรับการแช่แข็งอาหารที่มีการบรรจุหีบห่อในรูปแบบเพื่อจำหน่ายปลีก (Retail Packages) อัตราการแช่แข็งจะต้องมากกว่า 0.5 เซนติเมตร / ชั่วโมง และสำหรับระบบ IQF จะต้องมากกว่า 5 เซนติเมตร / ชั่วโมง สำหรับอาหารส่วนใหญ่ แต่ถ้าเป็นอาหารที่บอบบางมาก เช่น มะเขือเทศ จะต้องให้อัตราการแช่แข็งมากกว่า 10 เซนติเมตร / ชั่วโมง ซึ่งวิธีการแช่แข็งอย่างรวดเร็วนี้พบว่า ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กละเอียดเกิดขึ้นทั้งภายในและระหว่างเซลล์อย่างสม่ำเสมอจึงไม่ทำให้เซลล์ของอาหารบอบช้ำมากนัก

2.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทำนายเวลาที่แช่แข็งอาหาร

เวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง (Freezing Time) คือ เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของอาหารจากอุณหภูมิเริ่มต้น ไปจนกระทั่งจุดกึ่งกลางของอาหารมีอุณหภูมิตามต้องการ ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อเวลาในการแช่แข็งอาหาร มีดังนี้

2.3.1 ขนาดและรูปร่างของอาหาร (Dimension , d , meter)

รูปร่างของอาหารมีอยู่หลายหลายลักษณะ ที่จะนำมาพิจารณาได้ง่ายจะเป็นรูปทรงเรขาคณิต เช่น สี่เหลี่ยมชิ้นบาง (Finite , Infinite Slab) ทรงกระบอก (Finite , Infinite Cylinder) ทรงกลม (Sphere) หรือมีลักษณะเป็นก้อน (Brick หรือ Brock) ซึ่งได้เลือกทำการศึกษาเฉพาะลักษณะที่เป็น สี่เหลี่ยมชิ้นบาง (Infinite Slab) ทรงกระบอกยาว (Infinite Cylinder) และ ทรงกลม (Sphere) ซึ่งที่อาหารชนิดเดียวกันและมีความหนา (สำหรับสี่เหลี่ยมชิ้นบาง) หรือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (สำหรับทรงกระบอกยาว และทรงกลม) เท่ากัน ลักษณะทรงกลมจะใช้เวลาในการแช่แข็งน้อยที่สุด ตามด้วยทรงกระบอกยาว และลักษณะสี่เหลี่ยมชิ้นบางใช้เวลาในการแช่แข็งนานที่สุด

2.3.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าอาหาร (Surface Heat Transfer Coefficient , h , W / m² K)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าอาหาร จะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง โดยเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าอาหารเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการแช่แข็งอาหารลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าอาหารขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอาหาร คือ ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ขนาดและรูปร่าง อุณหภูมิที่ผิวสัมผัส อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน และบรรจุภัณฑ์ ซึ่งถ้าอาหารถูกบรรจุแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าอาหาร จะเปลี่ยนแปลงไปตามสมการ

$$\frac{1}{h_p} = \frac{1}{h} + \frac{L}{k} \quad \dots (2.1)$$

โดย L = ความหนาของบรรจุภัณฑ์ (m)
k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (W / m K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าอาหารแสดงดังตาราง

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าอาหาร

รูปแบบการแช่แข็ง	h (W / m ² K)	Medium Temperature (°C)
Still air freezer	5-10	-18 ถึง -40
Air blast freezer (2.5 m / s)	17-20	-18 ถึง -40
Air blast freezer (5 m / s)	26-30	-18 ถึง -40
Tunnel freezer	15-60	-18 ถึง -40
Liquid immersion - Circulating brine	60-90	-18 ถึง -50
Contact freezer	50-120	-30 ถึง -40
Fluidized-bed freezer	80-120	-30 ถึง -40
Liquid Nitrogen	100-170	-196

ที่มา : Erickson and Hung (1997)

2.3.3 อุณหภูมิ

แบ่ง ได้ดังนี้

2.3.3.1 อุณหภูมิตัวกลางในการแช่แข็ง (Medium Temperature , T_M , °C)

เป็นอุณหภูมิของระบบที่ใช้ในการแช่แข็ง โดยการลดอุณหภูมิตัวกลางในการแช่แข็งให้ต่ำจะช่วยระบายความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น ทำให้เวลาที่ต้องใช้ในการแช่แข็งลดลง ค่าอุณหภูมิตัวกลางการแช่แข็งแสดงในตารางที่ 2.1

2.3.3.2 อุณหภูมิจุดเยือกแข็งอาหาร (Freezing Temperature , T_F , °C)

การหาจุดเยือกแข็งของอาหารเริ่มต้น (Initial Freezing Point) หาได้จาก

สมการ

$$\Delta T_F = \frac{R_g T_{Ao}^2 m}{1000 L} \quad \dots (2.2)$$

โดย ΔT_F = ค่าอุณหภูมิที่ลดต่ำลงจาก 273 K

R_g = ค่าคงที่ของแก๊ส

= 8.314 kJ / kg mole K

T_{Ao} = จุดเยือกแข็งของของเหลวบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 273 K เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m	=	ค่าโมลาริตี
	=	โมลตัวถูกละลาย / กิโลกรัมตัวทำละลาย
L	=	ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ / kg)

หรือประมาณอย่างคร่าวๆได้จากสมการของ Cleland (1985)

$$T_F = -1.8 + M_W \quad \dots (2.3)$$

โดย	T_F	=	จุดเยือกแข็งเริ่มต้นของอาหาร (°C)
	M_W	=	เศษส่วนมวลของน้ำในอาหาร
		=	น้ำหนักน้ำ / น้ำหนักอาหาร

ค่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็งของอาหารประเภทต่างๆ แสดงในภาคผนวกตาราง ข.1

2.3.3.3 อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหาร (Initial Temperature, T_1 , °C)

คือ อุณหภูมิปกติของอาหารก่อนเริ่มทำการแช่แข็ง ซึ่งโดยมากมีค่าประมาณ 5 – 20 องศาเซลเซียส

2.3.3.4 อุณหภูมิสุดท้ายของอาหาร (Final Temperature, T_c , °C)

จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส ปฏิกริยาเคมีที่ใช้เอนไซม์ และไมใช้เอนไซม์ และการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา ทำให้ได้ข้อสรุปว่า ต้องแช่แข็งจนถึง -18 องศาเซลเซียส (หรือ 0 องศาฟาเรนไฮต์) หรือต่ำกว่านี้ เพราะจะไม่ทำให้เชื้อจุลินทรีย์เจริญเติบโต และการเน่าเสียของอาหารจะไม่เกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า -10 องศาเซลเซียส อุปกรณ์ในการเก็บรักษาและขนส่งควรจะสามารถปรับอุณหภูมิได้ โดยถ้าเก็บอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่า -18 องศาเซลเซียส อาหารจะคงอยู่ในสภาพดีได้นาน ทางการค้าต้องเก็บและขนส่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -30 องศาเซลเซียส (Birch , Cameron and Spenser , 1986)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 คุณสมบัติทางความร้อนและคุณสมบัติของอาหาร

2.3.4.1 ความหนาแน่น (Density, ρ , kg/m^3)

หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของวัสดุ

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \dots(2.4)$$

โดย M = มวล (kg)
 V = ปริมาตร (m^3)

Hsieh et al. (1977) ได้เสนอวิธีหาความหนาแน่นในกรณีที่ทราบองค์ประกอบของอาหาร ดังนี้

$$\frac{1}{\rho} = M_u \frac{1}{\rho_u} + M_s \frac{1}{\rho_s} + M_i \frac{1}{\rho_i} \quad \dots(2.5)$$

โดย M_u = เศษส่วนมวลของน้ำที่ยังไม่แช่แข็งในผลิตภัณฑ์
 M_s = เศษส่วนมวลของของแข็งในผลิตภัณฑ์
 M_i = เศษส่วนมวลของน้ำที่แช่แข็งแล้ว
 ρ_u = ความหนาแน่นของน้ำที่ยังไม่แช่แข็ง (kg/m^3)
 ρ_s = ความหนาแน่นของของแข็งในผลิตภัณฑ์ (kg/m^3)
 ρ_i = ความหนาแน่นของน้ำแข็ง (kg/m^3)
 (ดูได้จากภาคผนวกตาราง ข.6)

Choi and Okos (1987) สามารถหาค่าความหนาแน่นของแต่ละองค์ประกอบของอาหารได้จากสมการ ดังนี้

$$\rho = \frac{1}{\sum X_i / \rho_i} \quad \dots(2.6)$$

โดย Water : $\rho_i = 0.997 \times 10^3 - 0.0031439T - 0.0037574T^2 \quad \dots(2.7)$

Ice : $\rho_i = 0.9169 \times 10^3 - 0.13071T \quad \dots(2.8)$

Protein : $\rho_i = 1.3299 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1}T \quad \dots(2.9)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Fat} \quad : \quad \rho_i = 9.2559 \times 10^3 - 4.1757 \times 10^{-1}T \quad \dots (2.10)$$

$$\text{Carbohydrate} \quad : \quad \rho_i = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}T \quad \dots (2.11)$$

$$\text{Fiber} \quad : \quad \rho_i = 1.3115 \times 10^3 - 3.6589 \times 10^{-1}T \quad \dots (2.12)$$

$$\text{Ash} \quad : \quad \rho_i = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}T \quad \dots (2.13)$$

โดย X_i = เศษส่วนเชิงมวลของส่วนประกอบอาหาร
 ρ_i = ความหนาแน่นของส่วนประกอบในอาหาร (kg/m^3)
 (ดูได้จากตารางภาคผนวก ข.3)

ค่าความหนาแน่นของอาหารประเภทต่างๆแสดงในภาคผนวกตาราง ข.1

2.3.4.2 ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของอาหาร (Latent Heat of Fusion, L , kJ / kg)

ค่าความร้อนแฝงของอาหารมีค่ามากขึ้นขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นภายใน โดยที่ Lamb (1976) ได้ให้ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนแฝงกับปริมาณความชื้นไว้ดังนี้

$$L = 355 M_w \quad \dots (2.14)$$

โดย M_w = เศษส่วนมวลของน้ำในอาหาร
หรือหาได้จาก

$$L = 333.6 I \quad \dots (2.15)$$

โดยเศษส่วนมวลของน้ำเมื่อแข็งแล้ว หาได้จากสมการของ Cleland (1985)

$$I = (M_w - 0.25 S) \left(1 - \frac{T_F}{-20}\right) \quad \dots (2.16)$$

โดย I = เศษส่วนมวลของน้ำแข็ง
 S = เศษส่วนมวลของของแข็ง
 M_w = เศษส่วนมวลของน้ำในอาหาร
 T_F = จุดเยือกแข็งของอาหาร ($^{\circ}\text{C}$)
 (ในที่นี้คืออุณหภูมิสุดท้าย -20°C)

ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของอาหารแสดงในภาคผนวกตาราง ข.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4.3 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร (Thermal Conductivity ,
 k , W / m K)

เมื่อมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเกิดขึ้นในอาหาร จะมีการถ่ายเทความร้อนจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ อัตราความร้อนที่ถ่ายเทต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยในทิศทางหนึ่ง จะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังสมการ

$$k = \frac{QL}{A(T_1 - T_2)} \quad \dots (2.17)$$

โดย Q = ปริมาณความร้อน (W)
 A = พื้นที่ (m^2)
 L = ความหนาของอาหาร (m)

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร สามารถแบ่งได้เป็น 2 สภาวะ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (Above Freezing Point) และ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Below Freezing Point) ซึ่งมีสมการในการหา ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (Above Freezing Point)

ในปี 1985 Cleland ได้เสนอสมการที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร คือ

$$k = \rho \left[\frac{M_w}{1695} + \frac{S}{5306} + \frac{F}{4722} \right] \quad \dots (2.18)$$

โดย M_w = เศษส่วนมวลของน้ำในอาหาร
 S = เศษส่วนมวลของของแข็งที่ไม่ใช่ไขมันในอาหาร
 F = เศษส่วนมวลของไขมันในอาหาร

Riedel (1949) ได้เสนอสมการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารของผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ และสารละลายน้ำตาล ดังนี้

$$k = [326.575 + 1.0412 T - 0.0033 T^2][0.769 + 0.009346 (X_w)][10^{-3}] \quad \dots (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย T = อุณหภูมิของอาหาร ($^{\circ}\text{C}$)
 X_w = ปริมาณความชื้น (%)

Earle (1966) ได้เสนอสมการที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร โดยขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น คือ

$$k = \frac{0.55}{100} (X_w) + \frac{0.26}{100} (100 - X_w) \quad \dots (2.20)$$

Sweat (1974) ได้สร้างสมการรีเกรสชันเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร ดังนี้

สำหรับผักและผลไม้ที่มีปริมาณน้ำมากกว่า 60% โดยน้ำหนักเปียก

$$k = 0.148 + 0.00493 X_w \quad \dots (2.21)$$

สำหรับเนื้อที่มีอุณหภูมิระหว่าง $0 - 60^{\circ}\text{C}$ ปริมาณน้ำ 60-80% โดยน้ำหนัก

เปียก

$$k = 0.08 + 0.0052 X_w \quad \dots (2.22)$$

$$k = (0.4448 M_w) + (0.00057 T_K) \quad \dots (2.23)$$

โดย M_w = เศษส่วนมวลของน้ำในอาหาร

T_K = อุณหภูมิของอาหาร (K)

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Below Freezing Point)

Cleland (1985) ได้เสนอสมการที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร ดังนี้

$$k = \rho \left[\frac{M_w - I}{1873} + \frac{I}{433} + \frac{S}{5306} + \frac{F}{4722} \right] \quad \dots (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย	M_w	=	เศษส่วนมวลของน้ำ
	S	=	เศษส่วนมวลของของแข็ง
	F	=	เศษส่วนมวลของไขมัน
	I	=	เศษส่วนมวลของน้ำแข็ง

Earle (1966) ได้เสนอสมการที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร โดยขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น คือ

$$k = \frac{2.4}{100} (X_w) + \frac{0.26}{100} (100 - X_w) \quad \dots (2.25)$$

Sweat (1974) ได้เสนอสมการในกรณีที่เป็นเนื้อที่มีอุณหภูมิระหว่าง -40 ถึง -5 °C ปริมาณน้ำ 65–80 % โดยน้ำหนักเปียก

$$k = 0.28 + 0.019 M_w - 0.0093 T \quad \dots (2.26)$$

โดย	M_w	=	เศษส่วนมวลของน้ำในอาหาร
	T	=	อุณหภูมิของอาหาร (°C)

$$k = \left[1.745 X_w \left(1 - \frac{T_F}{T} \right) \right] + 0.233 \quad \dots (2.27)$$

X_w	=	ปริมาณความชื้น (%)
T_F	=	อุณหภูมิที่จุดเยือกแข็ง (°C)
T	=	อุณหภูมิ (°C) , คัดที่อุณหภูมิเฉลี่ย $(T_F + T_C) / 2$

Choi and Okos (1987) ได้ให้สมการสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนทั้งที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งและที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งไว้ดังนี้

$$k = \sum (k_i X_{vi}) \quad \dots (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร (W / m K)
 k_i = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของส่วนประกอบใน
 อาหาร (W / m K)
 X_{vi} = เศษส่วนเชิงปริมาตรของส่วนประกอบในอาหาร

โดย Water : $k_i = 0.5711 + 1.7625 \times 10^{-3} T - 6.7306 \times 10^{-6} T^2 \dots (2.29)$

Ice : $k_i = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3} T + 1.0154 \times 10^{-4} T^2 \dots (2.30)$

Protein : $k_i = 0.1788 + 1.1958 \times 10^{-3} T - 2.7178 \times 10^{-6} T^2 \dots (2.31)$

Fat : $k_i = 0.1807 - 2.7604 \times 10^{-3} T - 1.7749 \times 10^{-7} T^2 \dots (2.32)$

Carbohydrate : $k_i = 0.2014 + 1.3874 \times 10^{-3} T - 4.3312 \times 10^{-6} T^2 \dots (2.33)$

Fiber : $k_i = 0.1833 + 1.2497 \times 10^{-3} T - 3.1683 \times 10^{-6} T^2 \dots (2.34)$

Ash : $k_i = 0.3296 + 1.401 \times 10^{-3} T - 2.9069 \times 10^{-6} T^2 \dots (2.35)$

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของส่วนประกอบอาหารที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในภาค
 ผนวกตาราง ข.4

สำหรับเศษส่วนโดยปริมาตร, X_{vi} หาได้จากสมการ

$$X_{vi} = \frac{X_i \rho_i}{\rho} \dots (2.36)$$

และ ρ_i หาได้จากสมการ (2.6)

โดย X_i = เศษส่วนโดยมวลของส่วนประกอบในอาหาร
 ρ_i = ความหนาแน่นของส่วนประกอบในอาหาร (kg / m³)
 ρ = ความหนาแน่นของอาหาร (kg / m³)

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารแสดงในภาคผนวกตาราง ข.1

2.3.4.4 ค่าความร้อนจำเพาะของอาหาร (Specific Heat , C_p , kJ / kg K)

คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักเพื่อให้
 อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามต้องการที่ความดันคงที่ ซึ่งค่าจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_p = \frac{Q}{M \Delta T} \quad \dots (2.37)$$

โดย	C_p	=	ความร้อนจำเพาะ (kJ / kg K)
	Q	=	ความร้อนที่รับหรือคายออก (kJ)
	M	=	มวล (kg)
	ΔT	=	อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (K)

ความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์หนึ่งขึ้นกับองค์ประกอบในอาหาร ปริมาณ ความชื้น อุณหภูมิ ความดัน โดยค่าความร้อนจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นในอาหารเพิ่มขึ้น

ค่าความร้อนจำเพาะของอาหารสามารถแบ่งได้เป็น 2 สภาวะ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (Above Freezing Point) และค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Below Freezing Point) ซึ่งมีสมการในการหา ดังนี้

ค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (Above Freezing Point)

$$C_p = 1.675 F + 0.837 SNF + 4.187 M_w \quad \dots (2.38)$$

โดย	F	=	เศษส่วนมวลของไขมัน
	SNF	=	เศษส่วนมวลของของแข็งปราศจากไขมัน
	M_w	=	เศษส่วนมวลของน้ำ

Dickerson (1969) ได้เสนอสมการหาค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง โดยประยุกต์ใช้กับ ผลิตภัณฑ์เนื้อที่มีปริมาณความชื้น 26 – 100 % และน้ำผลไม้ที่มีปริมาณความชื้นมากกว่า 50 % ดังนี้

$$C_p = 1.675 + 0.025(X_w) \quad \dots (2.39)$$

โดย	X_w	=	ปริมาณความชื้น (%)
-----	-------	---	--------------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ เมื่อเราทราบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เราอาจใช้สมการของ Charm

(1978) ดังนี้

$$C_p = 2.094 F + 1.256 S + 4.187 M_w \quad \dots (2.40)$$

$$C_p = 1.424 C + 1.549 P + 1.675 F + 0.837 A + 4.187 M_w \quad \dots (2.41)$$

โดย C = เศษส่วนมวลของคาร์โบไฮเดรต

P = เศษส่วนมวลของโปรตีน

F = เศษส่วนมวลของไขมัน

A = เศษส่วนมวลของเถ้า

M_w = เศษส่วนมวลของน้ำ

S = เศษส่วนมวลของของแข็ง

Siebel (1892) ได้เสนอสมการ ดังนี้

$$C_p = 3.349 M_w + 0.837 \quad \dots (2.42)$$

ค่าความร้อนจำเพาะในหน่วย J/kg K สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อสัตว์, ผัก, ผลไม้ และน้ำผลไม้ เมื่อ M_w อยู่ในช่วง 0.73 - 0.94

$$C_p = 1597.3 + 2583.3 M_w \quad \dots (2.43)$$

โดย M_w = เศษส่วนมวลของน้ำ

ค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Below Freezing

Point)

Siebel (1892) ได้เสนอสมการไว้ดังนี้

$$C_p = 1.256 M_w + 0.837 \quad \dots (2.44)$$

$$C_p = 1.675 F + 0.837 SNF + 2.093 M_w \quad \dots (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย F = เศษส่วนมวลของไขมัน
 SNF = เศษส่วนมวลของของแข็งปราศจากไขมัน
 M_w = เศษส่วนมวลของน้ำ

Choi and Okos (1987) ได้ให้สมการสำหรับคำนวณค่าความร้อนจำเพาะทั้งที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งและที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งไว้ดังนี้

$$C_{avg} = PC_p + FC_F + CC_C + FiC_{Fi} + AC_A + M_w C_w \quad \dots (2.46)$$

โดย Protein : $C_p = 2.0028 + 1.2089 \times 10^{-3} T - 1.3129 \times 10^{-6} T^2 \quad \dots (2.47)$

Fat : $C_F = 1.9842 - 1.4733 \times 10^{-3} T + 4.8008 \times 10^{-6} T^2 \quad \dots (2.48)$

Carbohydrate : $C_C = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3} T - 5.9399 \times 10^{-6} T^2 \quad \dots (2.49)$

Fiber : $C_{Fi} = 1.8459 + 1.9306 \times 10^{-3} T - 4.6509 \times 10^{-6} T^2 \quad \dots (2.50)$

Ash : $C_A = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3} T - 3.6817 \times 10^{-6} T^2 \quad \dots (2.51)$

น้ำ : $C_w = 4.1762 + 9.9862 \times 10^{-8} T - 5.4731 \times 10^{-6} T^2 \quad \dots (2.52)$

ค่าความร้อนจำเพาะของส่วนประกอบอาหารที่อุณหภูมิต่างๆแสดงในภาคผนวกตาราง ข.5

โดย M_w = เศษส่วนมวลของน้ำในอาหาร

P = เศษส่วนมวลของโปรตีน

F = เศษส่วนมวลของไขมัน

C = เศษส่วนมวลของคาร์โบไฮเดรต

Fi = เศษส่วนมวลของไฟเบอร์

A = เศษส่วนมวลของขี้เถ้า

ค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Above Freezing Point)

และค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Below Freezing Point)

แสดงในภาคผนวกตาราง ข.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4.5 ปริมาณความชื้น (Moisture Content, X_w , %)

สารละลายที่มีความเข้มข้นมาก จะมีจุดเยือกแข็งที่ต่ำกว่าสารละลายที่มีน้ำมาก เช่น ถ้านำน้ำผลไม้กับน้ำไปแช่แข็ง น้ำจะแข็งตัวก่อน ในขณะที่น้ำผลไม้จะเป็นเกล็ดน้ำแข็งและของเหลว กล่าวคือ น้ำในน้ำผลไม้จะไม่แข็งตัวก่อน แล้วส่วนที่เหลือที่มีความเข้มข้นมากกว่าจะแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

อาหารที่แตกต่างกันก็จะมีปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้มีจุดเยือกแข็งที่แตกต่างกันด้วย และใช้เวลาในการแช่แข็งไม่เท่ากัน

ค่าปริมาณความชื้นของอาหารประเภทต่างๆแสดงในภาคผนวกตาราง ข.1

2.3.4.6 เอนทัลปี (Enthalpy, H , kJ / kg)

คือปริมาณความร้อนหรือระดับพลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีทั้งหมดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าหนึ่งจนผ่านช่วงแช่แข็ง และมีอุณหภูมิลดลงไปอีกจนถึงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง มีสมการดังนี้

$$\Delta H = \Delta H_S + \Delta H_U + \Delta H_L + \Delta H_I \dots (2.53)$$

- โดย
- ΔH_S = ความร้อนสัมผัสที่กำจัดออกจากผลิตภัณฑ์ของแข็ง (kJ / kg)
 - ΔH_U = ความร้อนสัมผัสที่กำจัดออกจากน้ำที่ยังไม่แข็งตัว (kJ / kg)
 - ΔH_L = ความร้อนแฝงที่ต้องดึงออกจากน้ำแข็ง (kJ / kg)
 - ΔH_I = ความร้อนสัมผัสที่กำจัดออกจากน้ำแข็ง (kJ / kg)

โดยที่ $\Delta H_S = M_S C_{ps} (T_I - T_F) + M_S C_{ps} (T_F - T) \dots (2.54)$

$$\Delta H_U = M_U C_{pu} (T_I - T_F) + M_U (T) C_{pu} (T) (T_F - T) \dots (2.55)$$

$$\Delta H_L = M_L (T) L \dots (2.56)$$

$$\Delta H = M_I (T) C_{pi} (I) (T_F - T) \dots (2.57)$$

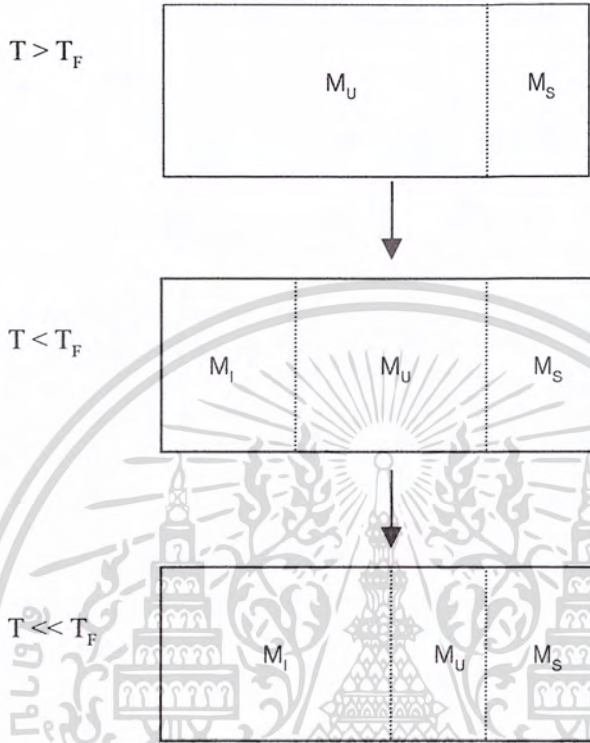
โดย M_u = เศษส่วนมวลของน้ำที่ยัง ไม่แช่แข็งในผลิตภัณฑ์

M_s = เศษส่วนมวลของของแข็งในผลิตภัณฑ์

M_i = เศษส่วนมวลของน้ำที่แช่แข็งแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปตารางแสดงค่าเอนทัลปี มักจะกำหนดอุณหภูมิข้างเคียงไว้ที่ -40 องศาเซลเซียส ดังนั้นในสมการ (2.53) จะยึดเอาอุณหภูมิที่ -40 องศาเซลเซียสว่ามีเอนทัลปีอ้างอิงเป็นศูนย์



รูปที่ 2.1 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่างการแช่แข็ง

จากรูปที่ 2.1 เมื่ออุณหภูมิถึงจุดเยือกแข็ง จะมีน้ำบางส่วนเป็นผลึก และสารละลายจะเข้มข้นขึ้น ทำให้อุณหภูมิเยือกแข็งลดต่ำลงอีก ส่วนที่เป็นน้ำแข็งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่วนที่ยังไม่แข็งตกลง

สำหรับการแช่แข็งค่าเอนทัลปีแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ
ค่าเอนทัลปีที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงกว่าจุดเยือกแข็ง

$$H = H_F + C_p(T - T_F) \quad \dots (2.58)$$

ค่าเอนทัลปีที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

Chang and Tao (1981)
$$H = (aT_r + (1 - a)(T_r)^b)H_F \quad \dots (2.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า H_F (J/kg) สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อสัตว์, ผัก, ผลไม้ และน้ำผลไม้
เมื่อ X_w อยู่ในช่วง 0.73 – 0.94 หาได้จากสมการ

$$H_F = 9792.46 + 405096 X_w \quad \dots (2.60)$$

- โดย T_r = $(T - 227.6) / (T_F - 227.6)$
 H_F = เอนทัลปีของผลิตภัณฑ์ที่จุดเริ่มต้นของการเยือกแข็ง
 (kJ/kg)
 T_F = อุณหภูมิที่จุดเริ่มต้นของการเยือกแข็ง (K)
 a, b = ค่าคงที่
 (ดูได้จากบทที่ 3 หัวข้อ 3.4 Numerical Method)
 C = ความร้อนจำเพาะของอาหาร (kJ/kg K)
 X_w = ปริมาณความชื้น (%)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

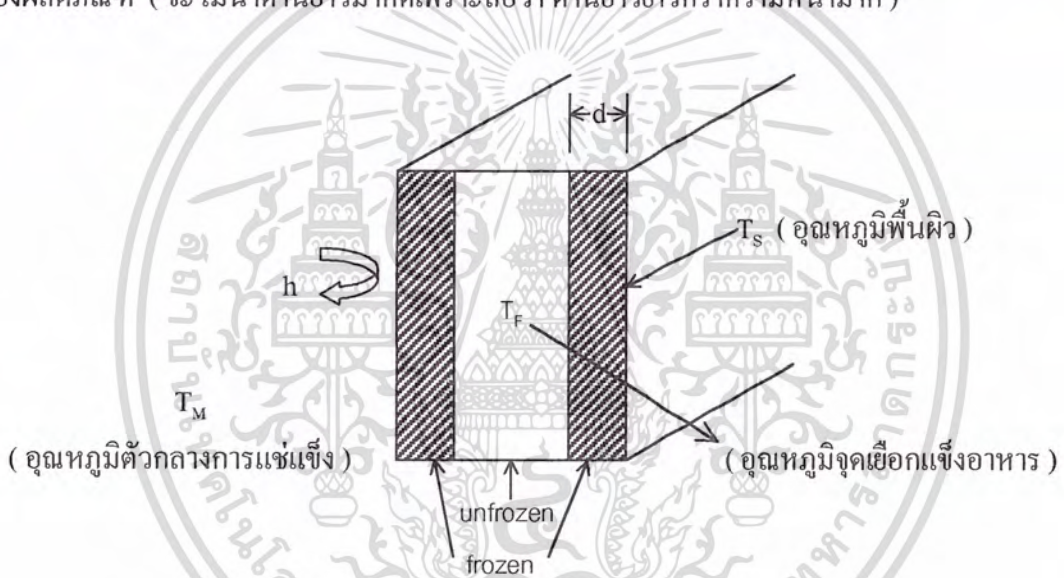
บทที่ 3

การคำนวณเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง

(Prediction of Freezing Time)

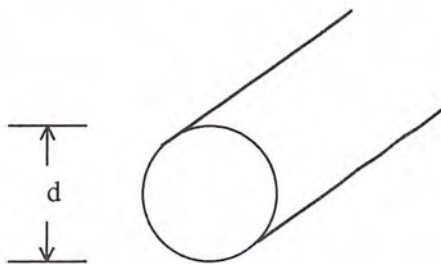
เวลาในการแช่แข็งปกติแล้วสามารถวัดได้จากการทดลอง ส่วนการคำนวณ ตัวแปรที่มีจำนวนมากและมีการเปลี่ยนแปลงมาก การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายเวลาในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์รูปร่างต่างๆ โดยจะพิจารณาผลิตภัณฑ์ใน 3 รูปร่าง ดังนี้

1) สี่เหลี่ยมชิ้นบาง (Infinite Slab) โดยค่า d จะเป็นค่าความหนา (Thickness) ของผลิตภัณฑ์ (จะไม่นำด้านยาวมาคิดเพราะถือว่า ด้านยาวยาวกว่าความหนามาก)



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของ Infinite Slab

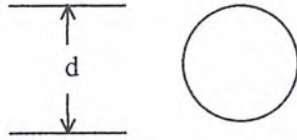
2) ทรงกระบอกยาว (Infinite Cylinder) โดยค่า d จะเป็นค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของผลิตภัณฑ์ (จะไม่นำด้านยาวมาคิดเพราะถือว่า ด้านยาวยาวกว่าความหนามาก)



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของ Infinite Cylinder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ทรงกลม (Sphere) โดยค่า d จะเป็นค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์ที่เป็นรูปทรงกลม



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของ Sphere

ซึ่งในการคำนวณจะใช้สมการต่อไปนี้

3.1 Plank 's Equation

สามารถหาเวลาที่ใช้ ในการแช่แข็ง ได้ดังนี้

$$t = \frac{\rho L}{T_F - T_M} \left[\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k} \right] \dots (3.1)$$

- โดย t = เวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง (วินาที, s)
- ρ = ความหนาแน่นของอาหาร (kg/m^3)
- L = ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)
- T_F = อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง ($^{\circ}\text{C}$)
- T_M = อุณหภูมิของตัวกลางในการแช่แข็ง ($^{\circ}\text{C}$)
- d = ความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์ (m)
- h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{W/m}^2 \text{K}$)
- k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m K)

สำหรับที่เหลี่ยมชิ้นบาง (Infinite Slab)	$P = 1/2$, $R = 1/8$
สำหรับทรงกระบอก (Infinite Cylinder)	$P = 1/4$, $R = 1/16$
สำหรับทรงกลม (Sphere)	$P = 1/6$, $R = 1/24$

โดยมีสมมติฐานของสมการดังนี้

- พิจารณาการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางเดียว
- อุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายของผลิตภัณฑ์คงที่ที่จุดเยือกแข็ง

อุณหภูมิของตัวกลางการแช่แข็งคงที่มีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนคงที่ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง
- ไม่นำความร้อนสัมผัส (sensible heat) มาคิด
- ความร้อนแฝงคงที่ และไม่คิดว่าความร้อนแฝงนั้นค่อยๆถูกดึงออกมาตลอดการแช่แข็ง

3.2 Pham 's Equation

ซึ่งดัดแปลงมาจากสมการของ Plank และปรับข้อสมมติฐานของ Plank โดยใช้อุณหภูมิจุดเยือกแข็งเฉลี่ย (Mean Freezing Time, T_{fm}) แทน และในการคำนวณเวลาในการแช่แข็งสามารถแบ่งเป็น Precooling, Phase change และ Tempering ซึ่งหมายถึงการนำความร้อนสัมผัสมาใช้ในการคำนวณด้วย เมื่อรวมสมการหาเวลาทั้ง 3 ช่วงเข้าด้วยกัน จะได้สมการสำหรับหาเวลาในการแช่แข็งอาหารทั้งหมด ดังนี้

$$t = \frac{V}{hA} \left[\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right] \left[1 + \frac{Bi}{4} \right] \dots (3.2)$$

โดย

$$\begin{aligned} \Delta H_1 &= \text{การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในช่วง Precooling (kJ/kg)} \\ &= C_{pu} (T_1 - T_{fm}) \\ \Delta H_2 &= \text{การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในช่วง Phase change รวมถึงช่วง Tempering (kJ/kg)} \\ &= L + C_{pi} (T_{fm} - T_C) \\ C_{pi} &= \text{ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (J/m}^3 \text{K)} \\ &= C_{pi} (\text{kJ/kg K}) \times \rho \times 1000 \\ C_{pu} &= \text{ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเยือกแข็ง (J/m}^3 \text{K)} \\ &= C_{pu} (\text{kJ/kg K}) \times \rho \times 1000 \\ \Delta T_1 &= \text{ผลต่างของอุณหภูมิในช่วง Precooling (}^\circ\text{C)} \\ &= (T_1 + T_{fm}) / 2 - T_M \\ \Delta T_2 &= \text{ผลต่างของอุณหภูมิในช่วง Phase change (}^\circ\text{C)} \\ &= (T_{fm} - T_M) \\ T_{fm} &= \text{อุณหภูมิจุดเยือกแข็งเฉลี่ย (}^\circ\text{C)} \\ &= 1.8 + 0.263 T_C + 0.105 T_M \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bi	=	Biot number	=	hd/k
h	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	($W/m^2 K$)	
A	=	พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์	(m^2)	
V	=	ปริมาตรของผลิตภัณฑ์	(m^3)	
L	=	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว	(J/m^3)	
	=	$L(kJ/kg) \times \rho \times 1000$		

โดยมีสมมติฐานของสมการดังนี้

- ช่วงของการคำนวณจะแบ่งเป็น Precooling, Phase change และ Tempering ซึ่งหมายถึงการนำ Sensible Heat มาใช้ในการคำนวณ
- อุณหภูมิจุดเยือกแข็งจะใช้อุณหภูมิจุดเยือกแข็งเฉลี่ย (T_m)

3.3 Nagaoka's Equation

ซึ่งดัดแปลงมาจากสมการของ Plank โดยได้นำความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) มารวบรวมด้วย ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

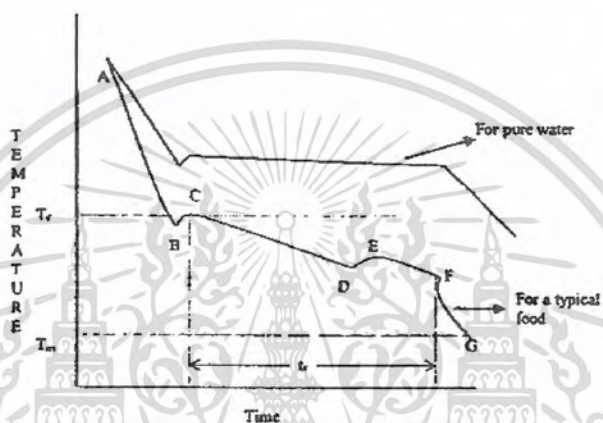
$$t = \frac{\Delta H \rho}{T_F - T_M} \left[\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k} \right] \dots (3.3)$$

โดย ΔH	=	$[1 + 0.00445(T_I - T_F)] [C_{pu}(T_I - T_F) + L + C_{pi}(T_F - T_C)]$
C_{pu}	=	ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง ($kJ/kg K$)
C_{pi}	=	ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ($kJ/kg K$)
T_I	=	อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ ($^{\circ}C$)
T_C	=	อุณหภูมิต่ำสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ ($^{\circ}C$)
T_F	=	อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง ($^{\circ}C$)
T_M	=	อุณหภูมิของตัวกลางในการแช่แข็ง ($^{\circ}C$)
t	=	เวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง (วินาที, s)
ρ	=	ความหนาแน่นของอาหาร (kg/m^3)
L	=	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)
d	=	ความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์ (m)
h	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 K$)
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m K$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีสมมติฐานของสมการดังนี้

- ผลึกภัณฑ์ที่จะแช่แข็ง จะต้องมียุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากันตลอด
- ความร้อนแฝงทั้งหมดที่จะถูกดึงออกที่อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง
- สัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายในผลึกภัณฑ์คงที่ โดยมีค่าเท่ากับในสถานะแช่แข็ง
- จุดเยือกแข็งของผลึกภัณฑ์คงที่



รูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบการแช่แข็งน้ำบริสุทธิ์กับอาหาร

กระบวนการแช่แข็งในผลึกภัณฑ์อาหารค่อนข้างซับซ้อนกว่าการแช่แข็งน้ำบริสุทธิ์ ดังรูปที่ 3.4 จะเห็นว่า กราฟของน้ำบริสุทธิ์นั้น จะมีอุณหภูมิลดลงเมื่อความร้อนถูกกำจัดออกจากระบบ จนกระทั่งถึงจุดเยือกแข็ง หลังจากเกิด Supercooling (การทำให้เย็นยิ่งยวด คือ อุณหภูมิของน้ำลดต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของผลึกภัณฑ์ แต่ยังไม่เกิดผลึกขึ้น) ปริมาณเล็กน้อย แล้วอุณหภูมิจะคงที่ ซึ่งในช่วงนี้ความร้อนจะถูกกำจัดออกไปในรูปของความร้อนแฝงของน้ำ ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง หลังจากนั้นเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งหมดแล้ว ถ้าความร้อนถูกกำจัดออกจากระบบไป อุณหภูมิก็จะลดลงต่อไปอีก แต่ลักษณะกราฟการแช่แข็งของอาหารนั้น อุณหภูมิจะลดลงจากจุด A เมื่อความร้อนถูกกำจัดออกจากระบบ จนถึงจุดเยือกแข็งเริ่มต้น (เหมือนน้ำ) และจุดเยือกแข็งจะลดต่ำลง ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\ln x_A = \frac{\lambda}{R_g} \left[\frac{1}{T_{AO}} - \frac{1}{T_A} \right] \quad \dots (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย	T_{AO}	=	จุดเยือกแข็งของของเหลวบริสุทธิ์ A (K)
	X_A	=	เศษส่วน โมลของน้ำในสารละลาย
	T_A	=	จุดเยือกแข็งของสารละลาย (K)
	R_g	=	ค่าคงที่ของก๊าซ
		=	8.314 J / g mole K
	λ	=	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (J / mole)

โดยอุณหภูมิจะลดลงถึงจุด B ซึ่งน้ำยังคงเป็นของเหลวอยู่ ถึงแม้ว่าจะถึงจุดเยือกแข็งแล้ว (Supercooling) ผลิตเกิด Supercooling แล้ว อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเยือกแข็งเหมือนเดิม (จุด C) แล้วเริ่มเกิดผลึก โดยความร้อนจะถูกกำจัดในรูปของความร้อนแฝง คือ น้ำเปลี่ยนสถานะจากน้ำกลายเป็นน้ำแข็ง ในช่วง CD ความร้อนยังคงถูกนำออกจากระบบและยังคงเกิดผลึกต่อไป ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ทำให้จุดเยือกแข็งของส่วนที่ยังไม่แข็ง (Unfrozen) ลดต่ำลงไปอีก ในช่วง DE กระบวนการจะดำเนินต่อไป โดยเกิดความร้อนแฝงของการเกิดผลึกจนจุดเยือกแข็งของสารละลายเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงจุด Eutectic ของตัวถูกละลาย (จุด E) และยังคงเกิดผลึกต่อไปจนถึงช่วง EF ส่วนในช่วง FG นั้นแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของน้ำผสม (น้ำและน้ำแข็ง) ยังคงลดลงต่อไป โดยอัตราส่วนของน้ำที่ยังไม่แข็งจะขึ้นกับประเภทของอาหาร ส่วนประกอบของอาหาร และ อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บ (Storage Temperature)

3.4 Numerical Method

คำนวณโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์โดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อนของฟูเรียร์ ในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในชิ้นอาหาร การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางเดียว และการนำความร้อนของชิ้นอาหาร (k) มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ สามารถเขียนสมการทั่วไปในรูปของเอนทัลปี ได้ดังนี้

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{k}{u^m} \frac{\partial}{\partial u} \left[u^m \frac{\partial T}{\partial u} \right] \quad \dots (3.5)$$

โดย	u	=	มิติที่พิจารณาการถ่ายเทความร้อน มีระยะจากผิวจนถึงจุดกึ่งกลางของชิ้นอาหาร ($u = x$ ถ้าชิ้นอาหารมีรูปร่างเป็น infinite slab และ $u = r$ ถ้าชิ้นอาหารมีรูปร่างเป็น infinite cylinder หรือ sphere)
-----	-----	---	--

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคคลในหน่วยงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m = shape factor ขึ้นกับรูปร่างของชิ้นอาหาร ($m = 0$ ถ้าชิ้นอาหารมีรูปร่างเป็น infinite slab และ $m = 1$ ถ้าชิ้นอาหารมีรูปร่างเป็น infinite cylinder และ $m = 2$ เมื่อเป็น sphere)

ในกรณีที่ชิ้นอาหารสูญเสียความร้อนโดยการพา มีสภาวะเริ่มต้นและขอบเขต ดังนี้

$$t = 0 \quad T = T_i \quad 0 \leq u \leq U \quad \dots (3.6ก)$$

$$t > 0 \quad k \frac{\partial T}{\partial u} = 0 \quad u = 0 \quad \dots (3.6ข)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial u} = h(T_M - T_s) \quad u = U \quad \dots (3.6ค)$$

เราสามารถแก้สมการ (3.5) โดยใช้สภาวะขอบเขต (3.6) ถ้าทราบความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิของชิ้นอาหาร

ซึ่งค่า H_F , a , b และ C จะขึ้นกับสัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ (M_w) หากค่าได้ดังนี้

- ค่า H_F (J/kg) หาได้จากสมการที่ (2.60)
- ค่า C (J/kg K) หาได้จากสมการที่ (2.43)
- ค่า a และ b
- สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทผัก, ผลไม้ และน้ำผลไม้
เมื่อ M_w อยู่ในช่วง 0.75 – 0.94

$$a = 0.362 + 0.0498(M_w - 0.73) - 3.465(M_w - 0.73)^2 \quad \dots (3.7)$$

$$b = 27.2 - 129.04(a - 0.23) + 481.46(a - 0.23)^2 \quad \dots (3.8)$$

- สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อสัตว์
เมื่อ M_w อยู่ในช่วง 0.73 – 0.84

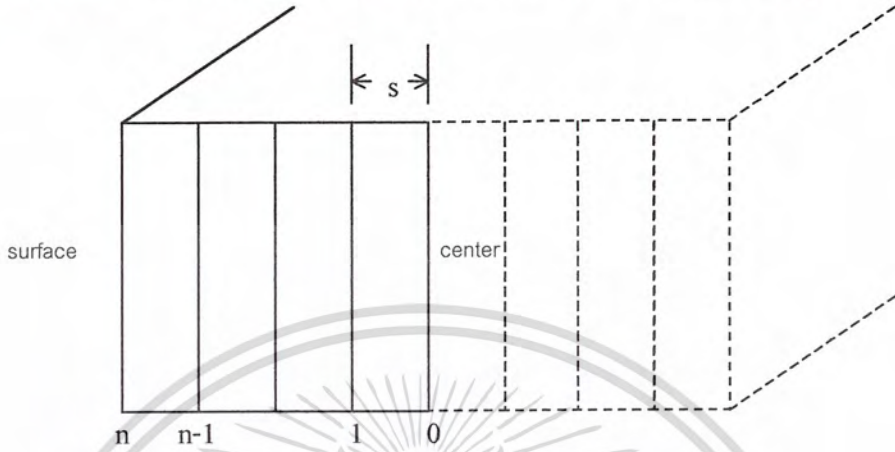
$$a = 0.316 + 0.247(M_w - 0.73) - 0.688(M_w - 0.73)^2 \quad \dots (3.9)$$

$$b = 22.95 - 54.68(a - 0.28) + 5589.03(a - 0.28)^2 \quad \dots (3.10)$$

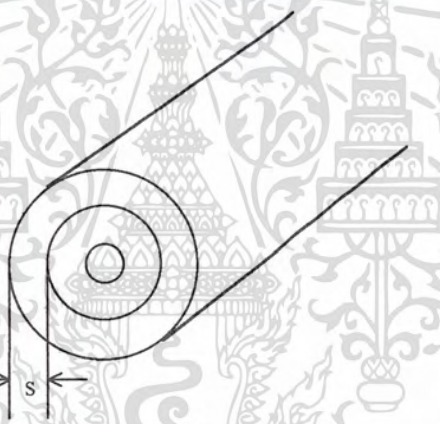
ค่าสัดส่วนความชื้น (M_w), H_F , a , b และ C_p ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวกตาราง ข.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

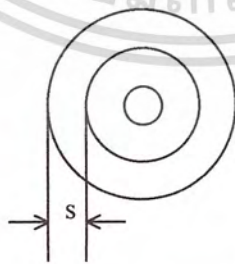
ในการคำนวณนั้นได้แบ่งระยะใดๆ (U) ของชั้นอาหารออกเป็น n ส่วนเท่าๆกัน โดยให้แต่ละส่วนมีระยะเท่ากับ s ทำให้สามารถแบ่งได้ n ชั้น โดย $n=1, 2, 3, \dots, n$ ดังรูป



รูปที่ 3.5 การแบ่งระยะใดๆในชั้นอาหารของ Infinite slab



รูปที่ 3.6 การแบ่งระยะใดๆในชั้นอาหารของ Infinite cylinder



รูปที่ 3.7 การแบ่งระยะใดๆในชั้นอาหารของ Sphere

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการ finite difference สมการ (3.1) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{H_n^t - H_n}{\Delta t} = k \left[\frac{m T_{n+1} - T_n}{U (\Delta u)} + \frac{T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n}{(\Delta u)^2} \right] \quad \dots (3.11)$$

โดย $s = \Delta u =$ ความกว้างชั้น
 $H_n^t =$ เอนทัลปีที่เวลาใหม่ ที่จุด n ใดๆ (kJ/kg)
 $H_n =$ เอนทัลปีที่เวลาเดิม ที่จุด n ใดๆ (kJ/kg)

จะได้

$$H_n^t = H_n + \Delta t k \left[\frac{m T_{n+1} - T_n}{ns} + \frac{T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n}{s^2} \right] \quad \dots (3.12)$$

สมการนี้ใช้คำนวณค่าเอนทัลปีของจุดที่ 1, 2, 3, ... และจุดที่ n-1 ซึ่งเป็นจุดภายในชั้นอาหารเท่านั้น

สำหรับการคำนวณที่จุด 0 สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการสมดุลความร้อน คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำออกจากจุดที่ 0 = อัตราการเปลี่ยนแปลงของความร้อนที่จุด 0 สะสมจะได้

$$H_0^t = H_0 + \frac{v_1 \Delta t k (T_1 - T_0)}{s^2} \quad \dots (3.13)$$

โดย $v_1 =$ shape factor ขึ้นกับรูปร่างชั้นอาหาร มีค่าดังตารางที่ 3.1

สำหรับการคำนวณที่จุด n สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการสมดุลความร้อน คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำที่ถ่ายเทเข้าสู่จุด n - อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาออกจากจุด n = อัตราการเปลี่ยนแปลงของความร้อนที่จุด n สะสม จะได้

$$H_n^t = H_n + \frac{\Delta t}{V_n s^2} [k b_n (T_{n-1} - T_n) - h a_n s (T_n - T_M)] \quad \dots (3.14)$$

โดย a_n, b_n และ V_n เป็น shape factor ขึ้นกับรูปร่างชั้นอาหาร มีค่าดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่า Shape Factor ขึ้นกับรูปร่างชิ้นอาหาร

Shape factor	Infinite slab	Infinite cylinder	Sphere
v_1	2	4	6
a_n	1	n	n^2
b_n	1	$[n - (1/2)]$	$[n - (1/2)]^2$
V_n	1/2	$(1/2)[n - (1/4)]$	$(1/2)[n^2 - (n/2) + (1/12)]$

นอกจากนี้การคำนวณหาค่าเอนทัลปีที่จุด 0 และจุด n ยังสามารถหาได้โดยตรงจากสมการสภาวะขอบเขต (3.6ข) และ (3.6ค) ตามลำดับ โดยใช้หลักการ finite difference ในการแก้สมการสภาวะขอบเขต (3.6ข) และ (3.6ค) ร่วมกับการแทนค่าลงในสมการ (3.12) จะทำให้ได้รูปแบบของสมการการคำนวณหาค่าเอนทัลปีที่จุด 0 และจุด n

จากสมการ (3.12) ถึง (3.14) สามารถหาเอนทัลปีที่เวลาใหม่สำหรับจุด n ใดๆ และจากเอนทัลปีที่ได้นี้ ก็สามารถนำไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิได้จากสมการ (2.59) และ (2.60) และนำอุณหภูมิที่คำนวณได้ไปใช้ในการคำนวณหาเอนทัลปีในช่วง Δt ขึ้นต่อไป จนกระทั่งได้อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของชิ้นอาหารที่ต้องการจึงสิ้นสุดการคำนวณ

โดยมีสมมติฐานดังนี้

- คำนวณ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์ โดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อนของฟูเรียร์ ในกรณีที่ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในชิ้นอาหาร
- การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางเดียว
- ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของอาหารสม่ำเสมอทั้งชิ้นผลิตภัณฑ์อาหาร
- ผลิตภัณฑ์อาหารมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน
- สำหรับลักษณะทรงกลม และทรงกระบอกยาว มีทิศทางการถ่ายเทความร้อนตั้งฉากกับแนวรัศมี ส่วนลักษณะสี่เหลี่ยมซึ่งบางจะมีทิศทางการถ่ายเทความร้อนตั้งฉากกับด้านกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบและพัฒนาโปรแกรม

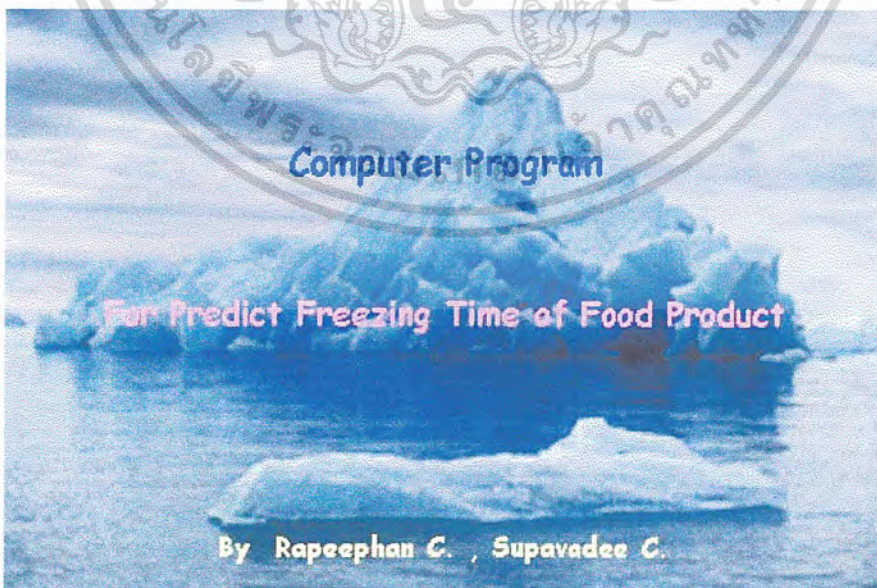
โปรแกรมนี้ พัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการคำนวณจากสมการเบื้องต้นทั้ง 3 สมการ (Plank , Pham , Nagaoka 's Equation) และวิธีเชิงเลข (Numerical Method) โดยภาษาที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม คือ Microsoft Visual Basic Version 6.0 ซึ่งเป็นภาษาที่ใช้งานง่าย และเหมาะสมต่อการใช้งานกับระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 95 , 98 , 2000 และ Me

ส่วนประกอบของโปรแกรมนี้นี้

1. หน้าจอต้อนรับเข้าสู่โปรแกรม
2. หน้าจอการเลือกวิธีที่ใช้ในการคำนวณ
3. หน้าจอการรับค่าเพื่อใช้ในการคำนวณของวิธีต่างๆ
4. หน้าจอแสดงผลและกราฟ
5. สมมติฐานของแต่ละวิธี

วิธีการใช้งานโปรแกรม

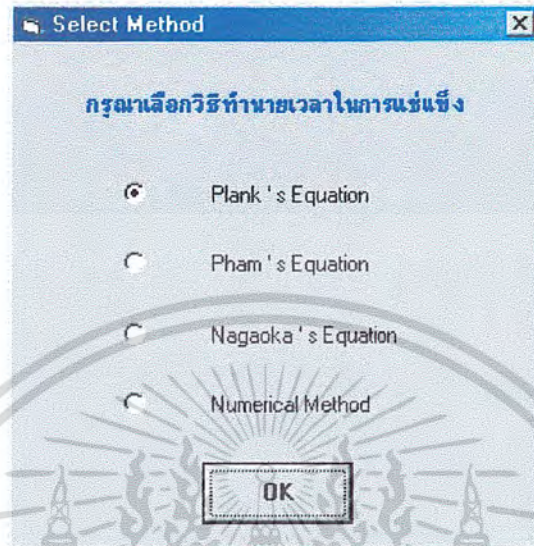
เมื่อเริ่มใช้งาน โปรแกรมจะปรากฏหน้าจอต้อนรับเข้าสู่โปรแกรม เมื่อต้องการทำงานต่อ ให้คลิกบนหน้าจอต้อนรับ 1 ครั้ง หน้าจอต้อนรับจะหายไป



รูปที่ 4.1 หน้าจอต้อนรับเข้าสู่โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจะปรากฏหน้าจอการเลือกวิธีที่จะใช้ในการคำนวณดังรูป



รูปที่ 4.2 หน้าจอการเลือกวิธีที่ใช้ในการคำนวณ

ซึ่งวิธีการคำนวณจะมีทั้งสิ้น 4 วิธีตามที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 3 เมื่อต้องการเลือกวิธีใด ให้คลิกเลือก แล้วคลิกปุ่ม “OK” ก็จะปรากฏหน้าจอการคำนวณของวิธีนั้นๆ ขึ้นมา

ตัวอย่างการใช้โปรแกรม

ต้องการแช่แข็งแอปเปิ้ลแดง ขนาด 0.1 เมตร โดยใช้ลมเย็นเป่า (Air Blast Freezer) ที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ต้องการแช่แข็งจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 20 องศาเซลเซียส จนได้ผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

แอปเปิ้ลแดงนั้น จัดเป็นรูปร่างทรงกลม (Sphere) และจากตารางภาคผนวก เราสามารถหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่ต้องใช้ในการคำนวณได้ ได้ค่าดังนี้

จุดเยือกแข็งของแอปเปิ้ลแดง	-1.75 องศาเซลเซียส
ปริมาณความชื้น	84 เปอร์เซ็นต์
ความหนาแน่น	840 kg/m^3
ความร้อนแฝงการหลอมเหลว	284 kJ/kg
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลาง	30 $\text{W/m}^2\text{K}$
ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง	3.72 kJ/kg K
ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง	1.82 kJ/kg K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในกรณีที่ผู้ใช้โปรแกรมไม่ทราบค่าตัวแปรต่างๆนั้น สามารถให้โปรแกรมคำนวณให้ได้ ดังรายละเอียดในแต่ละสมการ

จากค่าตัวแปรทั้งหมด เราสามารถนำมาคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง ได้ทั้ง 4 วิธี โดยจะอธิบายตามลำดับดังนี้

4.1 Plank's Equation

จากหน้าจอการเลือกวิธีที่ใช้ในการคำนวณ เมื่อผู้ใช้โปรแกรมคลิกเลือก Plank's Equation แล้วคลิกปุ่ม "OK" จะปรากฏหน้าจอการคำนวณวิธี Plank's Equation ขึ้นมาดังรูป

รูปที่ 4.3 หน้าจอการคำนวณวิธี Plank's Equation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหน้าจอก็จะแบ่งเป็นส่วนๆ ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าตามที่กำหนด

ส่วนที่ 1 Shape of Product - Shape Factor

ให้ผู้ใช้โปรแกรมคลิกเลือกรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา โดยแบ่งเป็น Infinite Slab , Infinite Cylinder และ Sphere โดยเมื่อคลิกเลือกรูปร่างแล้ว จะมีค่า Shape Factor P, R ปรากฏขึ้นมา

ส่วนที่ 2 Dimension of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าขนาดของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา (เมตร)

ส่วนที่ 3 Moisture Content of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ (เปอร์เซ็นต์)

ส่วนที่ 4 Freezing Condition

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าสถานะการแช่แข็ง ในที่นี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลาง ($W / m^2 K$) และ อุณหภูมิของตัวกลาง (องศาเซลเซียส) โดยในกรณีที่ผู้ใช้โปรแกรมไม่ทราบว่าค่าสถานะการแช่แข็งต่างๆมีค่าเท่าไร สามารถดูค่าที่แนะนำได้ โดยคลิกปุ่ม “ Suggested Values for Freezing Condition ” จะปรากฏหน้าจอแสดงค่าดังรูป

รูปแบบการแช่แข็ง	h ($W / m^2 K$)	อุณหภูมิตัวกลาง (Celcius)
Still air freezer	5 - 10	-18 ถึง -40
Air blast freezer (2.5 m/s)	17 - 20	-18 ถึง -40
Air blast freezer (5 m/s)	26 - 30	-18 ถึง -40
Tunnel freezer	15 - 60	-18 ถึง -40
Liquid immersion - Circulating brine	60 - 90	-18 ถึง -50
Contact freezer	50 - 120	-30 ถึง -40
Fluidized - bed freezer	80 - 120	-30 ถึง -40
Liquid Nitrogen	100 - 170	-196

Ok

รูปที่ 4.4 หน้าจอแสดงค่าสถานะการแช่แข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อผู้ใช้โปรแกรมอ่านค่าสถานะการแช่แข็งที่แนะนำเรียบร้อยแล้วคลิกปุ่ม “ OK ” จะกลับไปหน้าจอการคำนวณดั้งเดิม

ส่วนที่ 5 Property of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์อาหาร ในที่นี้ใช้ค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ (kJ / kg) สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ ($\text{W} / \text{m K}$) และ จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ (องศาเซลเซียส) โดยในโปรแกรมนี้ได้มีทางเลือกเพื่อให้ความสะดวกแก่ผู้ใช้โปรแกรม คือ ผู้ใช้โปรแกรมสามารถป้อนค่าตัวแปรต่างๆได้ด้วยตนเองหรือให้โปรแกรมคำนวณให้ก็ได้ เช่น ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ (จากสมการ 2.14) สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ (จากสมการ 2.25) และ จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ (จากสมการ 2.3)

ส่วนที่ 6 Density of Product

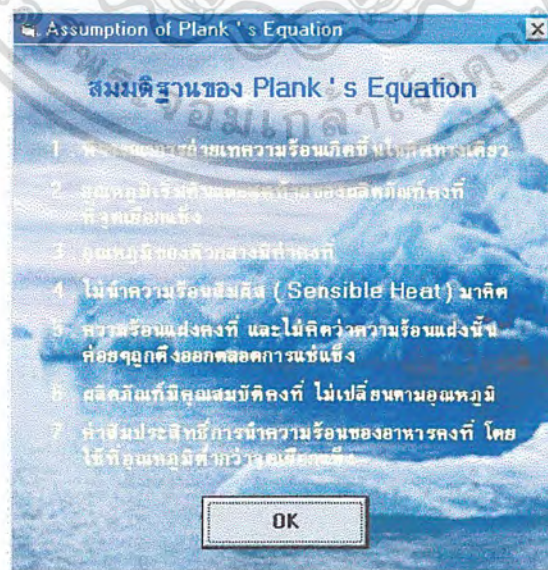
ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา (kg / m^3)

ส่วนที่ 7 Variation of Heat Transfer Coefficient

เป็นส่วนที่ใช้ในการศึกษาถึงการแปรผันของค่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งที่เปลี่ยนแปลงตามค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลางที่เปลี่ยนแปลงไป และค่าส่วนนี้จะนำไปสร้างเป็นกราฟเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนขึ้น

ส่วนที่ 8 Assumption of Equation

เมื่อคลิกปุ่มนี้แล้ว จะปรากฏหน้าจอแสดงสมมติฐานของวิธีที่ใช้ในการคำนวณดังรูป



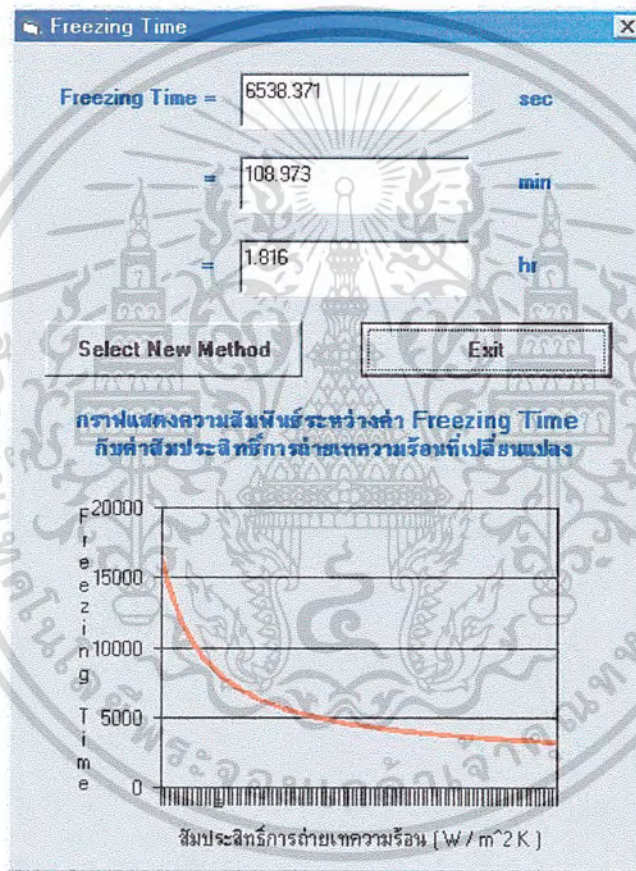
รูปที่ 4.5 หน้าจอแสดงสมมติฐานของ Plank 's Equation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อผู้ใช้โปรแกรมอ่านสมมติฐานเรียบร้อยแล้ว คลิกปุ่ม “OK” จะกลับสู่ หน้าจอการคำนวณดั้งเดิม

ส่วนที่ 9 Calculate Freezing Time

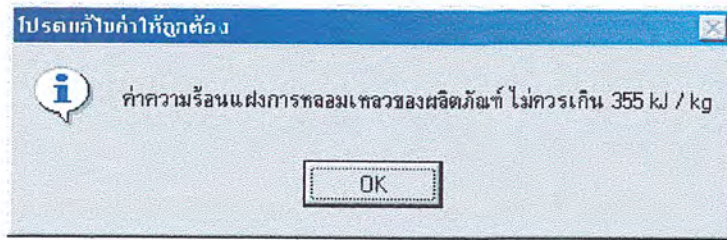
หลังจากป้อนค่าทุกค่าเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้โปรแกรมคลิกปุ่ม “Calculate Freezing Time” เพื่อคำนวณหาค่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์ เมื่อคลิกปุ่มแล้วจะปรากฏ หน้าจอแสดงผลและกราฟดังรูป



รูปที่ 4.6 หน้าจอแสดงผลและกราฟของ Plank’s Equation

โดยที่หน้าจอจะมีปุ่ม “Select New Method” ซึ่งใช้ในการเลือกคำนวณโดยวิธีอื่นต่อไป และปุ่ม “Exit” ซึ่งเป็นการจบการทำงานของโปรแกรม หมายเหตุ สำหรับการป้อนค่าของผู้ใช้โปรแกรมนั้น ถ้าผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าไม่ถูกต้อง จะมีหน้าจอเตือนให้แก้ไขค่าให้ถูกต้อง ตัวอย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างหน้าจอคำเตือนเมื่อผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าไม่ถูกต้อง

4.2 Pham's Equation

จากหน้าจอการเลือกวิธีที่ใช้ในการคำนวณ เมื่อผู้ใช้โปรแกรมคลิกเลือก Pham's Equation แล้วคลิกปุ่ม “OK” จะปรากฏหน้าจอการคำนวณวิธี Pham's Equation ขึ้นมาดังรูป

Shape of Product		Property of Product	
<input type="radio"/>	สี่เหลี่ยมบางยาวไม่จำกัด (Infinite Slab)	<input type="radio"/>	ผู้ใช้โปรแกรมต้องการป้อนค่าด้วยตนเอง
<input type="radio"/>	ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด (Infinite Cylinder)	<input checked="" type="radio"/>	ผู้ใช้โปรแกรมต้องการให้โปรแกรมคำนวณให้
<input checked="" type="radio"/>	ทรงกลม (Sphere)	ความร้อนแฝงการเยือกแข็ง (kJ/kg)	298.2
Dimension of Product		ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (kJ/kg K)	3.65
ความหนา Slab หรือ เส้นผ่านศูนย์กลาง Cylinder และ Sphere (m)	0.1	ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (kJ/kg K)	1.892
Moisture Content of Product		สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ (k, W/m K)	2.058
ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ (เปอร์เซ็นต์)	84	Density of Product	
Freezing Condition		ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ (kg/m ³)	
Suggested Values of Freezing Condition		840	
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลาง (h, W/m ² K)	30	Variation of Heat Transfer Coefficient (h)	
อุณหภูมิของตัวกลาง (Celcius)	-30	ค่า h เริ่มต้น	10
Temperature		ค่า h สุดท้าย	100
อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (Celcius)	20	Assumption of Equation	
อุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ (Celcius)	-18	Calculate Freezing Time	

รูปที่ 4.8 หน้าจอการคำนวณวิธี Pham's Equation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหน้าจอบางส่วนๆ ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าตามที่กำหนด

ส่วนที่ 1 Shape of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมคลิกเลือกรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา โดยแบ่งเป็น

Infinite Slab , Infinite Cylinder และ Sphere

ส่วนที่ 2 Dimension of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าขนาดของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา (เมตร)

ส่วนที่ 3 Moisture Content of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ (เปอร์เซ็นต์)

ส่วนที่ 4 Freezing Condition

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าสภาวะการแช่แข็ง ในที่นี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลาง (W/m^2K) และ อุณหภูมิของตัวกลาง (องศาเซลเซียส) ซึ่งสามารถดูค่าที่แนะนำได้ดังรูปที่ 4.5

ส่วนที่ 5 Temperature

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าอุณหภูมิ ในที่นี้ใช้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ (องศาเซลเซียส)

ส่วนที่ 6 Property of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ โดยใช้ค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ (kJ/kg) ค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่ำและสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (kJ/kgK) และ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ (W/mK) โดยในโปรแกรมนี้ได้มีทางเลือกเพื่อให้ความสะดวกแก่ผู้ใช้โปรแกรม คือ ผู้ใช้โปรแกรมสามารถป้อนค่าตัวแปรต่างๆได้ด้วยตนเอง หรือให้โปรแกรมคำนวณให้ก็ได้ เช่น ค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ (จากสมการ 2.14) ค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่ำและสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (จากสมการ 2.44 และ 2.42 ตามลำดับ) และ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ (จากสมการ 2.25)

ส่วนที่ 7 Density of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา (kg/m^3)

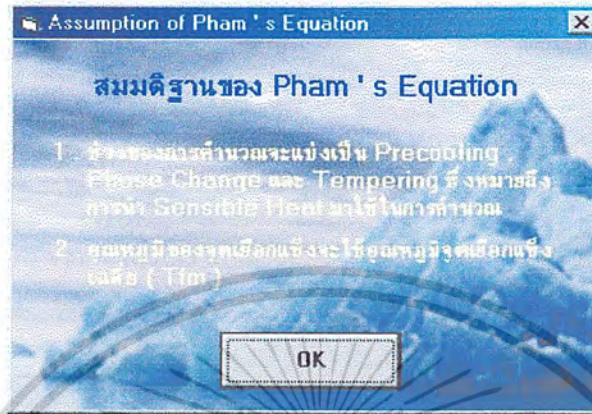
ส่วนที่ 8 Variation of Heat Transfer Coefficient

เป็นส่วนที่ใช้ในการศึกษาถึงการแปรผันของค่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งที่เปลี่ยนแปลงตามค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลางที่เปลี่ยนแปลงไป และค่าส่วนนี้จะนำไปสร้างเป็นกราฟเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 9 Assumption of Equation

เมื่อคลิกปุ่มนี้แล้ว จะปรากฏหน้าจอแสดงสมมติฐานของวิธีที่ใช้ในการคำนวณ

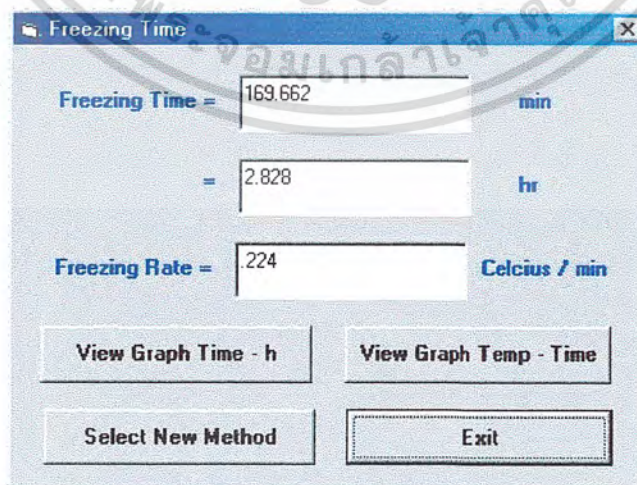


รูปที่ 4.9 หน้าจอแสดงสมมติฐานของ Pham's Equation

เมื่อผู้ใช้โปรแกรมอ่านสมมติฐานเรียบร้อยแล้ว เมื่อคลิกปุ่ม “OK” จะกลับสู่หน้าจอการคำนวณดั้งเดิม

ส่วนที่ 10 Calculate Freezing Time

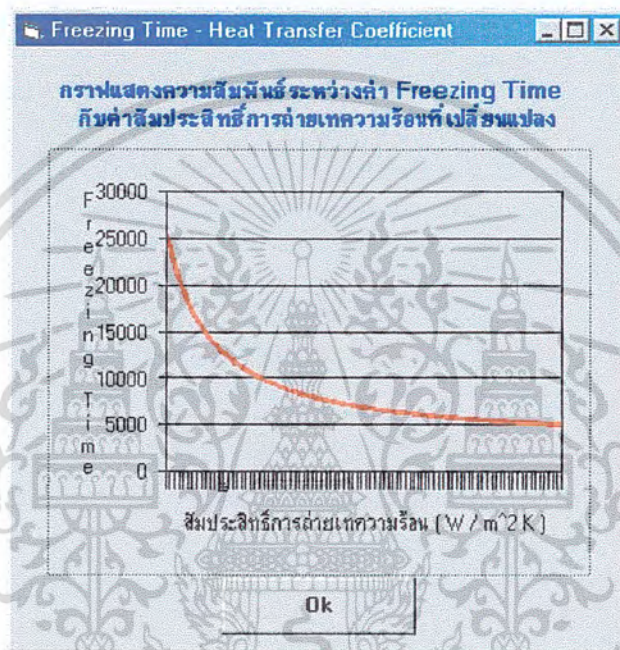
หลังจากป้อนค่าทุกค่าเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้โปรแกรมคลิกปุ่ม “Calculate Freezing Time” เพื่อคำนวณหาค่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์ และอัตราการแช่แข็ง (Celcius / min) เมื่อคลิกปุ่มแล้วจะปรากฏหน้าจอแสดงผลดังรูป



รูปที่ 4.10 หน้าจอแสดงผลของ Pham's Equation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่หน้าจอจะมีปุ่ม “ Select New Method ” ซึ่งใช้ในการเลือกคำนวณโดยวิธีอื่นต่อไป ปุ่ม “ Exit ” ซึ่งเป็นการจบการทำงานของโปรแกรม และยังมีอีก 2 ปุ่มที่เพิ่มเข้ามาคือ “ View Graph Time – h ” และ “ View Graph Temp – Time ” ซึ่งปุ่มแรกนั้นเป็นปุ่มที่ใช้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง (วินาที) กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลาง ($W / m^2 K$) ดังรูป

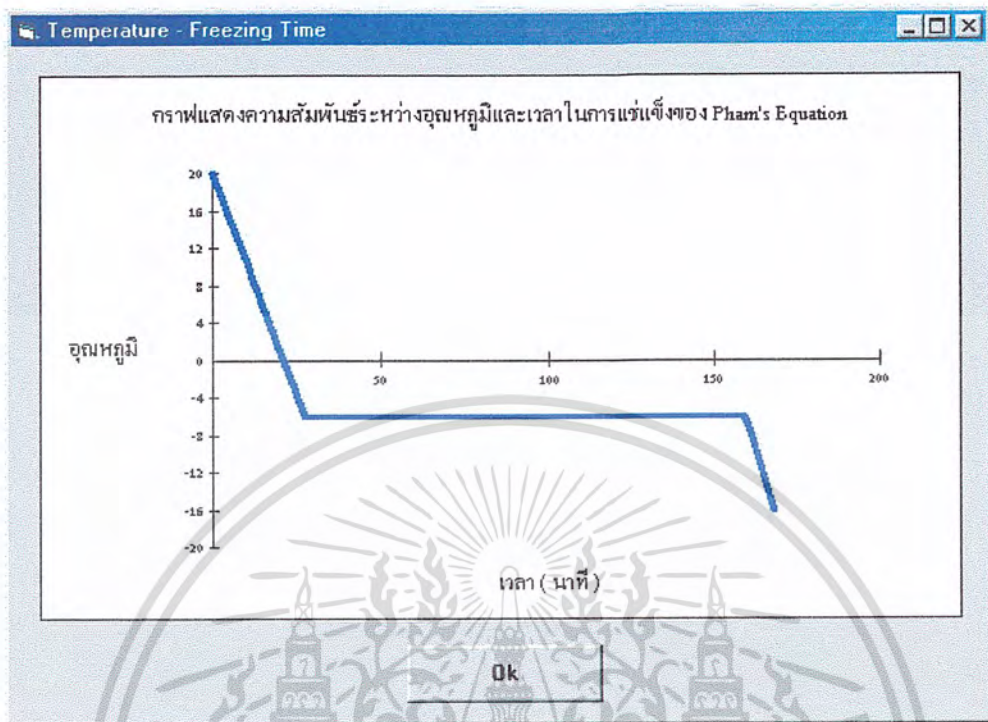


รูปที่ 4.11 หน้าจอแสดงกราฟ Time – h ของ Pham’s Equation

สำหรับปุ่ม “ View Graph Temp – Time ” นั้นเป็นปุ่มที่ใช้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางผลิตภัณฑ์ (เซลเซียส) กับเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง (นาที) ซึ่งรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก กราฟแสดงดังรูปที่ 4.12

หมายเหตุ สำหรับการป้อนค่าของผู้ใช้โปรแกรมนั้น ถ้าผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าไม่ถูกต้อง จะมีหน้าจอเตือนให้แก้ไขค่าให้ถูกต้อง ดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 หน้าจอแสดงกราฟ Temp – Time ของ Pham's Equation

4.3 Nagaoka's Equation

จากหน้าจอการเลือกวิธีที่ใช้ในการคำนวณ เมื่อผู้ใช้โปรแกรมคลิกเลือก Nagaoka's Equation แล้วคลิกปุ่ม “OK” จะปรากฏหน้าจอการคำนวณวิธี Nagaoka's Equation ขึ้นดังรูปที่ 4.13

โดยหน้าจอจะแบ่งเป็นส่วนๆ ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าตามที่กำหนด

ส่วนที่ 1 Shape of Product - Shape Factor

ให้ผู้ใช้โปรแกรมคลิกเลือกรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา โดยแบ่งเป็น Infinite Slab, Infinite Cylinder และ Sphere โดยเมื่อคลิกเลือกรูปร่างแล้ว จะมีค่า Shape Factor P, R ปรากฏขึ้นมา

ส่วนที่ 2 Dimension of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าขนาดของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา (เมตร)

ส่วนที่ 3 Moisture Content of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ (เปอร์เซ็นต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Calculation of Nagaoka's Equation

Shape of Product - Shape Factor

สี่เหลี่ยมยาวไม่จำกัด (Infinite Slab)
 ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด (Infinite Cylinder)
 ทรงกลม (Sphere)

P: R:

Property of Product

ผู้ใช้โปรแกรมต้องการป้อนค่าด้วยตนเอง
 ผู้ใช้โปรแกรมต้องการให้โปรแกรมคำนวณให้

ความร้อนแฝงการหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ (L, kJ/kg)
 ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (kJ/kg K)
 ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (kJ/kg K)
 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ (k, W/m K)
 จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ (Celcius)

Dimension of Product

ความหนา Slab หรือ เส้นผ่านศูนย์กลาง Cylinder และ Sphere (m)

Moisture Content of Product

ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ (เปอร์เซ็นต์)

Freezing Condition

Suggested Values of Freezing Condition

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลาง (h, W/m²K)
 อุณหภูมิของตัวกลาง (Celcius)

Density of Product

ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ (kg/m³)

Variation of Heat Transfer Coefficient (h)

ค่า h เริ่มต้น ค่า h สุดท้าย

Temperature

อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (Celcius)
 อุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ (Celcius)

Assumption of Equation

Calculate Freezing Time

รูปที่ 4.13 หน้าจอการคำนวณวิธี Nagaoka's Equation

ส่วนที่ 4 Freezing Condition

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าสภาวะการแช่แข็ง ในที่นี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลาง ($W/m^2 K$) และ อุณหภูมิของตัวกลาง (องศาเซลเซียส) ซึ่งสามารถดูค่าที่แนะนำได้ดังรูปที่ 4.5

ส่วนที่ 5 Temperature

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าอุณหภูมิ ในที่นี้ใช้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ (องศาเซลเซียส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 6 Property of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ ในที่นี้ ใช้ค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ (kJ/kg) ค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิค่าและสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (kJ/kg K) สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ (W/m K) และจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ (เซลเซียส) โดยในโปรแกรมนี้ได้มีทางเลือกเพื่อให้ความสะดวกแก่ผู้ใช้โปรแกรม คือผู้ใช้โปรแกรมสามารถป้อนค่าตัวแปรต่างๆได้ด้วยตนเอง หรือให้โปรแกรมคำนวณให้ก็ได้ เช่น ความร้อนแฝงการหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์ (จากสมการ 2.14) ค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิค่าและสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (จากสมการ 2.44 และ 2.42 ตามลำดับ) สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ (จากสมการ 2.25) และจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ (จากสมการ 2.3)

ส่วนที่ 7 Density of Product

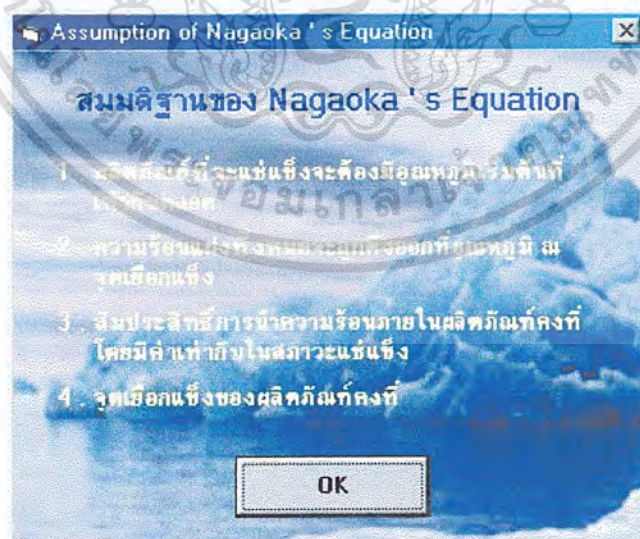
ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา (kg/m^3)

ส่วนที่ 8 Variation of Heat Transfer Coefficient

เป็นส่วนที่ใช้ในการศึกษาถึงการแปรผันของค่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งที่เปลี่ยนแปลงตามค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลางที่เปลี่ยนแปลงไป และค่าส่วนนี้จะนำไปสร้างเป็นกราฟเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนขึ้น

ส่วนที่ 9 Assumption of Equation

เมื่อคลิกปุ่มนี้แล้ว จะปรากฏหน้าจอแสดงสมมติฐานของวิธีที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 4.14 หน้าจอแสดงสมมติฐานของ Nagaoka's Equation

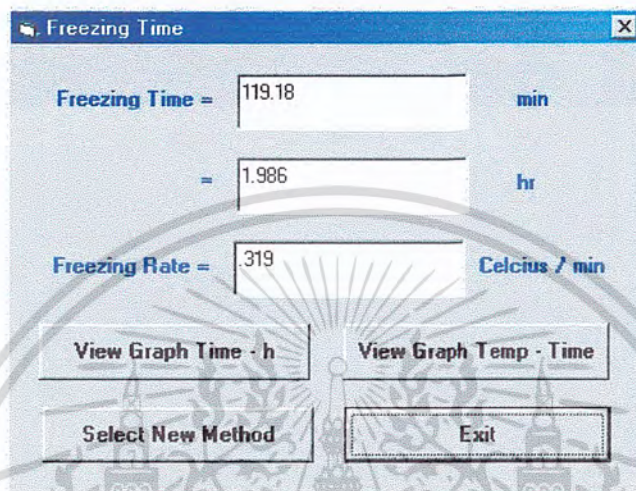
เมื่อผู้ใช้โปรแกรมอ่านสมมติฐานเรียบร้อยแล้ว เมื่อคลิกปุ่ม “OK” จะกลับสู่

หน้าจอการคำนวณดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 10 Calculate Freezing Time

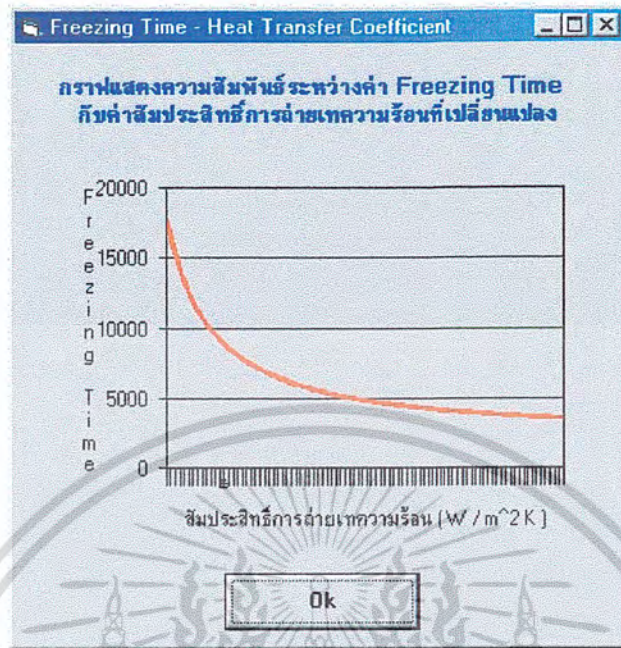
หลังจากป้อนค่าทุกค่าเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้โปรแกรมคลิกปุ่ม “ Calculate Freezing Time ” เพื่อคำนวณหาค่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์ และอัตราการแช่แข็ง (Celcius / min) เมื่อคลิกปุ่มแล้วจะปรากฏหน้าจอแสดงผลดังรูป



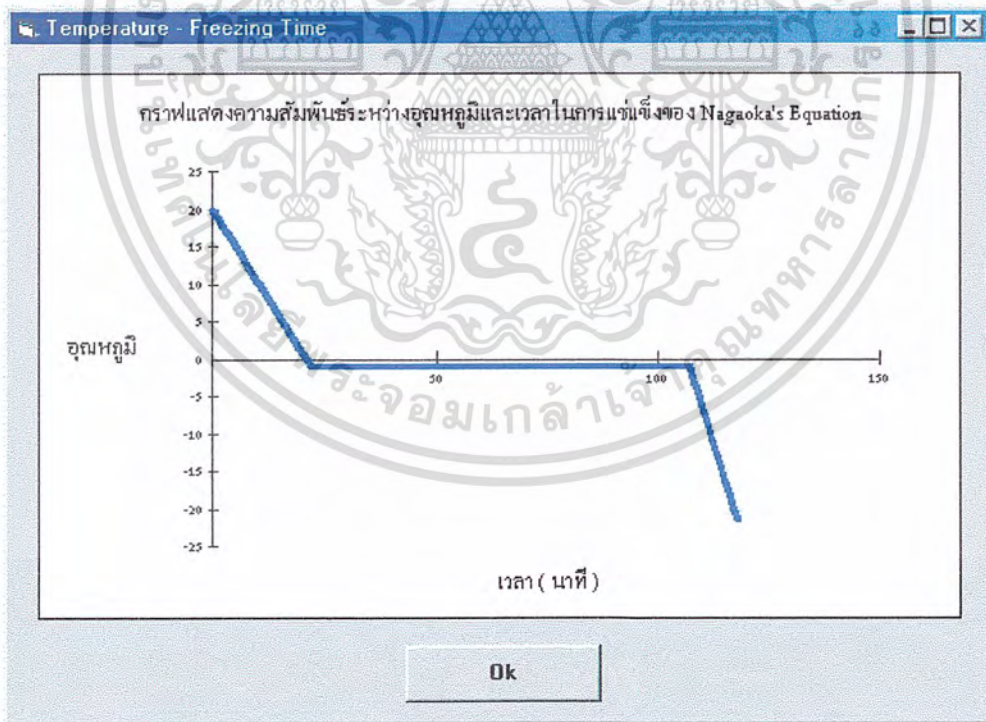
รูปที่ 4.15 หน้าจอแสดงผลของ Nagaoka's Equation

โดยที่หน้าจอจะมีปุ่ม “ Select New Method ” ซึ่งใช้ในการเลือกคำนวณโดยวิธีอื่นต่อไป ปุ่ม “ Exit ” ซึ่งเป็นการจบการทำงานของโปรแกรม และยังมีอีก 2 ปุ่มที่เพิ่มเข้ามาคือ “ View Graph Time - h ” และ “ View Graph Temp - Time ” ซึ่งปุ่มแรกนั้นเป็นปุ่มที่ใช้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง (วินาที) กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลาง ($W / m^2 K$) ดังรูปที่ 4.16

สำหรับปุ่ม “ View Graph Temp - Time ” นั้นเป็นปุ่มที่ใช้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางผลิตภัณฑ์ (เซลเซียส) กับเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง (นาที) ซึ่งรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก กราฟแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 หน้าจอแสดงกราฟ Time – h ของ Nagaoka 's Equation



รูปที่ 4.17 หน้าจอแสดงกราฟ Temp – Time ของ Nagaoka 's Equation

หมายเหตุ สำหรับการป้อนค่าของผู้ใช้โปรแกรมนั้น ถ้าผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าไม่ถูกต้อง จะมีหน้าจอเตือนให้แก้ไขค่าให้ถูกต้อง ดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 Numerical Method

จากหน้าจอการเลือกวิธีที่ใช้ในการคำนวณ เมื่อผู้ใช้โปรแกรมคลิกเลือก Numerical Method แล้วคลิกปุ่ม “OK” จะปรากฏหน้าจอการคำนวณวิธี Numerical Method ขึ้นมาดังรูป

The screenshot shows a software window titled "Numerical Method" with the following sections and inputs:

- Shape of Product:**
 - สี่เหลี่ยมบางยาวไม่จำกัด (Infinite Slab)
 - ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด (Infinite Cylinder)
 - ทรงกลม (Sphere)
- Property of Product:**
 - ผู้ใช้โปรแกรมต้องการป้อนค่าด้วยตนเอง
 - ผู้ใช้โปรแกรมต้องการให้โปรแกรมคำนวณไว้
 - จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ (Celcius): -96
- Dimension of Product - Numbers of Node:**
 - ขนาดของผลิตภัณฑ์ (m): 0.1
 - จำนวนชั้นย่อยที่แบ่งเพื่อศึกษา: 5
- Moisture Content of Product:**
 - ผลิตภัณฑ์ประเภทผัก, ผลไม้, น้ำผลไม้ที่มีความชื้นอยู่ในช่วง 75 - 94 เปอร์เซ็นต์
 - ผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อสัตว์ที่มีความชื้นอยู่ในช่วง 73 - 84 เปอร์เซ็นต์
 - ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ (เปอร์เซ็นต์): 84
- Freezing Condition:**
 - Suggested Values for Freezing Condition**
 - สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลาง (h, W/m²K): 30
 - อุณหภูมิของตัวกลาง (Celcius): -30
- Temperature:**
 - อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (Celcius): 20
 - อุณหภูมิต่ำสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ (Celcius): -18
- Density of Product:**
 - ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ (kg/m³): 840
- Time Increment:**
 - ผลต่างเวลา (sec): 120
- Assumption of Method:**
 - Calculate Freezing Time

รูปที่ 4.18 หน้าจอการคำนวณวิธี Numerical Method

โดยหน้าจอจะแบ่งเป็นส่วนๆ ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าตามที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 1 Shape of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมคลิกเลือกรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา โดยแบ่งเป็น Infinite Slab , Infinite Cylinder และ Sphere

ส่วนที่ 2 Dimension of Product – Numbers of Node

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าขนาดของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา (เมตร) และจำนวนชั้นย่อยที่แบ่งเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ตามรูปที่ 3.5 , 3.6 และ 3.7

ส่วนที่ 3 Moisture Content of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมเลือกว่าผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษานั้น เป็นผลิตภัณฑ์ประเภทใด โดยมีให้เลือกระหว่าง ผลิตภัณฑ์ประเภทผัก ผลไม้และน้ำผลไม้ที่มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 75 – 94 เปอร์เซ็นต์ และ ผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อสัตว์ที่มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 73 -84 เปอร์เซ็นต์ แล้วป้อนค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ (เปอร์เซ็นต์) ลงในช่องว่าง

ส่วนที่ 4 Freezing Condition

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าสภาวะการแช่แข็ง ในที่นี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของตัวกลาง ($W / m^2 K$) และ อุณหภูมิของตัวกลาง (องศาเซลเซียส) ซึ่งสามารถดูค่าที่แนะนำได้ดังรูปที่ 4.5

ส่วนที่ 5 Property of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ ในที่นี้ ใช้ค่าจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ (เซลเซียส) โดยใน โปรแกรมนี้ ได้มีทางเลือกเพื่อให้ความสะดวกแก่ผู้ใช้โปรแกรม คือ ผู้ใช้โปรแกรมสามารถป้อนค่าตัวแปรต่างๆ ได้ด้วยตนเอง หรือให้โปรแกรมคำนวณให้ก็ได้

ส่วนที่ 6 Temperature

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าอุณหภูมิ ในที่นี้ใช้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ (องศาเซลเซียส)

ส่วนที่ 7 Density of Product

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษา (kg / m^3)

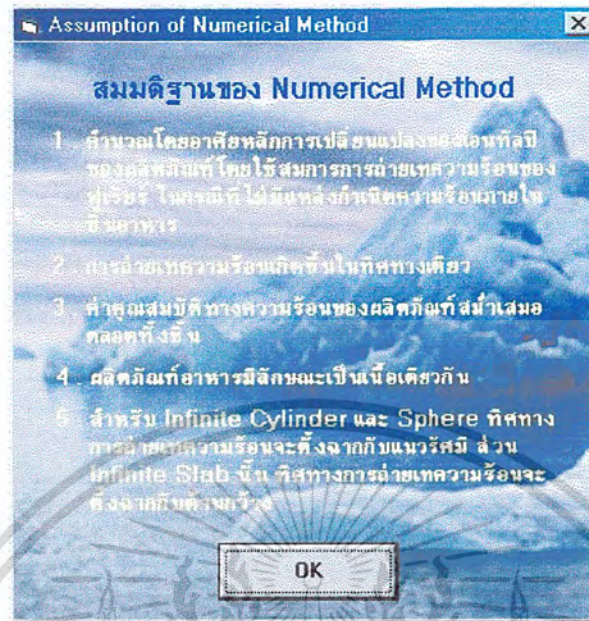
ส่วนที่ 8 Time Increment

ให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าผลต่างเวลาที่ใช้ในการคิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางชิ้นอาหารในช่วงเวลาต่างๆ (วินาที) ระหว่างการแช่แข็ง

ส่วนที่ 9 Assumption of Method

เมื่อคลิกปุ่มนี้แล้ว จะปรากฏหน้าจอแสดงสมมติฐานของวิธีที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

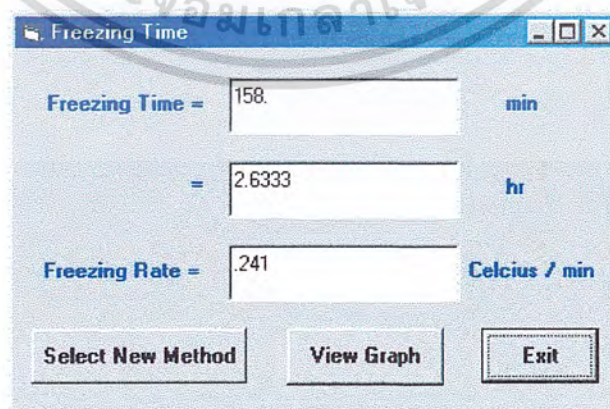


รูปที่ 4.19 หน้าจอแสดงสมมติฐานของ Numerical Method

เมื่อผู้ใช้โปรแกรมอ่านสมมติฐานเรียบร้อยแล้ว เมื่อคลิกปุ่ม “OK” จะกลับสู่หน้าจอการคำนวณดังเดิม

ส่วนที่ 10 Calculate Freezing Time

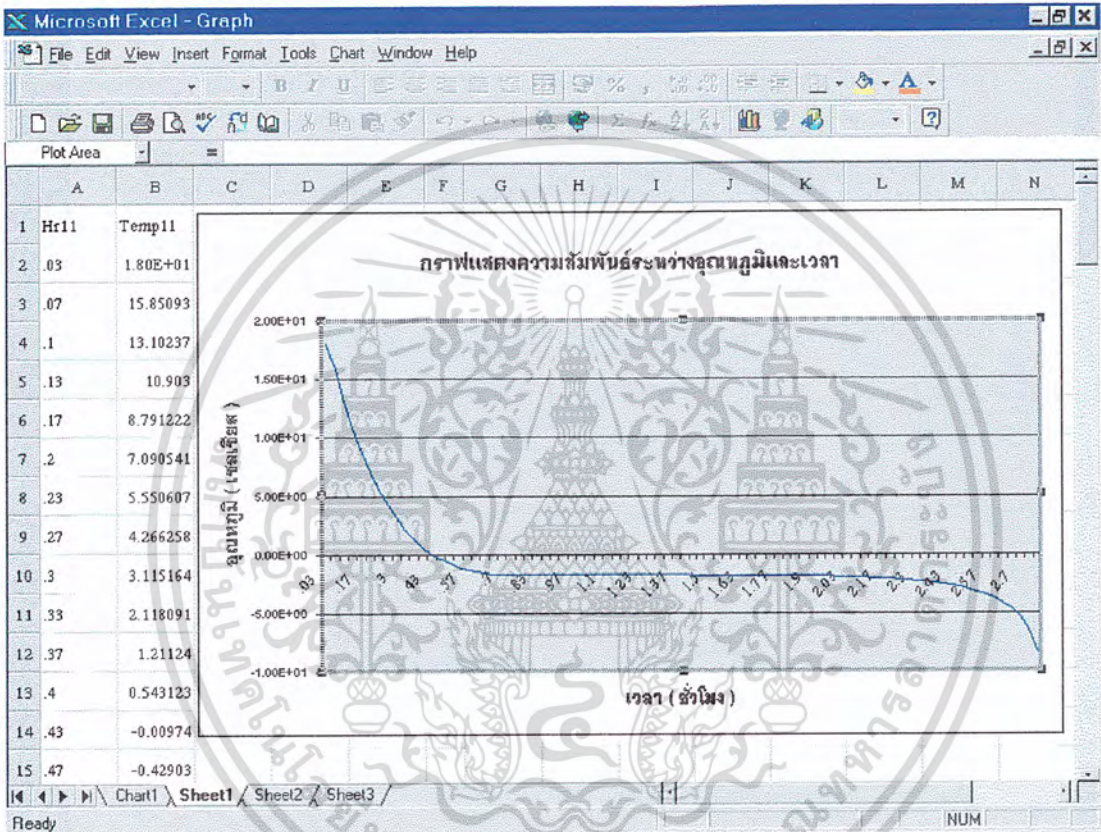
หลังจากป้อนค่าทุกค่าเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้โปรแกรมคลิกปุ่ม “Calculate Freezing Time” เพื่อคำนวณหาค่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์ และอัตราการแช่แข็ง (Celcius / min) เมื่อคลิกปุ่มแล้วจะปรากฏหน้าจอแสดงผลดังรูป



รูปที่ 4.20 หน้าจอแสดงผลของ Numerical Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่หน้าจอนี้จะมีปุ่ม “ Select New Method ” ซึ่งใช้ในการเลือกคำนวณ โดยวิธีอื่นต่อไป และปุ่ม “ Exit ” ซึ่งเป็นการจบโปรแกรม (เหมือน Plank’s Equation) แต่จะมีปุ่มที่เพิ่มขึ้นมาคือ ปุ่ม “ View Graph ” ซึ่งจะนำข้อมูลไปสร้างกราฟบน โปรแกรม Microsoft Excel ดังรูป



รูปที่ 4.21 หน้าจอแสดงข้อมูลและกราฟของ Numerical Method บนโปรแกรม Excel

หมายเหตุ สำหรับการป้อนค่าของผู้ใช้โปรแกรมนั้น ถ้าผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าไม่ถูกต้อง จะมีหน้าจอเตือนให้แก้ไขค่าให้ถูกต้อง ดังรูปที่ 4.7

เมื่อต้องการเลิกการทำงาน ให้คลิกปุ่ม “ Exit ” จะเป็นการออกจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบโปรแกรม

จากตัวอย่างการคำนวณ โดยผู้ใช้โปรแกรมต้องการให้โปรแกรมคำนวณค่า
คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์อาหารให้ ได้ค่าดังตาราง

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณและผลการคำนวณของแต่ละสมการ

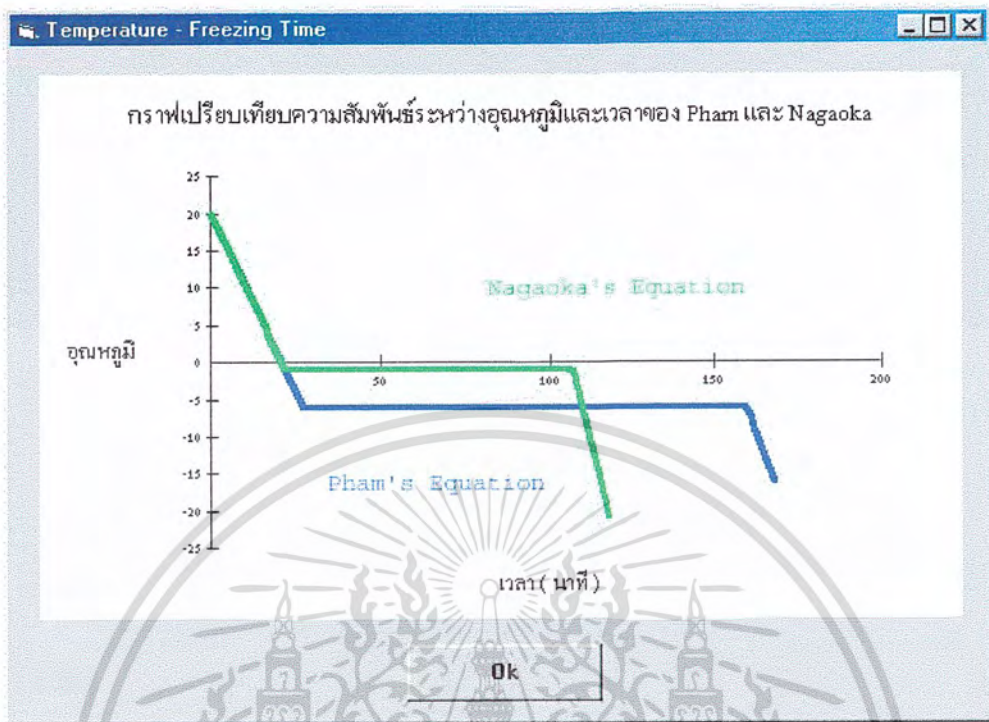
วิธีการคำนวณ	ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ	ค่าที่ใช้ คำนวณ	เวลาที่ได้ (นาที)
1.Plank's Equation	ปริมาณความชื้น (%)	84	103.256
	อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง (°C)	-0.96	
	อุณหภูมิตัวกลาง (°C)	-30	
	ความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	0.1	
	ความหนาแน่น (kg / m ³)	840	
	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ / kg)	298.2	
	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W / m ² K)	30	
	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W / mK)	2.058	
2.Pham's Equation	ปริมาณความชื้น (%)	84	169.662
	อุณหภูมิตัวกลาง (°C)	-30	
	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	20	
	อุณหภูมิสุดท้าย (°C)	-18	
	ความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	0.1	
	ความหนาแน่น (kg / m ³)	840	
	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ / kg)	298.2	
	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W / m ² K)	30	
	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W / mK)	2.058	
	ความร้อนจำเพาะเหนือจุดเยือกแข็ง (kJ / kg K)	3.65	
	ความร้อนจำเพาะต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (kJ / kg K)	1.892	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณและผลการคำนวณของแต่ละสมการ

วิธีการคำนวณ	ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ	ค่าที่ใช้ คำนวณ	เวลาที่ได้ (นาที)
3.Nagaoka's Equation	ปริมาณความชื้น (%)	84	119.18
	อุณหภูมิตัวกลาง (°C)	-30	
	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	20	
	อุณหภูมิสุดท้าย (°C)	-18	
	อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง (°C)	-0.96	
	ความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	0.1	
	ความหนาแน่น (kg/m ³)	840	
	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)	298.2	
	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m ² K)	30	
	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	2.058	
	ความร้อนจำเพาะเหนือจุดเยือกแข็ง (kJ/kgK)	3.65	
	ความร้อนจำเพาะต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (kJ/kgK)	1.892	
4.Numerical Method	ปริมาณความชื้น (%)	84	158
	อุณหภูมิตัวกลาง (°C)	-30	
	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	20	
	อุณหภูมิสุดท้าย (°C)	-18	
	อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง (°C)	-0.96	
	ความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	0.1	
	ความหนาแน่น (kg/m ³)	840	
	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m ² K)	30	
	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	1.032	
	ความร้อนจำเพาะเหนือจุดเยือกแข็ง (kJ/kgK)	3.65	
	ความร้อนจำเพาะต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (kJ/kgK)	1.892	
	จำนวนชั้นย่อยที่แบ่ง (ชั้น)	5	
	ผลต่างเวลา (sec)	120	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จากสมการของ Nagaoka และ Pham

จากการคำนวณโดย Numerical Method ซึ่งมีค่าตัวแปรที่ใช้ดังตารางที่ 4.1 ข้อ 4 เพื่อเปรียบเทียบเวลาในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารทั้ง 3 รูปร่าง ที่มีความหนาของสี่เหลี่ยมขึ้นบางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกยาวและทรงกลม ได้ค่าดังตาราง

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบเวลาในการแช่แข็งของผลิตภัณฑ์อาหารทั้ง 3 รูปร่าง

ผลการคำนวณ	Infinite Slab	Infinite Cylinder	Sphere
เวลาในการแช่แข็ง (นาที)	408	234	158
อัตราการแช่แข็ง (เซลเซียส / นาที)	0.093	0.162	0.241

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหาร (Computer Program For The Prediction of Freezing Time of Food Products) เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Microsoft Visual Basic 6.0 สำหรับคำนวณเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งผลิตภัณฑ์ 3 รูปร่าง โดยใช้วิธีการคำนวณเป็น 2 วิธี คือ วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) แบ่งเป็น Plank's Equation (1913), Nagaoka's Equation (1955), Pham's Equation (1984, 1985) กับวิธีเชิงเลข (Numerical Method) ซึ่งอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี (Mannapperuma and Singh, 1988)

ผลการทดสอบโปรแกรม โดยการเปรียบเทียบวิธีการทำนายเวลาในการแช่แข็งแบบต่างๆ เมื่อใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ พบว่าสมการของ Plank ใช้เวลาในการแช่แข็งน้อยสุด เนื่องจาก Plank's Equation กำหนดให้อาหารเริ่มแช่แข็งที่อุณหภูมิจุดเยือกแข็งผลิตภัณฑ์ ไม่ได้ใช้อุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ ทำให้ค่าเวลาที่ได้เป็นเวลาในช่วงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เท่ากับอุณหภูมิจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจาก Pham's Equation และ Nagaoka's Equation ที่นำอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิตสุดท้ายของผลิตภัณฑ์มาพิจารณาควบคู่ไปด้วย ทำให้ได้ค่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งมากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Nagaoka's Equation และ Pham's Equation จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งของ Pham's Equation มากกว่า เพราะนำค่าจุดเยือกแข็งเฉลี่ยมาใช้ ซึ่งแตกต่างจาก Nagaoka's Equation ที่นำค่าจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์มาใช้เลย

ส่วนวิธีเชิงเลข (Numerical Method) ซึ่งอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี (Mannapperuma and Singh, 1988) นั้น เป็นวิธีที่สามารถทำนายเวลาได้ละเอียดกว่าวิธีเชิงวิเคราะห์ เนื่องจากแบ่งผลิตภัณฑ์อาหารเป็นชั้นย่อย แล้ววิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลา คำนวณจนกระทั่งอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางชิ้นอาหารมีค่าเท่ากับอุณหภูมิตสุดท้ายที่ต้องการ ทำให้ค่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งมีความละเอียดมากขึ้น

ผลของการทดสอบโปรแกรมโดยใช้วิธีเชิงเลขกับอาหารที่มีรูปร่าง 3 แบบ คือ สี่เหลี่ยมชิ้นบาง ทรงกระบอกยาว และทรงกลม ที่มีความหนาของสี่เหลี่ยมชิ้นบางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกยาวและทรงกลม โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ จะพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะทรงกลมจะใช้เวลาในการแช่แข็งน้อยที่สุด เนื่องจากทรงกลมเป็นรูปร่างที่ถ่ายเทความร้อนได้เร็วที่สุด ตามด้วยทรงกระบอกยาว และลักษณะสี่เหลี่ยมซึ่งบางใช้เวลาในการแช่แข็งนานที่สุด

โปรแกรมนี้มีข้อดี คือ ในกรณีที่ใช้โปรแกรมไม่มีความรู้เกี่ยวกับการแช่แข็งอาหาร โปรแกรมสามารถคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆของอาหาร จากค่าปริมาณความชื้นให้ได้ โปรแกรมนี้ยังช่วยให้มีความสะดวกและรวดเร็วในการคำนวณ รวมทั้งยังสามารถศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่อเวลาในการแช่แข็งได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ก.1 การหาอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของผลิตภัณฑ์เป็นฟังก์ชันกับเวลาจาก Pham 's Equation

$$t = \frac{V}{hA} \left[\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right] \left[1 + \frac{Bi}{4} \right] \quad \dots (3.2)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \Delta H_1 &= C_{pu} (T_1 - T_{fm}) \\ \Delta H_2 &= L + C_{pi} (T_{fm} - T_C) \\ \Delta T_1 &= (T_1 + T_{fm}) / 2 + T_M \\ \Delta T_2 &= T_{fm} - T_M \\ T_{fm} &= 1.8 + 0.263 T_C + 0.105 T_M \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

จากสมการ (3.2) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\Delta H = [t * h * A] / [V * (1 + (Bi_s / 4))] \quad \dots (ก.1)$$

$$\text{เมื่อ } \Delta H = [(\Delta H_1 / \Delta T_1) + (\Delta H_2 / \Delta T_2)] = H_1 - H_2 \quad \text{จะได้}$$

$$H_2 = H_1 - [t * h * A] / [V * (1 + (Bi_s / 4))] \quad \dots (ก.2)$$

เมื่อ $H_1 =$ เอนทัลปีที่เวลา $t=0$

$$= [(C_{pu} (T_1 - T_{fm})) / (((T_1 + T_{fm}) / 2 - T_M)] + [(L + C_{pi} (T_{fm} - T_C)) / (T_{fm} - T_M)]$$

$H_2 =$ เอนทัลปีที่เวลาใดๆ

จากสมการ (ก.2) เราสามารถทราบค่า H_2 ที่เวลา t ใดๆ ทำให้สามารถหาอุณหภูมิที่เวลา t ใดๆ ได้

ถ้า $H_2 > B, T > T_F$ จะได้

$$T = [((H_2 - (\Delta H_2 / \Delta T_2)) * (\Delta T_1)) / C_{pu}] + T_{fm} \quad \dots (ก.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า $B \geq H_2 \geq C$ จะได้ $T = T_F$

ถ้า $H_2 < C, T < T_F$ จะได้

$$T = [(H_2 * \Delta T_2) / C_{pi}] + T_C \quad \dots (ก.4)$$

และสามารถแบ่งช่วงเอนทัลปี (H) ได้ดังนี้

เมื่อ $T > T_F$ จะได้ $H = A$ โดย

$$A = [(C_{pu} (T - T_{fm})) / (((T_i + T_{fm}) / 2 - T_M))] + [(L + C_{pi} (T_{fm} - T_C)) / (T_{fm} - T_M)] \dots (ก.5)$$

เมื่อ $T = T_F$ จะได้ $B \geq H \geq C$ โดย

$$B = [(L + C_{pi} (T_{fm} - T_C)) / (T_{fm} - T_M)] \quad \dots (ก.6)$$

$$C = [(C_{pi} (T_{fm} - T_C)) / (T_{fm} - T_M)] \quad \dots (ก.7)$$

เมื่อ $T < T_F$ จะได้ $H = D$ โดย

$$D = [(C_{pi} (T - T_C)) / (T_{fm} - T_M)] \quad \dots (ก.8)$$

ก.2 การหาอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของผลิตภัณฑ์เป็นฟังก์ชันกับเวลาจาก Nagaoka's Equation

$$t = \frac{\Delta H \rho}{T_F - T_M} \left[\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k} \right] \quad \dots (3.3)$$

จากสมการ (3.3) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\Delta H = \frac{t(T_F - T_M)}{[(Pd/h) + (Rd^2/k)] \rho} \quad \dots (ก.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $\Delta H = H_1 - H_2$ จะได้

$$H_2 = H_1 - \Delta H \quad \dots (ก.10)$$

เมื่อ $H_1 =$ เอนทัลปีที่เวลา $t=0$

$$= [1 + 0.00445 (T_1 - T_F)] [C_{pu} (T_1 - T_F) + L + C_{pi} (T_F - T_C)]$$

$H_2 =$ เอนทัลปีที่เวลาใดๆ

จากสมการ (ก.10) สามารถทราบค่า H_2 ที่เวลา t ใดๆ ทำให้สามารถหาอุณหภูมิที่เวลา t ใดๆ ได้ดังนี้

ถ้า $H_2 > B, T > T_F$ จะได้

$$T = \left[\frac{(H_2 / (1 + 0.00445 (T_1 - T_F))) - L - C_{pi} (T_F - T_C)}{C_{pu}} \right] + T_F \quad \dots (ก.11)$$

ถ้า $B \geq H_2 \geq C$ จะได้ $T = T_F$

ถ้า $H_2 < C, T < T_F$ จะได้

$$T = \left[\frac{(H_2 / (1 + 0.00445 (T_1 - T_F)))}{C_{pi}} \right] + T_C \quad \dots (ก.12)$$

และสามารถแบ่งช่วงเอนทัลปี (H) ได้ดังนี้

เมื่อ $T > T_F$ จะได้ $H = A$ โดย

$$A = [1 + 0.00445 (T_1 - T_F)] [C_{pu} (T - T_F) + L + C_{pi} (T_F - T_C)] \quad \dots (ก.13)$$

เมื่อ $T = T_F$ จะได้ $B \geq H \geq C$ โดย

$$B = [1 + 0.00445 (T_1 - T_F)] [L + C_{pi} (T_F - T_C)] \quad \dots (ก.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = [1 + 0.00445 (T_1 - T_F)] [C_{pi} (T_F - T_C)] \quad \dots (ก.15)$$

เมื่อ $T < T_F$ จะได้ $H = D$ โดย

$$D = [1 + 0.00445 (T_1 - T_F)] [C_{pi} (T - T_C)] \quad \dots (ก.16)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตาราง ข.1 คุณสมบัติของอาหาร

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณความชื้น (%)	จุดเยือกแข็ง (°C)	Cp ก่อนจุดเยือกแข็ง (kJ/kgK)	Cp หลังจุดเยือกแข็ง (kJ/kgK)	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
ผักและผลไม้							
แอปเปิ้ลแดง	84.0	-1.75	3.72	1.82	284.0	0.513	840
แอปริคอต	85.0	-2.25	3.85	2.10	284.0	0.375	1323
อะโวคาโด	65.0	-0.30	3.30	1.66	218.0	0.429	1060
กล้วย	75.0	-1.00	3.77	2.10	251.0	0.481	980
แครนเบอร์รี่	88.0	-2.75	3.81	1.97	284.0	-	-
อินทผลัม	18.0	-15.50	2.17	1.09	67.0	0.337	1319
องุ่น	82.0	-2.00	3.77	2.55	260.0	0.567	-
เสาวรส	79.0	-2.00	3.81	2.10	298.0	0.549	950
มะนาวฝรั่ง	88.0	-2.25	3.81	2.10	293.0	0.490	1000
มะนาว	88.0	-4.50	3.81	2.10	293.0	0.525	930
ส้ม	81.0	-2.00	3.81	1.84	291.0	0.431	1030
ท้อ	90.0	-1.50	3.81	1.72	298.0	0.585	990
ทับประรด	88.0	-1.25	3.77	2.10	298.0	0.549	1010

ตาราง ข.1 คุณสมบัติของอาหาร (ต่อ)

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณความชื้น (%)	จุดเยือกแข็ง (°C)	Cp ก่อนจุดเยือกแข็ง (kJ/kgK)	Cp หลังจุดเยือกแข็ง (kJ/kgK)	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
ผักและผลไม้							
เป็ร์	84.0	-2.25	3.81	2.10	284.0	0.550	1000
พวรน	80.0	2.25	3.68	2.00	270.0	0.375	1219
มะตูม	85.0	2.25	3.77	2.10	284.0	-	-
มะม่วง	81.0	-0.90	3.70	1.86	271.0	-	-
สตอเบอรี่	90.0	-0.80	3.93	1.97	302.0	0.675	801
หน่อไม้ฝรั่ง	94.0	-1.25	3.81	2.05	314.0	-	-
ถั่วถัสนเตา	83.0	-1.25	3.64	1.97	277.0	0.312	-
ดอกกะหล่ำ	92.5	-1.00	3.77	1.92	309.0	-	-
บรอกเคอรี่	93.0	-1.50	3.77	2.01	314.0	0.385	-
หัวบรืตเซต	94.5	-0.50	3.81	2.05	316.0	-	-
แครอท	88.0	-0.50	3.60	1.88	293.0	0.605	1040
มันฝรั่ง	78.5	-1.75	3.60	1.97	263.0	0.554	1040
ผักโขม	90.0	-1.00	3.85	2.13	300.0	-	-

ตาราง ข.1 คุณสมบัติของอาหาร (ต่อ)

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณความชื้น (%)	จุดเยือกแข็ง (°C)	Cp ก่อนจุดเยือกแข็ง (kJ/kg.K)	Cp หลังจุดเยือกแข็ง (kJ/kg.K)	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.K)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
เนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์							
เนื้อวัว	67.0	-2.22	3.35	1.68	224.0	0.476	1090
เนื้อสุกวัว	66.0	-	3.33	1.67	221.0	0.441	-
เนื้อหมู	42.0	-2.22	2.6	1.31	124.0	0.488	-
เนื้อไก่	66.0	-2.78	3.35	1.76	246.6	0.412	-
เนื้อไก่ทรง	74.0	-2.78	3.01	1.63	214.0	0.523	-
เนื้อเป็ด	52.8	-2.78	3.18	1.72	230.2	0.412	-
เนื้อแกะ	71.8	-2.22	3.20	1.61	218.0	0.450	1057
กุ้ง	83.0	-2.22	3.39	1.80	253.5	0.490	1082
ปลา	68.8	-2.22	3.35	1.67	208.0	0.557	1009
เบคอน	19.0	-	2.15	1.08	64.0	-	-
ไข่กรอก	68.0	-1.67	2.60	1.47	167.5	0.407	1000
เนย	15.0	-	2.07	1.05	53.5	0.197	910
ไข่ไก่	74.0	-0.600	3.35	1.76	246.6	0.970	-
แฮม	56.0	-1.70	3.08	1.55	188.0	0.480	1090

ตาราง ข.2 ค่าสัดส่วนความชื้น, H_F , a , b , C_p ของอาหาร

ผลิตภัณฑ์	สัดส่วนความชื้น (M_w)	T_F (K)	H_F (kJ/kg)	C_p (J/kg K)	a	b
ผักและผลไม้						
สตอเบอรี่	0.893	272.26	374.72	4527.8	0.27	24.20
หน่อไม้ฝรั่ง	0.926	272.48	383.32	4576.0	0.23	25.90
มะเขือเทศ	0.929	272.43	387.74	4624.1	0.25	25.10
แครอท	0.875	272.04	365.18	4479.6	0.30	21.52
แอปเปิ้ล	0.828	271.48	347.74	4287.0	0.34	18.84
ลูกแพร์	0.838	271.54	349.37	4287.0	0.33	19.16
ลูกพีช	0.851	271.59	354.25	4335.1	0.31	19.64
หัวหอม	0.855	271.71	356.81	4383.3	0.31	19.60
ผักขม	0.902	272.59	374.25	4479.6	0.24	26.60
น้ำผลไม้						
น้ำองุ่น	0.847	271.08	350.99	4383.3	0.32	18.35
น้ำเชอร์รี่	0.867	271.71	360.06	4431.5	0.31	19.26
น้ำแอปเปิ้ล	0.872	272.71	361.46	4431.5	0.31	19.86
น้ำราสเบอร์รี่	0.885	271.93	369.37	4479.6	0.29	21.06
น้ำส้ม	0.890	271.98	369.60	4479.6	0.29	21.30
น้ำบาร์เบอร์รี่	0.895	272.04	372.16	4479.6	0.28	21.60
น้ำสตอเบอรี่	0.917	272.26	381.70	4576.0	0.26	23.80
เนื้อสัตว์						
เนื้อวัว	0.745	272.37	312.85	4046.1	0.31	22.00
เนื้อไก่	0.760	272.21	312.95	4094.3	0.30	21.40
เนื้อกวาง	0.730	272.26	302.85	4046.1	0.32	19.10
เนื้อลูกวัว	0.765	272.26	317.27	4093.4	0.31	22.97
เนื้อปลา cod	0.803	272.37	332.62	4238.8	0.30	23.10
เนื้อปลา haddock	0.803	272.43	345.88	4287.0	0.28	23.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.3 ค่าความหนาแน่นของส่วนประกอบของอาหารที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg / m ³)				
	น้ำ	โปรตีน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรต	ชี้เต้า
20	997.6	1289.4	916.4	1424.6	1734.4
30	995.2	1272.2	913.5	1413.3	1731.2
40	991.2	1258.4	906.7	1399.2	1719.8
50	986.8	1246.2	902.7	1386.4	1704.7
60	983.3	1231.4	894.3	1369.5	1691.5
70	978.2	1222.6	884.9	1358.2	1679.1
80	971.5	1212.9	880.0	1346.4	1668.8
90	965.0	1204.3	876.0	1337.2	1658.4
100	958.0	1198.4	874.2	1331.7	1649.3

ตาราง ข.4 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของส่วนประกอบของอาหารที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W / m ² K)				
	น้ำ	โปรตีน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรต	ชี้เต้า
20	0.6012	0.1993	0.1765	0.2039	0.1365
30	0.6191	0.2109	0.1759	0.2178	0.1402
40	0.6332	0.2182	0.1737	0.2285	0.1430
50	0.6464	0.2291	0.1724	0.2386	0.1480
60	0.6542	0.2349	0.1708	0.2463	0.1543
70	0.6643	0.2475	0.1686	0.2594	0.1577
80	0.6712	0.2528	0.1669	0.2632	0.1619
90	0.6768	0.2553	0.1656	0.2665	0.1642
100	0.6827	0.0622	0.1645	0.2723	0.1645

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.5 ค่าความร้อนจำเพาะของส่วนประกอบของอาหารที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความร้อนจำเพาะ (kJ / kg K)				
	น้ำ	โปรตีน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรต	ชี้ถ้ำ
20	4.180	1.711	1.928	1.547	0.908
30	4.172	1.765	1.953	1.586	0.937
40	4.174	1.775	1.981	1.626	0.947
50	4.176	1.842	2.004	1.639	0.976
60	4.179	1.891	2.036	1.691	1.010
70	4.185	1.914	2.062	1.734	1.025
80	4.193	1.942	2.098	1.768	1.045
90	4.199	1.967	2.124	1.787	1.057
100	4.210	1.993	2.141	1.824	1.059

ตาราง ข.6 คุณสมบัติน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W / m ² K)	ความร้อนจำเพาะ C _{pl} (kJ / kg K)	ความหนาแน่น (kg / m ³)
0.0	2.22	2.05	924.2
-7.0	2.27	2.02	922.6
-12.0	2.32	1.98	919.4
-18.0	2.37	1.95	919.4
-23.0	2.41	1.92	919.4
-45.5	2.72	1.78	917.8
-73.0	3.08	1.58	916.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุกท่าน ที่ช่วยให้โครงการนี้สำเร็จลงด้วยดี

- ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา สำหรับคำแนะนำในการดำเนินการตลอดจนการแก้ปัญหาต่างๆ
- พ่อ และ แม่ ที่ให้การสนับสนุนทางด้านทุนทรัพย์และให้กำลังใจ
- คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่าน สำหรับคำติชม และการอบรมสั่งสอนความรู้ทางวิชาการ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์ในการดำเนินการ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน สำหรับคำปรึกษาและกำลังใจที่มีให้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. เจ็มทอง นิมจินดา, “ ทฤษฎีอาหาร ”, ตำรา-เอกสารวิชาการฉบับที่ 81 ภาคพัฒนาตำรา และ เอกสารวิชาการ หน่วยศึกษานิเทศก์ กรมการฝึกหัดครู, 2538 .
2. ปานมนัส สิริสมบุญ, พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, สาทิป รัตนภาสกร, “ สมบัติทางกายภาพ และวิศวกรรมของชีวะวัสดุ ”, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538 .
3. มจรูดา จิโนรส, “ โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบห้องเย็นของผักและผลไม้ ”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542 .
4. วิวัฒน์ ต้นเถียร, “ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายเวลาในการแช่แข็ง ผักและผลไม้ ”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2536 .
5. ศิริพร นิมไพฑูรย์, สุภาณี อังกูรกิจเจริญ, พูนศักดิ์ พรจินดารักษ์, “ การออกแบบและสร้าง เครื่องแช่แข็งแบบฉับพลัน (Individual Quick Frozen) ขนาดต้นแบบสำหรับผักและผลไม้ ”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2532 .
6. สิทธิชัย มาณี, สุกัลักษณ์ คงทิม, “ การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการแช่แข็ง ”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2534 .
7. สุวิข ศิริวัฒน์โยธิน, “ กระบวนการแช่แข็งอาหาร ”, การอบรม Unit Operation and HACCP Workshop, 2538, หน้า 1-27 .
8. ASHRAE, “ 1993 ASHARE Handbook Fundamentals SI Edition ”, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineer, Atlanta, 1993 .
9. Bennion, M. , “ The Science of Food ”, John Wiley & sons, 1980 .
10. Bennion, M. and Scheule, B. , “ Introductory Foods Eleventh Edition ”, Prentice Hall, 2000 .
11. Birch, G.G. , Cameron, A.G. and Spencer, M. , “ Food Science Third Edition ”, Pergamon Press, 1986 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Bowers , J. , “ Food Theory and Application Second Edition ” , Macmillan Publishing Company , 1992 .
13. Charm , S.E. , “ The Fundamentals of Food Engineering 3rd Edition ” , AVI Publishing Co. , Westport , Conn. , 1978 .
14. Choi , Y. and Okos , M.R. , “ Thermal properties of liquid food ” , In M.A. Rao and S.S.H. Rizvi. 1986 Engineering properties of food. , Marcel Dekker , Inc. , NewYork , 1983 .
15. Cleland , D.J. , “ Prediction of freezing and thawing times for foods. ” , Ph.d. thesis. , Massey University , New Zealand , 1985 .
16. Cottrel , R. , “ Food Processing ” , The Parthenon Publishing Group , 1989 .
17. Dickenson , R.W. , Jr. , “ Thermal properties of food. ” In The Freezing Preservation of food , 4th Edition , vol.2 , D.K. Tressler , W.B. Van Arsdel , and M.J. Copley (Eds .) . AVI , Westport , Conn. , 1969 .
18. Earle , R.L. , “ Unit Operation in Food Processing ” , Pergamon Press , New York , 1966 .
19. Erickson , L.N. and Hung , Y.C. , “ Quality in Frozen Food ” , Chapman & Hall , 1997 .
20. Farral , A.W. , “ Food Engineering Systems vol.I-Operation ” , The AVI Publishing Company , Inc. , 1976 , p. 1-10 .
21. Fennema , O.R. , “ Nature of The Freezing Process. In low Temperature Preservation of food and Living Matter ” , Marcel Dekker , New York , 1973 .
22. Heldman , D.R. and Hartel , R.W. , “ Principles of Food Processing ” , 1997 .
23. Heldman , D.R. and Lund , D.B. , “ Handbook of Food Engineer ” , Marcel Dekker , Inc. , 1992 .
24. Hsieh , R.C. , Lerew , L.E. , and Heldman , D.R. , “ Prediction of freezing times for foods as influenced by product properties. ” , J.Food Process Eng.1 , 1977 .
25. I.I.R. , “ International Institue of Refrigeration. Reccomendations for the Processing and Handling for Frozen Food. 2nd Ed ” , Paris , 1971 .
26. Lamb , J. , “ Influence of water on the thermal properties of foods. ” , Chem. Ind. 24 , 1976 .
27. Lewis , M.J. , “ Physical Properties of Food and Food Processing System ” , Ellis Horwood Limited , 1990 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28. Maguer , M.L. and Jelen , P. ,“ Food Engineering and Process Application vol. 1 Transport Phenomena ”, Elsevier Applied Science Publishers LTD. , 1986 .
29. Mannapperuma , J.D. and Singh , R.P. , “ Prediction of Freezing and Thawing Times of Food using Numerical Method Based on Enthalpy Formation ”, Journal of Food Science , vol. 53 , No. 2 , 1988 .
30. McWilliams , M. , “ Food Fundamental Third Edition ”, California State University , Los Angeles , 1979 .
31. Potter , N.N. , “ Food Science 4th Edition ”, Van nostrand Reinhold Company , New York , 1986 .
32. Rahman , S. , “ Food Properties Handbook ”, University of Massachusetts , Amherst , 1995 .
33. Rao , M.A. and Rizvi , S.S.H. , “ Engineering Properties of Food Second Edition , Revised and Expanded ” , 1994 .
34. Reidel , L. , “ Warmeleitfähigkeitsmessungen an Zuckerlösungen , Fruchtsaft , und Milch ” , Chemie-Ingenieur-Technik 21 , 1949 .
35. Sharma , S.K. , Mulvanay , S. J. and Rizvi , S.S.H. , “ Food Engineering Theory and Laboratory Experiments ”, John Wiley & Sons , Inc. , Publication , 2000 .
36. Siebel , J.E. , “ Specific heat of various products. ”, Ice Refrig.2 , 1892 .
37. Singh , R.P. and Heldman , D.R. , “ Introduction to Food Engineering 2th Edition ” , Academic Press , Inc. , 1993 .
38. Sweat , V.E. , “ Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetablea. ” , J. Food Sci. 39 , 1974 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้