

แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดอง

นางสาว อมมี คุณอารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-947-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MATHEMATICAL MODEL OF FREEZING TIME PREDICTION FOR CUTTLEFISH

MISS OMMEE KOON-AREE

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of The Requirements
for the Degree of Master of Science in Food Technology

Department of Food Technology

Graduate School

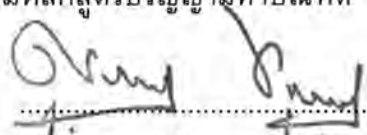
Chulalongkorn University

Academic Year 1997

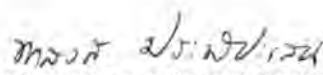
ISBN 974-638-947-5

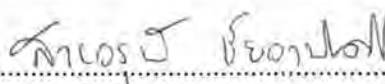
หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็ง
ปลาหมึกกระดอง
โดย นางสาว อมมี คุณอารี
ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายวรุพ ชัยวานิชศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

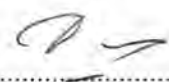

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุวัฒน์ ชุตินวงศ์)

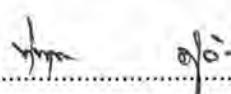
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายวรุพ ชัยวานิชศิริ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยยุทธ ชัยพิทยากุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพาพร อยู่วิทยา)

อมมี คุณอารี : แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดอง
(MATHEMATICAL MODEL OF FREEZING TIME PREDICTION FOR CUTTLEFISH) อ. ที่ปรึกษา
: ผศ.ดร. สายวรุพ ชัยวานิชศิริ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. กัลยา เลหาสงคราม , 100 หน้า.
ISBN 974-638-947-5

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดอง (*Sepia sp.*) โดยวิธีเชิงเลขและการใช้สมการอย่างง่าย ซึ่งใช้ค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกกระดอง ได้แก่ ความชื้น จุดเยือกแข็ง ความหนาแน่น ค่าสภาพนำความร้อน และค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าและต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของปลาหมึกกระดอง ตลอดจนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวขณะแช่เยือกแข็งที่หาได้จากการทดลอง

จากการหาความชื้นโดยวิธีอบแห้ง จุดเยือกแข็งโดยวิธี freezing curve ความหนาแน่นโดยวิธี buoyant force (ที่อุณหภูมิ 0° ถึง 30°C) และชั่งน้ำหนักปลาหมึกกระดองที่ทราบปริมาตร (ที่อุณหภูมิ -5° ถึง -30°C) ค่าสภาพนำความร้อนโดยวิธี transient และค่าความร้อนจำเพาะวัดโดยวิธี modified method of mixture พบว่าความชื้นของปลาหมึกกระดองเท่ากับ $81.72 \pm 2.01\%$ และจุดเยือกแข็งอยู่ระหว่าง -0.8° ถึง -1.5°C สมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (0° ถึง 30°C) มีการเปลี่ยนแปลงน้อย โดยความหนาแน่นเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $1050.75 \pm 1.06 \text{ kg/m}^3$ ค่าสภาพนำความร้อน 0.528-0.548 W/m.K และค่าความร้อนจำเพาะ 0.884-0.906 cal/g.°C สำหรับช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ความหนาแน่นลดลงจาก 985.5 kg/m^3 ถึง 959.0 kg/m^3 ค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 1.124 W/m.K ถึง 1.644 W/m.K เมื่ออุณหภูมิลดลงจาก -5° ถึง -30°C และค่าความร้อนจำเพาะลดลงจาก 1.602 cal/g.°C ถึง 0.576 cal/g.°C เมื่ออุณหภูมิลดลงจาก -10° ถึง -30°C สำหรับการวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวใช้ metal transducer พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวเพิ่มขึ้นตามความเร็วลม และความสัมพันธ์ในเทอม Nusselt number กับ Reynolds number เป็นแบบสมการกำลัง เมื่อนำค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกกระดองที่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว ไปใช้คำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งโดยวิธีเชิงเลขและการใช้สมการอย่างง่าย เปรียบเทียบกับเวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทดลอง พบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยวิธีเชิงเลขให้ความแม่นยำในการทำนายมากที่สุดโดยมีความผิดพลาด 1.5%

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร
สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิตด 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

C727253 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD: THERMAL PROPERTIES / PHYSICAL PROPERTIES / SURFACE HEAT TRANSFER COEFFICIENT / FREEZING / FREEZING TIME PREDICTION/ FOOD / CUTTLEFISH

OMMEE KOON-AREE : MATHEMATICAL MODEL OF FREEZING TIME PREDICTION FOR CUTTLEFISH.

THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. SAIWARUN CHAIWANICH SIRI, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR :

ASSOC. PROF. KALAYA LAOHASONGKRAM, Ph.D. 100 pp. ISBN 974-638-947-5

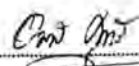
The objective of this research was to study the mathematical model of freezing time prediction for cuttlefish using the numerical and simple equation method. The thermo-physical properties (moisture content, freezing point, density, thermal conductivity, and specific heat) of cuttlefish (*Sepia sp.*) above and below freezing point and the surface heat transfer coefficient during freezing process were determined and used in the model.

The moisture content was measured by the drying method, the freezing point by the freezing curve method, the density by the buoyant force measurement at 0° to 30°C and by measuring the mass known volume cuttlefish at -5° to -30°C, the thermal conductivity by the heated probe method, and the specific heat by the modified method of mixture. The results showed that the moisture content and the freezing point of cuttlefish were 81.72± 2.01% and -0.8° to -1.5°C, respectively. At the temperature above freezing point of cuttlefish, the density, the thermal conductivity and the specific heat were 1050.75±1.06 kg/m³, 0.528-0.548 W/m.K and 0.884-0.906 cal/g.°C, respectively. At the temperature below freezing point of cuttlefish, the density decreased from 985.5 kg/m³ to 959 kg/m³ and the thermal conductivity increased from 1.124 W/m.K to 1.644 W/m.K when the temperature decreased from -5° to -30°C while the specific heat decreased from 1.602 cal/g.°C to 0.576 cal/g.°C when the temperature decreased from -10° to -30°C. The surface heat transfer coefficient during freezing process as measured by metal transducer was found to increase when the velocity increased and the correlation between Nusselt number and Reynolds number was found to be power equation. The thermo-physical properties of cuttlefish and surface heat transfer coefficient were used to calculate the freezing time for cuttlefish by the numerical and simple equation methods. The result showed that the numerical method gave a better freezing time prediction with the mean error of 1.5%

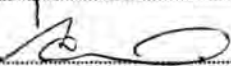
ภาควิชา..... เทคโนโลยีทางอาหาร

สาขาวิชา..... เทคโนโลยีทางอาหาร

ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อนิสิต..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... 

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ และ รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยา เลหาสงคราม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ทางด้านวิชาการที่มีส่วนสำคัญยิ่งในงานวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ตลอดจน ให้คำแนะนำในการทำงาน การเขียนวิทยานิพนธ์ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในด้านต่างๆ โดยให้กำลังใจที่ติดตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยยุทธ ัญพิทยากุล ที่ให้คำแนะนำใน ด้านวิชาการ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะที่ให้ประโยชน์ในงานวิจัย และช่วยตรวจวิทยานิพนธ์ ให้ดียิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. พาสวดี ประทีปะเสน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพาพร อยู่วิทยา คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยตรวจและแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาต่างๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ใน วิชาการต่างๆ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยทำให้งานวิจัยสำเร็จ ได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ช่วยประกอบ เครื่องมือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกในการ ใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณคุณสุเทพ อมรรังสิโรจน์ ที่ให้คำปรึกษาการเขียนโปรแกรม FORTRAN ที่เป็นส่วนสำคัญในงานวิจัย และขอขอบคุณพี่-น้อง เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโททุกท่าน ที่เป็นกำลังใจให้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนด้านการเงินและเป็นกำลังใจแก่ ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	2
2.1 ปลาหมึกกระดอง.....	2
2.2 สมบัติทางกายภาพและความร้อนของอาหาร.....	3
2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว.....	11
2.3 การแช่เยือกแข็งอาหาร.....	11
2.6 การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งอาหาร.....	13
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	21
3.1 การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับทำนาย เวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดอง.....	21
3.2 การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งโดยใช้สมการ อย่างง่าย.....	25
4. การทดลอง.....	29
4.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	29
4.2 การวัดค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกกระดอง.....	29
4.3 การวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว.....	36
4.4 การเขียนโปรแกรมแบบจำลองสำหรับทำนาย เวลาในการแช่เยือกแข็ง.....	37

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.5 การทวนสอบผลการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดอง จากแบบจำลองต่างๆ กับเวลาจากการทดลอง.....	37
4.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	38
5. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	39
5.1 สมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกกระดอง.....	39
5.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว.....	48
5.3 ผลการทำนายและการทวนสอบเวลาในการแช่เยือกแข็ง ปลาหมึกกระดองจากแบบจำลองต่างๆ และการทำนาย การกระจายอุณหภูมิของปลาหมึกกระดอง ณ เวลาต่างๆ ขณะแช่เยือกแข็งโดยใช้แบบจำลองเชิงเลขที่สร้างขึ้น.....	51
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	64
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	64
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	65
รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก ก.....	77
ภาคผนวก ข.....	85
ภาคผนวก ค.....	87
ภาคผนวก ง.....	89
ภาคผนวก จ.....	96
ประวัติผู้วิจัย.....	100

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกระดอง.....	3
2.2 สัดส่วนโดยมวลของ unfreezable water หรือ bound water ต่อของแข็ง (b) ของอาหารบางชนิด.....	6
2.3 ค่า P และ R ในสมการของ Plank (1941).....	14
2.4 สมการ finite difference สำหรับทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็ง อาหารรูปทรง slab.....	18
5.1 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ 0° ถึง 30°C.....	40
5.2 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -5° ถึง -30°C.....	41
5.3 ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ 0° ถึง 30°C.....	43
5.4 ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -5° ถึง -30°C.....	44
5.5 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ 0° ถึง 30°C.....	46
5.6 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -10° ถึง -30°C.....	47
5.7 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวที่ความเร็ว ลมเป็นระดับต่าง ๆ.....	49
5.8 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งโดยวิธีเชิงเลข.....	52
5.9 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดอง โดยใช้สมการอย่างง่าย.....	54
5.10 ค่าเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดองจากการทำนาย โดยใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเชิงเลขกับการทดลอง.....	55
5.11 ความผิดพลาดของเวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทำนายโดย วิธีการใช้สมการอย่างง่าย.....	56

ตารางที่ (ต่อ)

หน้า

5.12 ความผิดพลาดทางสถิติ (%) เวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทำนาย โดยวิธีต่างๆ.....	57
--	----

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะ Freezing curve อาหาร.....	5
2.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและความร้อนของอาหาร กับอุณหภูมิในอาหารที่มีความชื้นสูง.....	12
2.3 ลักษณะ Freezing curve ของอาหาร.....	14
2.4 ลักษณะ Freezing curve ของสารละลาย.....	13
3.1 การจำลองแบบการศึกษาเวลาในการแช่เยือกแข็งอาหารที่มีการ ถ่ายโอนความร้อนแบบทิศทางเดียว.....	21
3.2 ภาพตัดขวางแสดงส่วนของอาหารที่มีการถ่ายโอนความร้อน ในทิศทางเดียว.....	22
3.3 การคำนวณโดยวิธี explicit finite difference.....	24
4.1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดแรงลอยตัวในน้ำของตัวอย่าง.....	30
4.2 ภาพตัดขวางของ heated probe ที่ประกอบขึ้น.....	31
4.3 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดค่าสภาพนำความร้อน.....	32
4.4 ภาพตัดขวางแคลอริมิเตอร์สำหรับวัดค่าความร้อนจำเพาะ.....	33
4.5 การวางตัวอย่างสำหรับหาเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดอง.....	38
5.1 Freezing curve ของปลาหมึกกระดอง.....	40
5.2 ความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -5° ถึง -30°C	43
5.3 ค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -5° ถึง -30°C	44
5.4 ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -10° ถึง -30°C	48
5.5 ความสัมพันธ์ของ Nusselt number กับ Reynolds number.....	49
5.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวกับความเร็วลม	50
5.7 การทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่ง node ต่างๆ ใน ชิ้นปลาหมึกกระดอง.....	61
5.8 การทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวล่างซึ่งมีการถ่ายโอน ความร้อนเข้าสู่ที่สุดของปลาหมึกกระดองกับผลการทดลอง.....	62

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่ (m^2)
A_{al}	พื้นที่ของผิวอลูมิเนียมที่สัมผัสลมเย็น (m^2)
b	สัดส่วนโดยมวลของ unfreezable water ต่อของแข็งในอาหาร
Bi	Biot number
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะ ($cal/g.^{\circ}C, J/kg.^{\circ}C$)
C_{pa}	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ ($cal/g.^{\circ}C, J/kg.^{\circ}C$)
C_{pal}	ค่าความร้อนจำเพาะของแผ่นอลูมิเนียม ($J/kg.^{\circ}C$)
C_{pf}	ค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ($cal/g.^{\circ}C, J/kg.^{\circ}C$)
C_{pL}	ค่าความร้อนจำเพาะของสารตัวกลาง ($cal/g.^{\circ}C, J/kg.^{\circ}C$)
$C_{p\ min}$	ค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่น้อยที่สุด ($cal/g.^{\circ}C, J/kg.^{\circ}C$)
C_{ps}	ค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่าง ($cal/g.^{\circ}C, J/kg.^{\circ}C$)
C_{pu}	ค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง ($cal/g.^{\circ}C, J/kg.^{\circ}C$)
ΔC_p	ความแตกต่างระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของน้ำและน้ำแข็ง ($J/kg.^{\circ}C$)
d, D	ความหนาของชั้นอาหาร (m)
d_{al}	ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม (m)
$EHTD_1, EHTD_2$	equivalent heat transfer dimensionality
G	แรงลอยตัวในน้ำของตัวอย่าง (kg)
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว ($W/m^2.K$)
$H, \Delta H$	เอนทาลปีของอาหาร (J/kg)
H_k	ความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ ($cal/^{\circ}C$)
ΔH_1	เอนทาลปีในแบบจำลองของ IIR (1972) (J/kg)
ΔH_1	เอนทาลปีก่อนจุดเยือกแข็งในแบบจำลองที่ถูกดัดแปลงของ Pham (1986b) (J/kg)
ΔH_2	เอนทาลปีหลังจุดเยือกแข็งในแบบจำลองที่ถูกดัดแปลงของ Pham (1986b) (J/kg)
ΔH_{10}	เอนทาลปีในแบบจำลองของ Cleland และ Earle (1977) (J/kg)
i	เวลาครั้งที่ i
k	ค่าสภาพนำความร้อน ($W/m.K$)
k_a	ค่าสภาพนำความร้อนอากาศ ($W/m.K$)

k_f	ค่าสภาพนำความร้อนของอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ($W/m.K$)
k_{max}	ค่าสภาพนำความร้อนของอาหารที่มากที่สุด ($W/m.K$)
k_u	ค่าสภาพนำความร้อนของอาหารที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง ($W/m.K$)
L	ความร้อนแฝงของอาหาร (J/kg)
L_w	ความร้อนแฝงของน้ำ (J/kg)
n, N	ตำแหน่ง node ของอาหาร
Nu	Nusselt number (hd_{al}/k_a)
P, P_1	ค่า geometric factor ของอาหารในแบบจำลอง Plank (1941)
Pk	Plank number ($C_{pu}(T_i - T_{ip})/\Delta H_{10}$)
P_2	ค่า geometric factor ของอาหารในแบบจำลอง Cleland และ Earle (1984b)
q	ความร้อนที่ probe ได้รับ (W/m)
R, R_1	ค่า geometric factor ของอาหารในแบบจำลอง Plank (1941)
R_2	ค่า geometric factor ของอาหารในแบบจำลอง Cleland และ Earle (1984b)
R^*	heat loss หรือ heat gain คำนวณได้จาก $(C_{pL}W_L + H_k + C_{ps}W_s) \times (dT/dt) \times te$
Re	Reynolds number ($\rho_a v d_{al} / \mu_a$)
Ste	Stefan number ($C_{pf}(T_{if} - T_a) / \Delta H_{10}$)
t	เวลา (s, min)
t_{exp}	เวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทดลอง
t_f	เวลาในการแช่เยือกแข็งคำนวณจากสมการอย่างง่าย
t_{num}	เวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองเชิงเลข
t_{slab}	เวลาในการแช่เยือกแข็งของอาหารรูปทรง slab
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
T_a	อุณหภูมิของลมเย็น ($^{\circ}C$)
T_{al}	อุณหภูมิของแผ่นอลูมิเนียมที่เปลี่ยนไปตามเวลา ($^{\circ}C$)
T_c	อุณหภูมิต่ำสุดของอาหารตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงช้าที่สุด ($^{\circ}C$)
T_{ek}	อุณหภูมิ equilibrium ของแคลอรีมิเตอร์ ($^{\circ}C$)
T_{eL}	อุณหภูมิ equilibrium ของสารตัวกลาง ($^{\circ}C$)
T_{es}	อุณหภูมิ equilibrium ของตัวอย่าง ($^{\circ}C$)
T_{fm}	อุณหภูมิจุดเยือกแข็งเฉลี่ยในแบบจำลองของ Pham (1986b) ($^{\circ}C$)
T_i	อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหาร ($^{\circ}C$)
T_{iat}	อุณหภูมิเริ่มต้นของแผ่นอลูมิเนียม ($^{\circ}C$)

T_{if}	อุณหภูมิจุดเยือกแข็งของอาหาร ($^{\circ}C$)
T_{ik}	อุณหภูมิเริ่มต้นแคลอริมิเตอร์ ($^{\circ}C$)
T_{iL}	อุณหภูมิเริ่มต้นสารตัวกลาง ($^{\circ}C$)
T_{is}	อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่าง ($^{\circ}C$)
T_{ref}	อุณหภูมิอ้างอิง ($-10^{\circ}C$)
T_s	อุณหภูมิที่ผิวของอาหาร ($^{\circ}C$)
Δt	time step (s)
ΔT	ความแตกต่างของอุณหภูมิสุดท้ายกับอุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}C$)
ΔT_a	$(dT/dt) \times t_e$ ($^{\circ}C$) (พิจารณาเครื่องหมาย)
$\Delta T_1, \Delta T_2$	อุณหภูมิในแบบจำลองที่ถูกดัดแปลงของ Pham (1986b) ($^{\circ}C$)
v	ความเร็วลม (m/s)
x_b	สัดส่วนโดยมวลของ bound water ในอาหาร
x_i	สัดส่วนโดยมวลของน้ำแข็งในอาหาร
x_s	สัดส่วนโดยมวลของของแข็งในอาหาร
x_{wo}	สัดส่วนโดยมวลของน้ำในอาหาร
Δx	space step (m)
V	ปริมาตรของตัวอย่าง (m^3)
V_{al}	ปริมาตรของแผ่นอลูมิเนียม (m^3)
W_L	น้ำหนักของสารตัวกลาง (g)
W_s	น้ำหนักของของตัวอย่าง (g)

สัญลักษณ์ภาษากรีก

α	ค่าสภาพแพร่ความร้อนของอาหาร (m^2/s)
ρ_a	ความหนาแน่นปรากฏของอากาศ (kg/m^3)
ρ_{al}	ความหนาแน่นของแผ่นอลูมิเนียม (kg/m^3)
ρ_{ap}	ความหนาแน่นปรากฏของอาหาร (kg/m^3)
ρ_f	ความหนาแน่นของอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (kg/m^3)
ρ_L	ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
ρ_u	ความหนาแน่นของอาหารที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (kg/m^3)
μ_a	ความหนืดของอากาศ ($kg/m.s$)