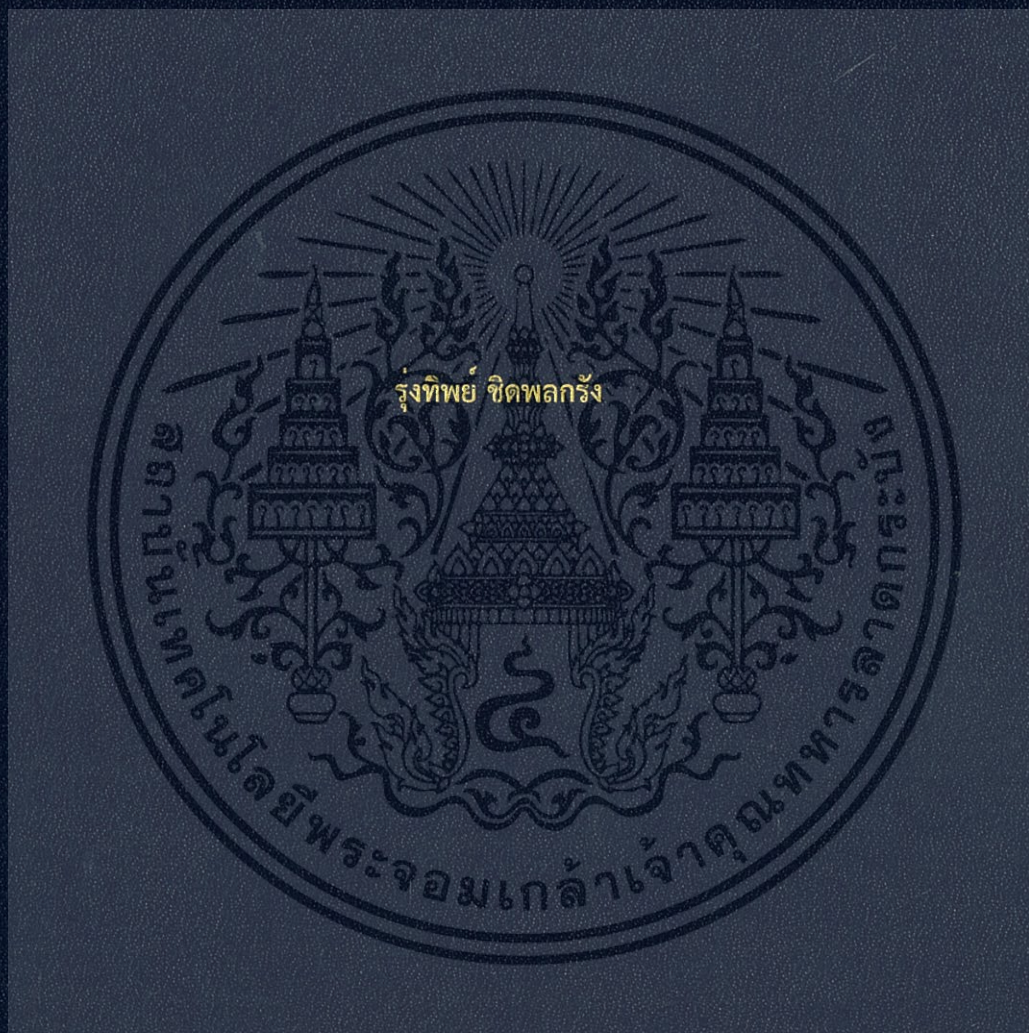


โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งสำหรับไส้กรอกรูปทรงกระบอก

COMPUTER SIMULATION PREDICTION OF FREEZING TIME
FOR CYLINDRICAL SHAPE SAUSAGE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งสำหรับไส้กรอกรูปทรงกระบอก

COMPUTER SIMULATION PREDICTION OF FREEZING TIME
FOR CYLINDRICAL SHAPE SAUSAGE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPUTER SIMULATION PREDICTION OF FREEZING TIME
FOR CYLINDRICAL SHAPE SAUSAGE



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งสำหรับไส้กรอกรูปทรงกระบอก

Computer simulation prediction of freezing time for cylindrical shape sausage

ผู้จัดทำ

นางสาวรุ่งทิพย์ ชิตพลกรัง

รหัสประจำตัว 57011069



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งสำหรับ ไส้กรอกรูปทรงกระบอก
นักศึกษา	นางสาวรุ่งทิพย์ ชิตพลกรัง
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอวิธีเชิงตัวเลขเพื่อทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งไส้กรอกรูปทรงกระบอก เนื่องจากการคำนวณเวลาแช่เยือกแข็งนั้นมีความยุ่งยาก ต้องใช้ความชำนาญและความแม่นยำอย่างมาก โดยงานวิจัยนี้ศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไส้กรอกเฉลี่ย 3 ขนาด คือ 1.64 ± 0.03 , 1.97 ± 0.02 และ 2.68 ± 0.04 เซนติเมตร โดยมีความยาวเท่ากัน คือ 5.50 เซนติเมตร และศึกษาผลของวิธีการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า ($T_\infty = -21.48 \pm 0.50$ องศาเซลเซียส, $h = 7.70 \pm 1.21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$) และเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า ($T_\infty = -36.50 \pm 1.58$ องศาเซลเซียส, $h = 40.18 \pm 1.21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$) โดยผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิหลังการแช่เยือกแข็งเท่ากับ $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ และเปรียบเทียบอุณหภูมิของการทดลองและการทำนายด้วยโปรแกรม สำหรับการเปรียบเทียบ กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไส้กรอกเฉลี่ย 3 ขนาด คือ 1.64 ± 0.03 , 1.97 ± 0.02 และ 2.68 ± 0.04 เซนติเมตร มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย $8.13 \pm 2.36\%$, $9.01 \pm 4.77\%$ และ $8.53 \pm 5.02\%$ ตามลำดับ และสำหรับการเปรียบเทียบกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไส้กรอกเฉลี่ย 3 ขนาด คือ 1.64 ± 0.03 , 1.97 ± 0.02 และ 2.68 ± 0.04 เซนติเมตร มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย $8.22 \pm 2.98\%$, $11.72 \pm 5.01\%$ และ $5.09 \pm 4.87\%$ ตามลำดับ

Project Title	Computer simulation prediction of freezing time for cylindrical shape sausage
Student	Miss Rungthip Chidpolkrung
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Food Engineering
Academic Year	2017
Project Advisor	Asst. Prof. Dr.Pimpen Pornchaloempong

ABSTRACT

This research present numerical method for prediction freezing time of cylindrical shape sausage. The estimation of freezing time for a food product is dependent on a variety of factors so the calculation of the freezing time can make difficult. Therefore, computer program can help prediction freezing time. In this experiment used sausage three average diameter 1.64 ± 0.03 , 1.97 ± 0.02 and 2.68 ± 0.04 cm. and each sausage length 5.50 cm. These research study the effect of freezing condition with Still air freezer ($T_{\infty} = -21.48\pm 0.50$ °C, $h = 7.70\pm 1.21$ W/m².°C) and Air blast freezer ($T_{\infty} = -38\pm 1.58$ °C, $h = 40.18\pm 1.21$ W/m².°C). The final temperature of the product is -18 °C in the inner part of the product. The comparison temperature of experimental and program prediction showed that Still air freezer have diameter of sausage is 1.64 ± 0.03 cm. (%error = $8.13\pm 2.36\%$), 1.97 ± 0.02 cm. (%error = $9.01\pm 4.77\%$) and 2.68 ± 0.04 cm. (% error = $8.53\pm 5.02\%$) and Air blast freezer have diameter of sausage is 1.64 ± 0.03 cm. (%error = $8.22\pm 2.98\%$), 1.97 ± 0.02 cm. (%error = $11.72\pm 5.01\%$) and 2.68 ± 0.04 cm. (%error = $5.09\pm 4.87\%$).

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และคำปรึกษาในการช่วยแก้ปัญหา รวมถึงอุปสรรคต่าง ๆ ในระหว่างการทำโครงการวิจัยเล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนให้ประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า นอกจากนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน ให้ความรู้และให้ประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าตลอดการศึกษา

ขอขอบพระคุณ คุณวราภรณ์ มาไพศาลทรัพย์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ ตลอดจนแนะนำในการทดลองและอำนวยความสะดวกในการเบิกอุปกรณ์ต่าง ๆ

ขอขอบคุณ นายวสันต์ อินทร์ตา และ นางสาวสุวิษา ประกอบแสง ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำการใช้เครื่องแช่เยือกแข็งและช่วยเหลือในการแช่เยือกแข็งและคำปรึกษาต่าง ๆ ตลอดจนเพื่อน ๆ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือจนโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร.....	3
2.1 การแช่เยือกแข็ง.....	3
2.1.1 วิธีการแช่เยือกแข็ง.....	4
2.1.2 จุดเยือกแข็งของอาหาร.....	8
2.2 ปัจจัยทางความร้อนที่มีผลต่อเวลาในการแช่เยือกแข็ง.....	8
2.2.1 ค่าการนำความร้อน.....	8
2.2.2 ความหนาแน่น.....	10
2.2.3 ความร้อนจำเพาะ.....	11
2.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	12
2.4 Finite element Method.....	17
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	25
3.1 โปรแกรมการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็ง.....	25
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้และการเตรียมวัสดุ.....	27
3.2.1 วัสดุดิบ.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.3 วิธีการทดลอง.....	28
3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	28
3.3.2 ขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง.....	29
3.3.3 การคำนวณความหนาแน่น.....	31
3.3.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	31
3.3.5 การคำนวณค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนจำเพาะของ ไส้กรอก.....	32
3.4 การทวนสอบค่าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	33
4.1 ความหนาแน่นของไส้กรอก.....	33
4.2 ค่าการนำความร้อนของไส้กรอก.....	33
4.3 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไส้กรอก.....	34
4.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	35
4.5 การทำนายเวลาแช่เยือกแข็ง.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
เอกสารอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	
ภาคผนวก ข การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำนายเวลาแช่เยือกแข็งของไส้กรอก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อVอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมการสำหรับการประมาณค่าการนำความร้อนขององค์ประกอบหลักในอาหารที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิช่วง -40 ถึง 150 °C.....	9
2.2 ค่าการนำความร้อนของอาหารต่าง ๆ.....	10
2.3 สมการสำหรับการประมาณค่าความหนาแน่นขององค์ประกอบหลักในอาหารที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิช่วง -40 ถึง 150 °C.....	11
2.4 สมการสำหรับการประมาณค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบหลักในอาหารที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิช่วง -40 ถึง 150 °C.....	11
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	28
4.1 ความหนาแน่นของไส้กรอกจากการทดลอง.....	33
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า.....	38
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า.....	39
4.4 ค่าความผิดพลาดของเวลาในการแช่เยือกแข็งที่ทำนายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับค่าจากการทดลองที่แช่เยือกแข็งไส้กรอกด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า.....	44
4.5 ค่าความผิดพลาดของเวลาในการแช่เยือกแข็งที่ทำนายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับค่าจากการทดลองที่แช่เยือกแข็งไส้กรอกด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า.....	45

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการแช่เยือกแข็งของอาหาร.....	3
2.2 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า.....	5
2.3 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า.....	5
2.4 เครื่องแช่แข็งแบบฟลูอิดไดซ์	6
2.5 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบจุ่ม.....	7
2.6 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบแผ่น.....	7
2.7 กระบวนการพาความร้อน.....	12
2.8 การระบายความร้อนในการชุบโลหะร้อน.....	13
2.9 ผลของค่า Biot number ต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิแบบคงตัวของผนังราบที่มีการพา ความร้อนที่ผิว	16
2.10 ตัวอย่างการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของรูปทรง 3 มิติ.....	17
2.11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของเนื้อวุ้น (Slab) ระหว่างการแช่เยือกแข็ง.....	18
2.12 การทำนายอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของ meat ball ระหว่างการแช่เยือกแข็ง.....	18
2.13 ตัวอย่างชิ้นเนื้อวุ้นที่ใช้ในการทดลอง.....	19
2.14 การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนแบบขนานกับแบบจำลองที่อุณหภูมิการแช่เยือกแข็ง -30°C, -20°C and -15°C.....	19
2.15 แผนผังการแช่เยือกแข็งปลาหมึกใน Air blast freezer	20
2.16 แผนผังการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วย Numerical method	21
2.17 ภาพแสดงการแบ่งชิ้นเบเกอร์เป็นชิ้นส่วนย่อย.....	22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วย Numerical method.....	22
2.19 แผนผังการทดลองการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ.....	23
2.20 แบบจำลองรูปทรงของตัวอย่างที่ทำการแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อย.....	23
2.21 การเปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางของ droplet จากการทำนายและจากการทดลอง ทั้ง	
3 เส้นผ่านศูนย์กลาง (7.3, 10.5 และ 12.5 มม.) ที่ความดัน 200 Pa.....	24
3.1 แผนผังการทำนายเวลาแช่เยือกแข็งด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	26
3.2 ใส์กรอกบิลล์คัก.....	27
3.3 การเตรียมตัวอย่างใส์กรอก.....	28
3.4 Data logger ที่ต่อกับสาย Thermocouple เพื่อบันทึกข้อมูล.....	29
3.5 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.6 การทดลองวัดอุณหภูมิของตัวอย่างใส์กรอกที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.7 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าที่ใช้ในการทดลอง.....	31
4.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อนของใส์กรอก.....	34
4.2 ผลของอุณหภูมิต่อความจุความร้อนจำเพาะของใส์กรอก.....	34
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left(\frac{T - T_\infty}{T_1 - T_\infty} \right)$ และ t ของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกที่ทดลองกับ	
เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าครั้งที่ 1.....	35
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left(\frac{T - T_\infty}{T_1 - T_\infty} \right)$ และ t ของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกที่ทดลองกับ	
เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าครั้งที่ 2.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_1-T_\infty}\right)$ และ t ของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกที่ทดลองกับ
เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าครั้งที่ 1.....37
- 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_1-T_\infty}\right)$ และ t ของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกที่ทดลองกับ
เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าครั้งที่ 2.....38
- 4.7 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.64
เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า ($T_\infty = -21.48 \pm 0.50$ องศาเซลเซียส,
 $h = 7.70 \pm 1.21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$).....39
- 4.8 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.97
เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า ($T_\infty = -21.48 \pm 0.50$ องศาเซลเซียส,
 $h = 7.70 \pm 1.21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$).....40
- 4.9 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.68
เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า ($T_\infty = -21.48 \pm 0.50$ องศาเซลเซียส,
 $h = 7.70 \pm 1.21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$).....41
- 4.10 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.64
เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า ($T_\infty = -36.50 \pm 1.58$ องศาเซลเซียส,
 $h = 40.18 \pm 1.21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$).....42
- 4.15 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.97
เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า ($T_\infty = -36.50 \pm 1.58$ องศาเซลเซียส,
 $h = 40.18 \pm 1.21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$).....43
- 4.16 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.68
เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า ($T_\infty = -36.50 \pm 1.58$ องศาเซลเซียส,
 $h = 40.18 \pm 1.21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$).....44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การแช่เยือกแข็งเป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางเพื่อการเก็บรักษาคุณภาพของอาหาร และช่วยยืดอายุของอาหาร โดยที่ยังคงรักษากลิ่น สี และรสชาติของอาหาร ด้วยกระบวนการในการแช่เยือกแข็งอย่างถูกต้อง รวมทั้งยังสามารถเพิ่มมูลค่าของอาหารให้เพิ่มขึ้นได้ ระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งจึงเป็นส่วนสำคัญที่จะแสดงถึงคุณภาพของอาหาร อุณหภูมิของตัวกลางในกระบวนการแช่เยือกแข็ง สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของตัวกลาง รูปทรงของอาหาร และสมบัติทางความร้อนของอาหาร ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งของอาหาร ซึ่งเวลาในการแช่เยือกแข็งของอาหารคืออัตราการแช่เยือกแข็งที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งอาหารที่จะบ่งบอกถึงคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง ดังนั้นเวลาในการแช่เยือกแข็งจึงเป็นส่วนที่สำคัญแสดงถึงคุณภาพของอาหารที่ได้จากการแช่เยือกแข็ง โดยเวลาในการแช่เยือกแข็งสามารถทราบได้จากการทดลอง แต่เนื่องจากในแต่ละการทดลองนั้นสามารถทดลองได้เพียงสภาวะเดียวเท่านั้น ซึ่งถ้าต้องการที่ทราบเวลาในการทดลองจากหลายสภาวะนั้นจะต้องมีการทดลองหลายครั้ง เพราะฉะนั้นจะต้องเสียเวลาที่จะทราบทุกสภาวะและอาจเสียค่าใช้จ่ายสำหรับการทดลองด้วย

การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งเป็นวิธีการหนึ่งที่สะดวกและรวดเร็วเพื่อทราบเวลาที่จะใช้ในกระบวนการแช่เยือกแข็ง โดยการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งสามารถคำนวณได้หลายวิธี คือ สมการเชิงวิเคราะห์ (analytical formulas) สมการเชิงประจักษ์ (empirical formulas) หรือ วิธีเชิงตัวเลข (numerical methods) โดยวิธีเชิงตัวเลข เช่น Finite difference method (FDM) และ Finite element method (FEM) ซึ่งเป็นวิธีที่มีความแม่นยำวิธีหนึ่ง (Pham, 2013)

Finite element method คือวิธีการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ เพื่อใช้คำนวณแก้ปัญหาทางวิศวกรรม และอื่น ๆ วิธีการคือโดเมนของโครงสร้างจะถูกแบ่งย่อยแบ่งองค์ประกอบย่อยที่มีรูปร่างอย่างง่ายขนาดเล็กอย่างจำกัด โดยวิธีนี้มีคำตอบจากการคำนวณมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง แต่วิธีการเชิงตัวเลขเป็นวิธีการคำนวณที่ยุ่งยากและซับซ้อน จึงควรใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการคำนวณ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งของไส้กรอกที่ลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยวิธีเชิงตัวเลขสำหรับจำลองเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางเพื่อใช้สำหรับกระบวนการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อนำวิธีเชิงตัวเลขไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งของอาหารรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน

1.2.2 เพื่อทดสอบความแม่นยำของวิธีเชิงตัวเลขที่นำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายเวลาแช่เยือกแข็งของไส้กรอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ตัวอย่างที่ใช้ทดลองเป็นของแข็งเนื้อเดียวกัน รูปร่างทรงกระบอก มีการถ่ายเทความร้อน 2 มิติ

1.3.2 เครื่องแช่เยือกแข็งที่ใช้ในการทดลองคือ เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าและเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า

1.3.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็ง คือ COMSOL Multiphysics 5.1

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

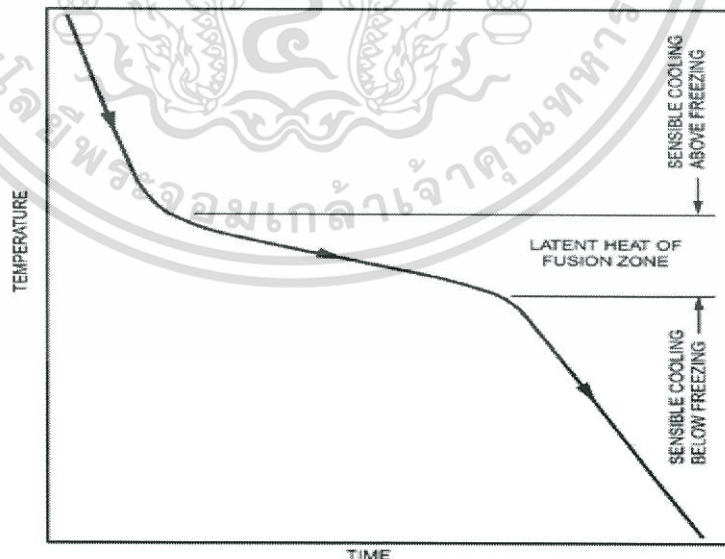
วิธีเชิงตัวเลขที่สามารถทำนายเวลาแช่เยือกแข็งของอาหารรูปทรงกระบอกที่มีลักษณะเป็นของแข็งเนื้อเดียวกัน

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 การแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งเป็นกรรมวิธีการแปรรูปอาหาร เพื่อรักษาคุณภาพของอาหารด้วยการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็งของอาหารจนถึง -18 องศาเซลเซียส การแช่เยือกแข็งไม่ได้เป็นกรรมวิธีที่มุ่งทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย และจุลินทรีย์ก่อโรค แต่เป็นการใช้อุณหภูมิต่ำเพื่อลดอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และลดการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ด้วยการยับยั้งปฏิกิริยาจากจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมคุณภาพของวัตถุดิบ โดยกระบวนการแช่เยือกแข็งของอาหารแสดงดังรูปที่ 2.1 ช่วงแรกเป็นช่วงก่อนการแช่เยือกแข็ง ความร้อนสัมผัส (Sensible heat) จะถูกกำจัดออกจากอาหารเพื่อลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิเริ่มต้นสู่อุณหภูมิจุดเยือกแข็งของอาหาร ช่วงที่สองที่จุดเยือกแข็งของอาหารน้ำบางส่วนภายในอาหารจะยังไม่กลายเป็นน้ำแข็ง และเมื่อลดอุณหภูมิลงอย่างต่อเนื่องความร้อนแฝง (Latent heat) จะถูกกำจัดออกจากอาหารเพื่อเปลี่ยนสถานะจากน้ำกลายเป็นน้ำแข็ง น้ำแข็งภายในอาหารจึงเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารละลายในอาหารก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และช่วงสุดท้ายเมื่อน้ำในอาหารเป็นน้ำแข็งทั้งหมดแล้วจะลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำลงถึง -18 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.1 กระบวนการแช่เยือกแข็งของอาหาร

ที่มา : ASHRAE (2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดผลึกน้ำแข็งเป็นการเปลี่ยนสถานะของน้ำในอาหารจากของเหลวเป็นผลึกน้ำแข็ง การเกิดผลึกน้ำแข็งในการแช่เยือกแข็งอาหารขึ้นอยู่กับอัตราการแช่เยือกแข็งและมีผลต่อคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งที่ได้ด้วย ขั้นตอนการเกิดผลึกน้ำแข็งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลักคือ

1. การเกิดผลึกน้ำแข็ง (nucleation) คือ การที่โมเลกุลของน้ำมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบเมื่ออุณหภูมิของอาหารลดลง โดยการดึงพลังงานงานความร้อนที่เปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นน้ำแข็งออกจากน้ำ เกิดเป็นนิวเคลียสใหม่ของน้ำแข็ง ซึ่งจะเกิดในช่วงจุดเยือกแข็ง หากทำการลดอุณหภูมิของอาหารผ่านช่วงจุดเยือกแข็งนี้ไปอย่างรวดเร็ว นิวเคลียสของผลึกน้ำแข็งก็จะเกิดขึ้นจำนวนมาก

2. การขยายขนาดของผลึกน้ำแข็ง (crystal growth) หลังการเกิดนิวเคลียส โมเลกุลของน้ำที่เหลือจะเคลื่อนที่เข้ามาจัดเรียงตัวกันทำให้ขนาดของผลึกน้ำแข็งขยายใหญ่ขึ้น

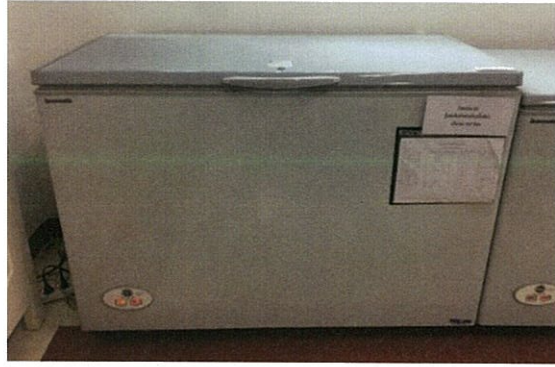
ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งมีหลากหลายรูปแบบ เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ หรืออาหารที่ผ่านการปรุงสุก (cooking) เพื่อเป็นอาหารพร้อมรับประทาน เป็นต้น

2.1.1 วิธีการแช่เยือกแข็ง

วิธีการแช่เยือกแข็งที่นิยมใช้สำหรับการแช่เยือกแข็งอาหาร มีดังนี้

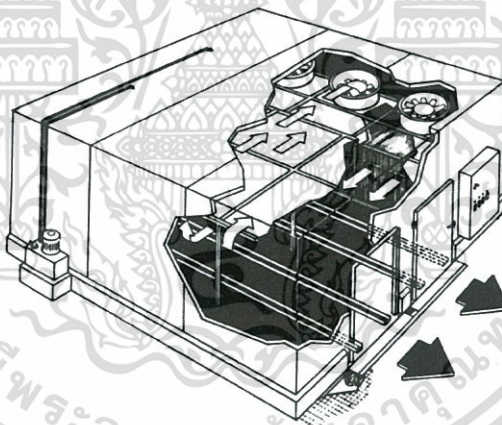
1. การแช่เยือกแข็งโดยใช้อากาศเย็นจัดเป็นตัวกลาง คืออาหารมีการถ่ายเทความร้อนกับอากาศภายในเครื่องแช่แข็งแบบการพาความร้อน ซึ่งเวลาในการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำถึง -18 องศาเซลเซียสขึ้นอยู่กับความเร็วอากาศภายในเครื่องแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิของอากาศด้วย การแช่เยือกแข็งโดยใช้อากาศเย็นจัดเป็นตัวกลางมีลักษณะเครื่องแช่เยือกแข็งต่าง ๆ ดังนี้

- เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า (Still air freezer) เป็นการแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งที่ไม่มีลมเป่า อากาศภายในจะมีลักษณะนิ่ง ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนประมาณ $6-9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ เวลาในการแช่เยือกแข็งจึงใช้เวลานาน เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าแสดงดังรูปที่ 2.2 ตัวอย่างเช่น ตู้แช่ผักและผลไม้ หรือ ไอศกรีม เป็นต้น



รูปที่ 2.2 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า

- เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า (Air blast freezer) เป็นการแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งที่ลมเย็นเป่า ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนประมาณ $18-40 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ เวลาในการแช่เยือกแข็งจึงเร็วกว่าเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า ตัวอย่างเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าแสดงดังรูปที่ 2.3

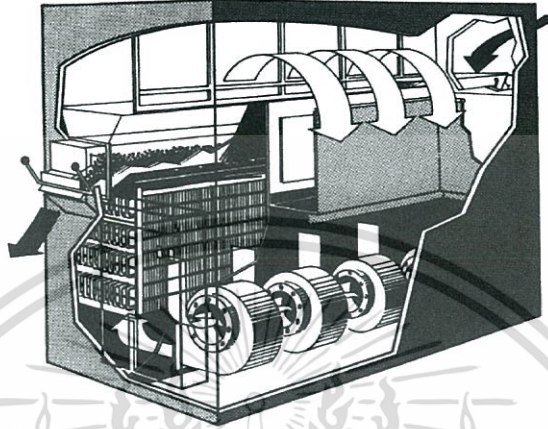


รูปที่ 2.3 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า

ที่มา : Singh and Heldman (2014)

- เครื่องแช่แข็งแบบฟลูอิดไดซ์ (Fluidized bed freezer) เป็นเครื่องแช่เยือกแข็งใช้สำหรับแช่เยือกแข็งอาหารที่มีลักษณะเป็นชิ้นเล็ก ๆ ที่มีรูปทรงสม่ำเสมอ เช่น เมล็ดถั่ว ผักและผลไม้ เป็นต้น อาหารจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบแช่เยือกแข็งโดยเกลี่ยสม่ำเสมอเป็นชั้นบาง (bed) บนสายพานลำเลียงที่มีเจาะรู เพื่อให้ตัวกลางการแช่แข็งคือ อากาศเย็นจัดที่มีความเร็วสูงจากระบบทำความเย็นเป่าผ่านรูตะแกรง ทำให้อาหารมีลักษณะคล้ายของไหล คือลอยตัวในเครื่องแช่เยือกแข็ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ด้วยอากาศที่เป่าผ่านด้วยความเร็วที่สูง ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนประมาณ $150-170 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ เวลาในการแช่เยือกแข็งเร็ว ตัวอย่างเครื่องแช่แข็งแบบฟลูอิดไดซ์ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เครื่องแช่แข็งแบบฟลูอิดไดซ์

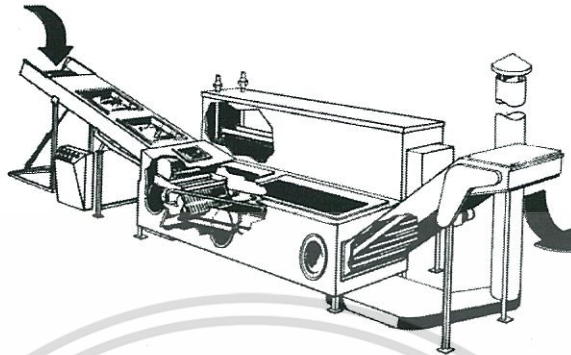
ที่มา : Singh and Heldman (2014)

- เครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเย็นเป่าชนิดอุโมงค์ (Tunnel freezer) คือเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าที่เป็นอุโมงค์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนประมาณ $35-40 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ เป็นระบบการแช่เยือกแข็งแบบต่อเนื่อง มีสายพานลำเลียงที่เป็นตะแกรงรูภายในเครื่อง โดยนำอาหารใส่ด้านหนึ่งของเครื่องแช่เยือกแข็งและอาหารจะถูกลำเลียงบนสายพานออกมาอีกด้านหนึ่งของเครื่องแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิของอาหารจะถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งกำหนดด้วยความเร็วของสายพานที่เคลื่อนที่ไปในอุโมงค์

- เครื่องแช่เยือกแข็งแบบสายพานเกลียว (Spiral freezer) คือเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าที่มีสายพานเกลียว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนประมาณ $35-40 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ เป็นระบบการแช่เยือกแข็งแบบต่อเนื่อง มีลักษณะคล้ายเครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเย็นเป่าชนิดอุโมงค์ แต่จะประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง

2. การแช่เยือกแข็งแบบจุ่ม (Immersion freezing) คือการจุ่มอาหารในของเหลวเย็นจัด เช่น น้ำเกลืออิ่มตัวที่ใส่น้ำแข็ง เมื่อนำอาหารไปจุ่มในน้ำเกลือที่เย็นจัดจะเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน ซึ่งการแช่เยือกแข็งแบบนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงกว่าการใช้

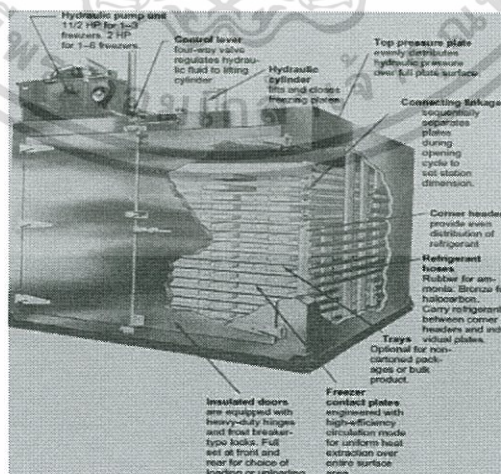
อากาศเป็นตัวกลาง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนประมาณ $140-280 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า ตัวอย่างเครื่องแช่เยือกแข็งแบบจุ่มแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบจุ่ม

ที่มา : Singh and Heldman (2014)

3. เครื่องแช่เยือกแข็งแบบแผ่น (Plate freezer) คือการแช่เยือกแข็งที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประมาณ $100-1000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ซึ่งอาหารจะถูกบรรจุในถาดโลหะเย็นจัดที่มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยม (block) อาจมีการเติมน้ำหรือสารละลาย เช่น น้ำเชื่อม น้ำเกลือในอาหาร หรืออาจจะไม่เติมสารละลายแต่ต้องอัดให้แน่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่น ตัวอย่างเครื่องแช่แข็งแบบแผ่นแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบแผ่น

ที่มา : Singh and Heldman (2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การแช่เยือกแข็งโดยการใส่สารไครโอเจน (Cryogenic freezing) เป็นการแช่เยือกแข็งอาหารด้วยการจุ่มอาหารลงในสารไครโอเจน หรือพ่นสารไครโอเจนลงบนผิวหน้าของอาหารโดยตรง โดยสารไครโอเจนเป็นสารที่มีจุดเดือดต่ำมาก ที่อุณหภูมิและความดันปกติจะระเหยเป็นไอแล้วดูดความร้อนออกจากอาหาร ตัวอย่างเช่น ไนโตรเจนเหลว คาร์บอนไดออกไซด์เหลว เป็นต้น

2.1.2 จุดเยือกแข็งของอาหาร

จุดเยือกแข็งของอาหาร คือ อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำในอาหารจากน้ำเป็นน้ำแข็ง ซึ่งสามารถคำนวณอุณหภูมิของจุดเยือกแข็งของอาหารต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

สำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ดังสมการที่ 2.1 (Sanz et al., 1989)

$$\Delta T_F = \frac{X_w - 1}{0.069 - 0.439X_w} \quad (2.1)$$

สำหรับผักและผลไม้ดังสมการที่ 2.2 (Chang & Tao, 1981)

$$\Delta T_F = -14.46 + 49.19X_w - 37.07X_w^2 \quad (2.2)$$

สำหรับน้ำผลไม้ดังสมการที่ 2.3 (Chang & Tao, 1981)

$$\Delta T_F = 152.63 - 327.35X_w + 176.49X_w^2 \quad (2.3)$$

โดย ΔT_F คือ ผลต่างระหว่างจุดเยือกแข็งของตัวทำละลายบริสุทธิ์กับจุดเยือกแข็งของสารละลาย (°C)

X_w คือ สัดส่วนของน้ำในอาหาร

2.2 ปัจจัยทางความร้อนที่มีผลต่อเวลาในการแช่เยือกแข็ง

2.2.1 ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, k)

ค่าการนำความร้อนของอาหารเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความสามารถในการถ่ายเทความร้อน สมบัติการนำความร้อนของอาหารขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณความชื้นภายในวัสดุ และความดันของสภาวะแวดล้อม ความพรุนของอาหาร เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงของน้ำเป็นน้ำแข็งทำให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนสามารถเพิ่มได้โดยการให้ความ

ร้อนผ่านชั้นน้ำแข็ง (Singh and Heldman, 2014) การประมาณค่าการนำความร้อนสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมการสำหรับการประมาณค่าการนำความร้อนขององค์ประกอบหลักในอาหารที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิช่วง -40 ถึง 150 °C (Choi & Okos, 1986)

องค์ประกอบหลัก	สมการ
คาร์โบไฮเดรต	$k=0.20141+1.3874\times 10^{-3}T-4.3312\times 10^{-6}T^2$
ไฟเบอร์	$k=0.18331+1.2497\times 10^{-3}T-3.1683\times 10^{-6}T^2$
โปรตีน	$k=0.17881+1.1958\times 10^{-3}T-2.7178\times 10^{-6}T^2$
ไขมัน	$k=0.18071+2.7604\times 10^{-3}T-1.7749\times 10^{-6}T^2$
ถั่ว	$k=0.32962+1.4011\times 10^{-3}T-2.9069\times 10^{-6}T^2$
น้ำ	$k=0.57109+1.7625\times 10^{-3}T-6.7036\times 10^{-6}T^2$
น้ำแข็ง	$k=2.2196-6.2489\times 10^{-3}T+1.0154\times 10^{-4}T^2$

โดยพิจารณาอาหารที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความพรุน ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งสามารถคำนวณค่าการนำความร้อนได้จากสมการที่ 2.4 (Murakami & Okos, 1989)

$$k = \sum_{j=1}^n k_j \varepsilon_j \quad (2.4)$$

โดย k คือ ค่าการนำความร้อน (W/m.°C)

k_j คือ ค่าการนำความร้อนขององค์ประกอบในอาหาร (W/m.°C)

ε_j คือ ความพรุนขององค์ประกอบในอาหาร

ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งคำนวณค่าการนำความร้อนได้จากสมการที่ 2.5 (Murakami & Okos, 1989)

$$\frac{1}{k} = \frac{1-\varepsilon_w}{k_s} + \frac{\varepsilon_w}{k_w} \quad (2.5)$$

โดย k คือ ค่าการนำความร้อน (W/m.°C)

k_s คือ ค่าการนำความร้อนของของแข็ง (W/m.°C)

k_w คือ ค่าการนำความร้อนของน้ำ (W/m.°C)

ε_w คือ ความพรุนของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความพรุนของแต่ละองค์ประกอบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 (Murakami & Okos, 1989)

$$\varepsilon = \frac{\rho X_j}{\rho_j} \quad (2.6)$$

โดย ε คือ ความพรุนของอาหาร

ρ คือ ความหนาแน่นของอาหาร (kg/m^3)

ρ_j คือ ความหนาแน่นขององค์ประกอบในอาหาร (kg/m^3)

X_j คือ สัดส่วนขององค์ประกอบในอาหาร

ตัวอย่างค่าการนำความร้อนของอาหารต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าการนำความร้อนของอาหารต่าง ๆ

ผลิตภัณฑ์	ความชื้นฐานเปียก	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำความร้อน (W/m.°C)
แอปเปิ้ล	85.6	2-36	0.393
เนย	15	46	0.197
ไข่ขาว	-	36	0.577
ไข่แดง	-	33	0.338
น้ำผึ้ง	12.6	2	0.502
	80	2	0.344
แซลมอน	73	4	0.502
ไส้กรอกผสม	65.72	24	0.407
ไขมันวัว	-	24-38	0.190

ที่มา : Reidy (1968)

2.2.2 ความหนาแน่น (density, ρ) คือมวลส่วนด้วยปริมาตรดังสมการที่ 4 (Pham, 2014) โดยความหนาแน่นของน้ำแข็งมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของน้ำ เช่นเดียวกับความหนาแน่นของอาหารแช่เยือกแข็งมีความหนาแน่นน้อยกว่า (Singh and Heldman, 2014) การประมาณค่าความหนาแน่นสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมการสำหรับการประมาณค่าความหนาแน่นขององค์ประกอบหลักในอาหารที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิช่วง -40 ถึง 150 °C (Choi & Okos, 1986)

องค์ประกอบหลัก	สมการ
คาร์โบไฮเดรต	$\rho=1599.1-0.3105T$
ไฟเบอร์	$\rho=1311.5-0.3659T$
โปรตีน	$\rho=1330.0-0.518T$
ไขมัน	$\rho=925.6-0.417.6T$
ถั่ว	$\rho=2423.8-0.2806T$
น้ำ	$\rho=997.2+3.1439\times 10^{-3}T-3.7574\times 10^{-3}T^2$
น้ำแข็ง	$\rho=916.9-0.1307T$

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.7)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของอาหาร (kg/m^3)

m คือ มวล (kg)

v คือ ปริมาตร (m^3)

2.2.3 ความร้อนจำเพาะ (specific heat, C_p) ความร้อนจำเพาะของอาหารแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการแช่เยือกแข็ง 20 องศาเซลเซียส ไม่มีแตกต่างจากความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ที่ไม่แช่เยือกแข็ง ความร้อนจำเพาะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วงของอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของน้ำในผลิตภัณฑ์ (Singh and Heldman, 2014) การประมาณค่าความร้อนจำเพาะสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมการสำหรับการประมาณค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบหลักในอาหารที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิช่วง -40 ถึง 150 °C (Choi & Okos, 1986)

องค์ประกอบหลัก	สมการ
คาร์โบไฮเดรต	$C_p=1.5488+1.9625\times 10^{-3}T-5.9399\times 10^{-6}T^2$
ไฟเบอร์	$C_p=1.8459+1.8306\times 10^{-3}T-4.6509\times 10^{-6}T^2$
โปรตีน	$C_p=2.0082+1.2089\times 10^{-3}T-1.3129\times 10^{-6}T^2$
ไขมัน	$C_p=1.9842+1.4733\times 10^{-3}T-4.8008\times 10^{-6}T^2$
ถั่ว	$C_p=1.0926+1.8896\times 10^{-3}T-3.6817\times 10^{-6}T^2$
น้ำ	$C_p=4.0817-5.3062\times 10^{-3}T+9.9516\times 10^{-6}T^2$
น้ำแข็ง	$C_p=2.0623+6.0769\times 10^{-3}T$

โดยสามารถหาค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ 2.8 (Choi & Okos, 1986)

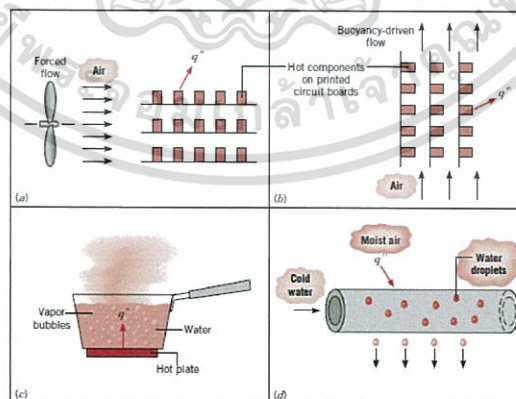
$$C_p = \sum_{j=1}^n C_{p_j} X_j \quad (2.8)$$

โดย C_p คือ ความจุความร้อน (kJ/kg.°C)

X_j คือ สัดส่วนขององค์ประกอบในอาหาร

2.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเมื่อระบบและสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งตัวกลางที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนคือของไหลจะเคลื่อนที่ การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection) เป็นผลมาจากการกระทำของแรงภายนอก เช่น การใช้พัดลมเป่า หรือ การบังคับทิศทางการไหล เป็นต้น และการพาความร้อนอีกแบบหนึ่งคือ การพาความร้อนแบบตามธรรมชาติ (free convection) คือการที่ของไหลสามารถเคลื่อนที่โดยไม่มีแรงกระทำจากภายนอก เช่น การเคลื่อนที่เนื่องจากแรงลอยตัว หรือการเกิดลมจากไฟไหม้ เป็นต้น นอกจากการพาความร้อนทั้ง 2 แบบข้างต้น การพาความร้อนยังสามารถเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของของไหลด้วย เช่น การเดือด คือการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ หรือ การควบแน่น คือการที่ไอน้ำไหลผ่านพื้นที่ที่เย็นจัดและเกิดการควบแน่นเป็นของเหลว กระบวนการพาความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการพาความร้อน a) การพาความร้อนแบบบังคับ

b) การพาความร้อนแบบตามธรรมชาติ c) การเดือด d) การควบแน่น

ที่มา : Frank and David (2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการพาความร้อน (q_{conv}) สามารถหาได้จาก Newton's law of cooling ดังสมการที่ 2.9

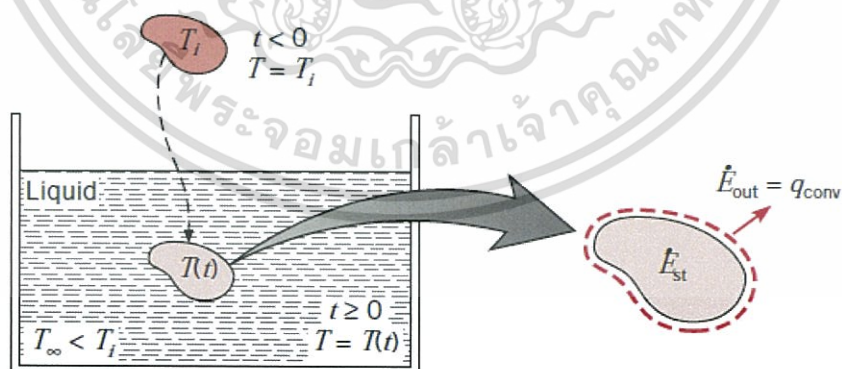
$$q_{conv} = hA\Delta T \quad (2.9)$$

โดย A คือ พื้นที่ที่สัมผัสของไหล (m^2)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

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

การคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้วยวิธี Lumped Capacitance Method การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนของวัตถุ ที่พิจารณาให้เป็นก้อน (Lump) ภายใต้สมมติฐานวัตถุไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานรูปอื่นมาเป็นความร้อนภายในพื้นผิววัตถุและวัตถุมีค่าการนำความร้อนที่สูงมาก ดังนั้นระยะ (x) และอุณหภูมิภายในของวัตถุมีผลต่ออุณหภูมิน้อยมาก จึงสามารถกำหนดให้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของวัตถุเป็นฟังก์ชันของเวลา (t) เพียงอย่างเดียว $T \neq f(x)$; โดยที่ $T = f(t)$ เท่านั้น พิจารณาดังรูปที่ 2.8 โลหะร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับ T_i นำไปจุ่มในของเหลวที่มีอุณหภูมิ T_{∞} ซึ่งต่ำกว่า T_i ถ้าสถานการณ์นี้เริ่มต้นที่เวลา $t = 0$ อุณหภูมิของโลหะจะลดลงเมื่อเวลา $t > 0$ จนกระทั่งโลหะมีอุณหภูมิเท่ากับ T_{∞} ซึ่งเกิดจากการพาความร้อนที่ผิวของโลหะ



รูปที่ 2.8 การระบายความร้อนในการชุบโลหะร้อน

ที่มา : Frank and David (2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการคำนวณสามารถคำนวณได้จากกฎทรงพลังงาน

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{st}}{dt} \quad (2.10)$$

โดย \dot{E}_{in} คือ พลังงานเข้าภายในพื้นผิวควบคุม (J/s)

\dot{E}_g คือ พลังงานรูปอื่นที่แปลงมาเป็นความร้อนภายในพื้นผิวควบคุม (J/s)

\dot{E}_{out} คือ พลังงานออกภายในพื้นผิวควบคุม (J/s)

$\frac{dE_{st}}{dt}$ คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานสะสมในพื้นที่ผิวควบคุม (J/s)

จากสมมติฐานข้างต้น 1. $T = f(t)$

$$2. \dot{E}_g = 0$$

และถ้า $T_i > T_\infty$ จะได้ $\dot{E}_{in} = 0$ เพราะมีการถ่ายเทความร้อนออกจากวัตถุเท่านั้น

$$\dot{E}_{out} = q_{conv} = hA_s(T - T_\infty) \quad (2.11)$$

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \frac{d(me)}{dt} = \frac{d(\rho V) C_p (T - T_{ref})}{dt} = \rho V C_p \frac{dT}{dt} \quad (2.12)$$

ดังนั้นสมการที่ 2.10 จะได้

$$0 + 0 - hA_s(T - T_\infty) = \rho V C_p \frac{dT}{dt} \quad (2.13)$$

โดยให้ $\theta = T - T_\infty$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-hA_s \theta = \rho V C_p \frac{d\theta}{dt} \quad (2.14)$$

$$\frac{d\theta}{\theta} = \frac{-hA_s}{\rho V C_p} dt \quad (2.15)$$

อินทิเกรต จาก $t = 0$ ถึง t ใด ๆ, $\theta_i \rightarrow \theta$ ใด ๆ

$$\int_{\theta_i}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} = - \int_0^t \frac{hA_s}{\rho V C_p} dt \quad (2.16)$$

$$\ln \left(\frac{\theta}{\theta_i} \right) = \frac{-hA_s}{\rho V C_p} \cdot t \quad (2.17)$$

$$\ln \left(\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \right) = \frac{-hA_s}{\rho V C_p} \cdot t \quad (2.18)$$

โดย T คือ อุณหภูมิของวัตถุ ณ เวลาใด ๆ ($^{\circ}\text{C}$)

T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุ ($^{\circ}\text{C}$)

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหล ($^{\circ}\text{C}$)

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

A_s คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ (m^2)

ρ คือ ความหนาแน่นของวัตถุ (kg/m^3)

V คือ ปริมาตรของวัตถุ (m^3)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

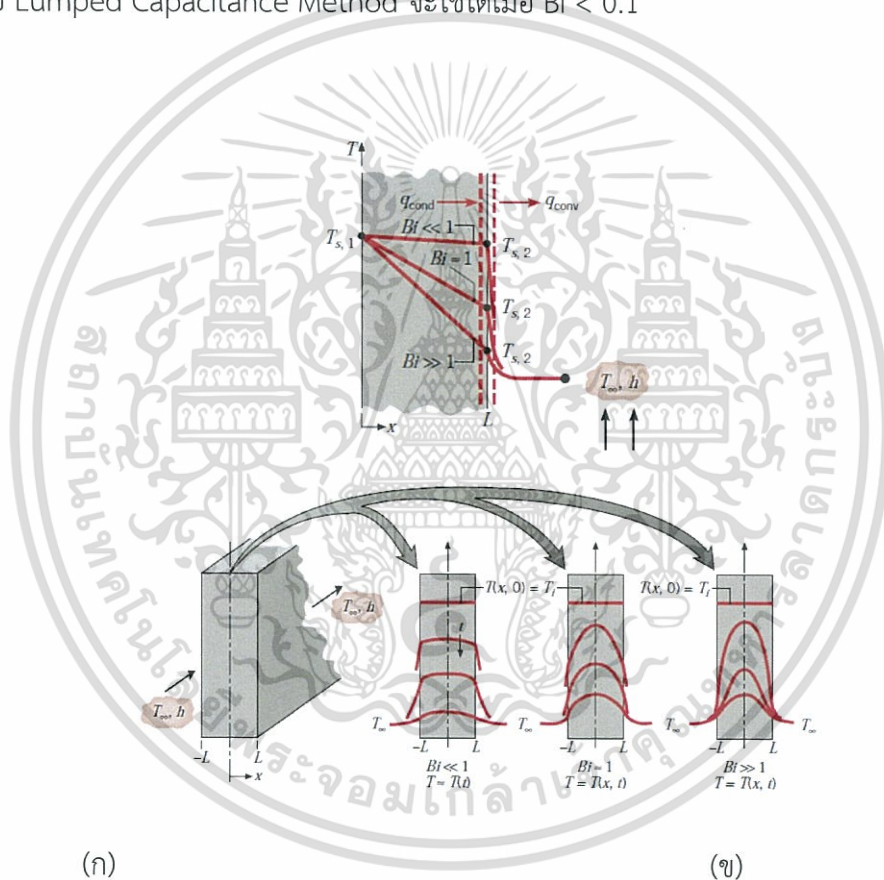
t คือ เวลาใด ๆ (s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Biot number เป็นตัวแปรไร้มิติ ที่มีบทบาทสำคัญเกี่ยวกับการพาความร้อนที่พื้นผิว ค่า Biot number เป็นตัววัดการลดยุณหภูมิในของแข็ง ดังรูปที่ 2.9 จะได้ว่าสามารถสมมติให้การกระจายอุณหภูมิในของแข็งเป็นแบบ uniform ณ เวลาใด ๆ ได้เมื่อ $Bi \ll 1$

$$Bi = \frac{hV}{kA_s} \quad (2.19)$$

จาก Lumped Capacitance Method วัตถุที่ค่าการนำความร้อน (k) สูงมาก ดังนั้นจะได้ว่า สำหรับ Lumped Capacitance Method จะใช้ได้เมื่อ $Bi < 0.1$



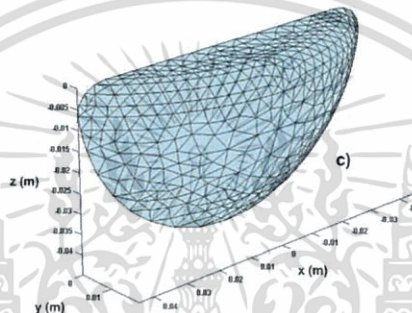
รูปที่ 2.9 ผลของค่า Biot number ต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิแบบคงตัวของผนังราบที่มี การพาความร้อนที่ผิว

ที่มา : Frank and David (2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 Finite element Method

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) คือวิธีเชิงตัวเลขที่เป็นวิธีการในการแก้ปัญหาด้วยวิธีประมาณค่าตัวเลข โดยโดเมนของโครงสร้างถูกแบ่งย่อยเป็นองค์ประกอบย่อยที่มีรูปร่างอย่างง่ายขนาดเล็กจำนวนจำกัด องค์ประกอบย่อยนี้ถูกเรียกเป็น “element” ซึ่งในแต่ละ element การกระจายตัวของตัวแปรที่สนใจจะแตกต่างกันตามตำแหน่งใด ๆ โดเมนของโครงสร้างจะมีระดับความเสรีแบบอนันต์ (infinite number of DOF) และโดเมนของแบบจำลองจะมีระดับความเสรีแบบจำกัด (finite number of DOF) ดังนั้นจึงเรียกว่า Finite element Method ตัวอย่างการแบ่งชิ้นส่วนโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนย่อยรูปทรง 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 2.10



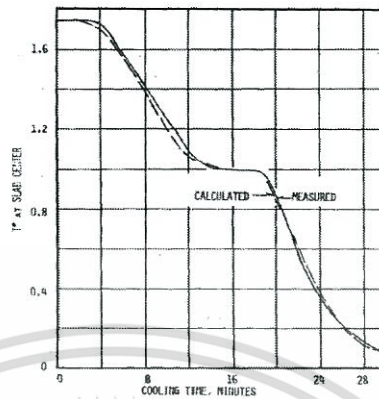
รูปที่ 2.10 ภาพแสดงการแบ่งชิ้นเบเกอร์เป็นชิ้นส่วนย่อย
ที่มา : Santos et al. (2010)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งของอาหารด้วยการประมาณค่า Plank (1941) ได้ทำการประมาณเวลาในการแช่เยือกแข็งโดยการสร้างสมการการคำนวณคือ สมการของแพลงค์ โดยมีสมมติฐานคือ การถ่ายโอนความร้อนภายในชิ้นอาหารเกิดจากการนำความร้อนแต่เพียงอย่างเดียว สมบัติทางกายภาพของชิ้นอาหารมีค่าคงที่ตลอดการแช่แข็ง ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำในอาหารและชิ้นอาหารมีอุณหภูมิจุดเยือกแข็งเท่ากันตลอดทั้งชิ้น โดยเวลาในการแช่แข็งจะคิดเฉพาะช่วงที่ใช้ความร้อนแฝงในการแปรเปลี่ยนสถานะของน้ำในอาหารให้เปลี่ยนไปเป็นน้ำแข็งเท่านั้น ไม่ได้คิดช่วงของลดอุณหภูมิลงมาก่อนหน้านั้น ซึ่งทำให้เวลาในการแช่เยือกแข็งมีความคลาดเคลื่อนสูง ต่อมา Nagaoka *et al.* (1956) ได้มีการดัดแปลงสมการของแพลงค์ให้มีความคลาดเคลื่อนลดลง

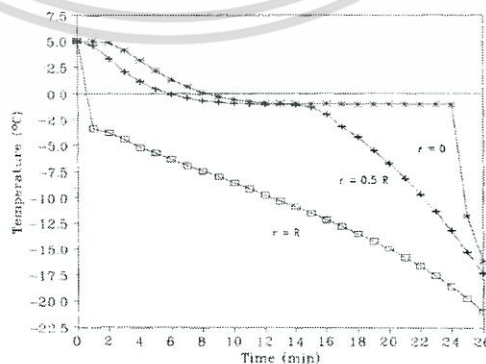
การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งของอาหารด้วยวิธีเชิงตัวเลข เช่น Finite difference และ Finite element มาใช้ร่วมกับสมการการถ่ายเทความร้อนได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายอย่างแพร่หลาย โดย Joshi and Tao (1974) และได้มีการนำวิธีเชิงตัวเลขวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ร่วมกับสมการการถ่ายเทความร้อนในการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งเนื้อวุ้นหนึ่เป็นชั้น (Slab) ที่มีการถ่ายเทเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนมิติเดียว โดยทราบค่าสมบัติทางความร้อนต่าง ๆ เพื่อนำไปคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็ง ดังรูปที่ 2.11 พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 0.75%



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของเนื้อวัว (Slab) ระหว่างการแช่เยือกแข็ง
ที่มา : Joshi and Tao (1974)

Tocci and Mascheroni (1995) ได้ทำการจำลองการทำนายการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลระหว่างการแช่เยือกแข็งของ meat balls ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม การถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว มีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากสมการที่ความสัมพันธ์ที่ Tocci and Mascheroni สร้างขึ้นมา การทำนายการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีเชิงตัวเลข แบบ Finite difference ร่วมกับสมการสมดุลพลังงาน เขียนด้วย QuickBASIC ซึ่งทดลองในการวัดอุณหภูมิของ meat ball 3 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 2.12

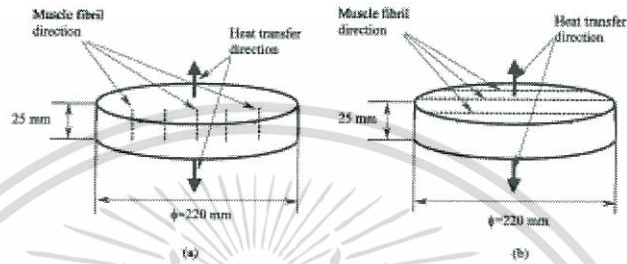


รูปที่ 2.12 การทำนายอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของ meat ball ระหว่างการแช่เยือกแข็ง

ที่มา : Tocci and Mascheroni (1995)

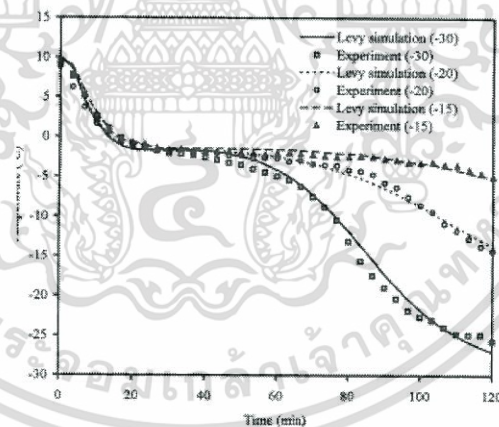
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sun and Zhu (1999) ได้ทำการทดลองการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite difference เช่นกันในการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งของเนื้อวัวที่มีการถ่ายเทความร้อนมิติเดียว แสดงดังรูปที่ 2.13 ค่าสมบัติทางความร้อนของอาหารประมาณค่าด้วยการคำนวณ และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.14 การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งความใกล้เคียงมาก มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ระหว่าง 2.25% ถึง 4.58%



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างชิ้นเนื้อวัวที่ใช้ในการทดลอง (a) การถ่ายเทความร้อนแบบขนาน
(b) การถ่ายเทความร้อนแบบตั้งฉาก

ที่มา : Sun and Zhu (1999)



รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนแบบขนานกับแบบจำลองที่อุณหภูมิการแช่เยือกแข็ง -30°C , -20°C and -15°C

ที่มา : Sun and Zhu (1999)

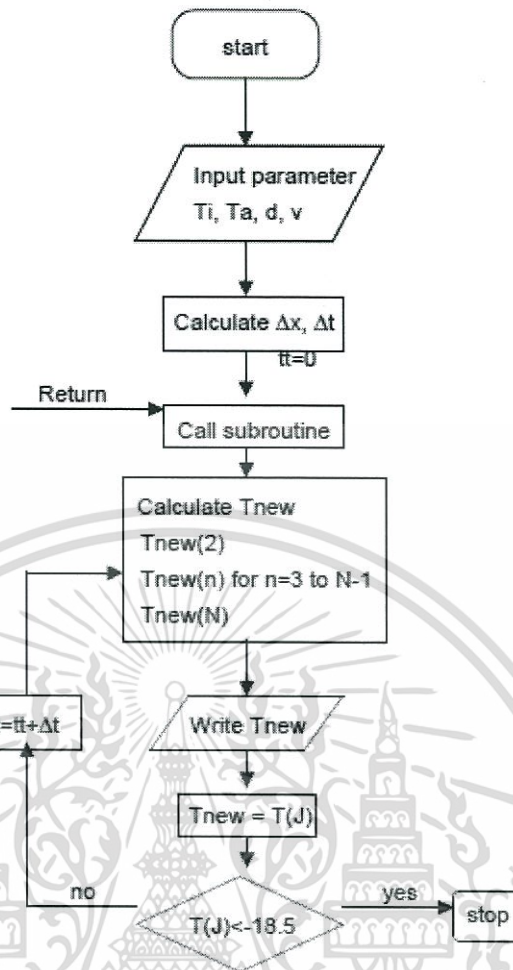
Saiwarun *et al.* (2001) ได้ทำการทดลองการทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกด้วยวิธีเชิงตัวเลขเขียนด้วยโปรแกรม FORTRAN โดยปลาหมึกมีการนำว้ายะภายในและหัวปลาหมึกออก ตัดให้เป็นแผ่นประมาณ 10×10 เซนติเมตร ความหนาอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 4 เซนติเมตร วัตถุประสงค์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิด้วย Thermocouple และปลาทูหมึกถูกบรรจุในกล่องโพลีสไตรีนโฟม 10×10 เซนติเมตร ความหนา 8 เซนติเมตร ($k = 0.035 \text{ W/m.K}$) อุณหภูมิเริ่มต้นในช่วง 0 ถึง 30 องศาเซลเซียสและมีการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว ปลาทูหมึกถูกแช่ในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า อุณหภูมิ -24 ถึง -31 องศาเซลเซียส จนอุณหภูมิใจกลางของปลาทูหมึกมีค่าเท่ากับ -18 องศาเซลเซียส แผนผังการแช่เยือกแข็งปลาทูหมึกแสดงดังรูปที่ 2.15 ค่าสมบัติทางความร้อนของอาหารและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของตัวกลางได้มีการสร้างสมการเพื่อนำค่าต่าง ๆ ไปใช้ในการทำนายเวลาแช่เยือกแข็ง แผนผังการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งแสดงดังรูปที่ 2.16 และเมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของโปรแกรมทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งเทียบกับการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.5



รูปที่ 2.15 แผนผังการแช่เยือกแข็งปลาทูหมึกในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า

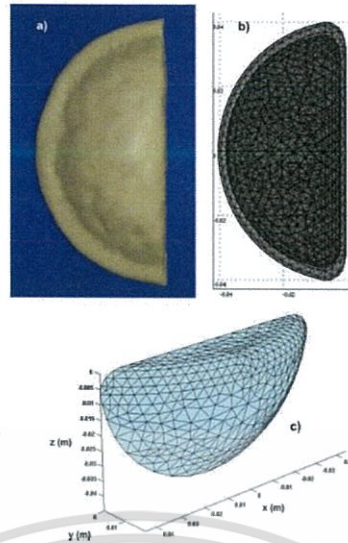
ที่มา : Saiwarun *et al.*, (2001)



รูปที่ 2.16 แผนผังการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีเชิงตัวเลข

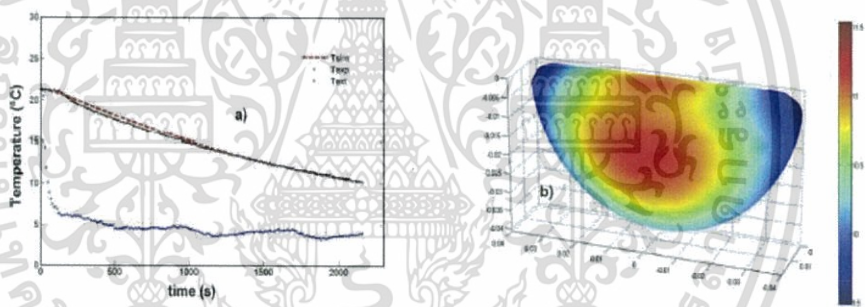
ที่มา : Saiwarun *et al.* (2001)

Santos *et al.* (2010) ได้ทำการทดลองการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite element ของเบเกอร์รูปทรง 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 2.17 การประมาณค่าคุณสมบัติทางความร้อนของอาหารใช้ความสัมพันธ์กับความชื้นของอาหารในการประมาณ และการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งกับการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.18 มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1.3 °C



รูปที่ 2.17 ภาพแสดงการแบ่งชิ้นเบเกอร์เป็นชิ้นส่วนย่อย

ที่มา : Santos et al. (2010)



รูปที่ 2.18 a) การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีเชิงตัวเลข,

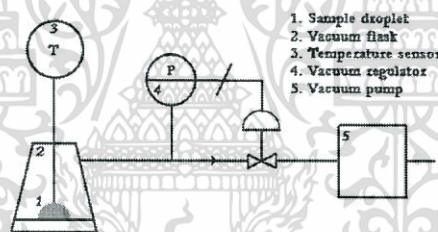
b) ระดับสีแสดงการถ่ายเทความร้อนระหว่างการแช่เยือกแข็ง

ที่มา : Santos et al. (2010)

Pham (2013) ได้ทำการศึกษาสมการการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งโดยการเปรียบเทียบ 4 สมการที่ใช้ในการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งได้แก่ 1. Cleland and Earle (CE), 1977, 1984 2. Pham (P1), 1984 3. Pham (P2), 1986 และ 4. Salvadori and Mascheroni (SM), 1996 โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขเป็นวิธีอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับทั้ง 4 สมการที่กล่าวมาข้างต้น วิธีเชิงตัวเลขที่ใช้อ้างอิงนี้ใช้สมการ Fourier's transient heat conduction โดยในการคำนวณใช้ infinite slab ความหนา 0.1 เมตร ช่วงของอุณหภูมิจุดเยือกแข็งอยู่ที่ -0.5 ถึง -9.3 °C ช่วงของ Biot number อยู่ที่ 0.045 ถึง 31 อุณหภูมิสุดท้ายอยู่ที่ -18 °C และวิธีเชิงตัวเลขได้คำนวณตามค่าต่าง ๆ ดังนี้ $T_i =$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

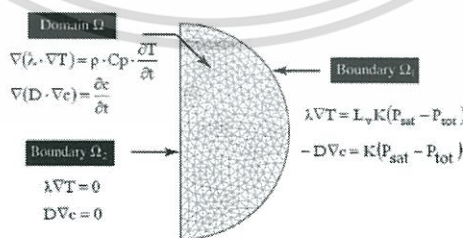
0, 20, 40 °C ; $T_a = -55, -40, -25$ °C ; $h = 1, 4, 16, 64, 256$ W/m².K จากการเปรียบเทียบแล้วทำการคำนวณค่าความผิดพลาดพบว่า P1 มีค่าใกล้เคียงกับวิธีเชิงตัวเลขที่สุดเนื่องจากเป็นสมการที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีทั้งหมดโดยมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ที่ $-6\% \pm 6\%$ ตามด้วย P2 เนื่องจาก P2 ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจุดเยือกแข็งทำให้มีค่าความผิดพลาดที่มากกว่า P1 โดย P2 มีความผิดพลาด $-5\% \pm 13\%$ เช่นเดียวกับ SM ที่ความผิดพลาด $-12\% \pm 12\%$ ส่วนวิธี CE มีความผิดพลาดอย่างมากจากผลกระทบของความร้อนสัมผัสที่ความผิดพลาด $23\% \pm 34\%$ แสดงผลดังตารางที่ 2.4

Cogne *et al.* (2013) ได้ทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลระหว่างการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศของ pure droplet ที่มีการถ่ายเทความร้อนมิติเดียว และคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม COMSOL แผนผังการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.19 ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของอาหารได้จากการประมาณค่า แบบจำลองรูปทรงของตัวอย่างที่ทำการแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยจำนวน 647 elements แสดงดังรูปที่ 2.20 พบว่าการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งที่ค่าใกล้เคียงกับการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.19 แผนผังการทดลองการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ

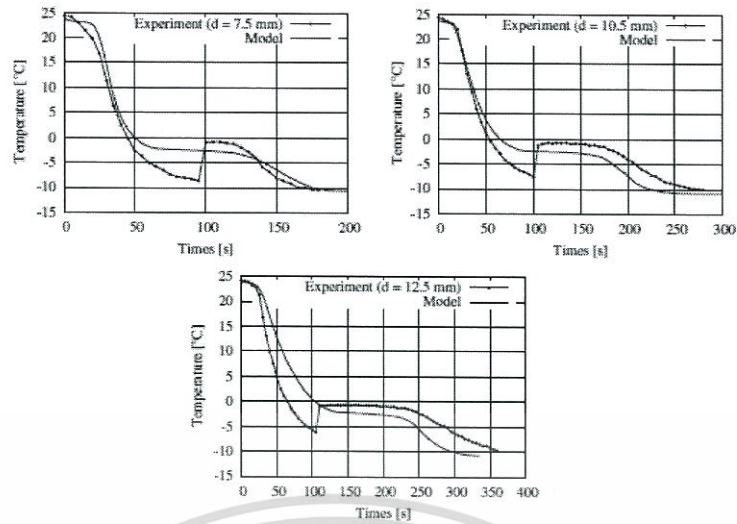
ที่มา : Cogne *et al.* (2013)



รูปที่ 2.20 แบบจำลองรูปทรงของตัวอย่างที่ทำการแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อย

ที่มา : Cogne *et al.* (2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางของ droplet จากการทำนายและจากการทดลอง

ทั้ง 3 เส้นผ่านศูนย์กลาง (7.3, 10.5 และ 12.5 มม.) ที่ความดัน 200 Pa.

ที่มา : Cogne *et al.* (2013)

Ferreira *et al.* (2016) ได้ออกแบบแบบจำลองสมดุพลังงานที่ได้รับการพัฒนาเพื่อจำลองกระบวนการแช่แข็งสำหรับทรงกระบอกที่มีการถ่ายเทความร้อนในมิติเดียวและทรงกลม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ใช้การคำนวณเชิงตัวเลขโดยสมการ finite difference ในการแก้ปัญหาโดยโปรแกรม MOL เวลาในการแช่แข็งที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองโดยใช้ tylose gel เวลาในการแช่แข็งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกันกับผลการทดลอง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเมื่อเทียบกับการทดลองอยู่ในช่วง $-4.61 \leq \text{error} (\%) \leq 6.81$ จากข้อมูลการทดลองที่ทำการวิเคราะห์สำหรับทรงกลม 123 ครั้งและทรงกระบอก 30 ครั้งให้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ในช่วง $-2.96 \leq \text{error} (\%) \leq 3.34$

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite element เช่นเดียวกับ Santos *et al.* (2010) และ Cogne *et al.* (2013) แต่งานวิจัยนี้ได้มีการจำลองการถ่ายเทความร้อนของทรงกระบอกที่มีการถ่ายเทความร้อน 2 มิติ เข้ามาทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งร่วมกับสมดุพลังงาน เช่นเดียวกับ Tocci and Mascheroni (1995), Sun and Zhu (1999) และ Santos *et al.* (2010) ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ COMSOL เช่นเดียวกับ Cogne *et al.* (2013) ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนของไส้กรอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ณ สภาวะการแช่เยือกแข็งต่าง ๆ

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 โปรแกรมการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็ง

โปรแกรมที่ใช้ในการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งของไส้กรอก คือ COMSOL Multiphysics 5.1 กรณีการถ่ายเทความร้อนของของแข็ง ใช้กฎของฟูรีเยในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนดังสมการที่ 3.1 (Carslaw and Jaeger, 1959)

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T) \nabla T) \quad (3.1)$$

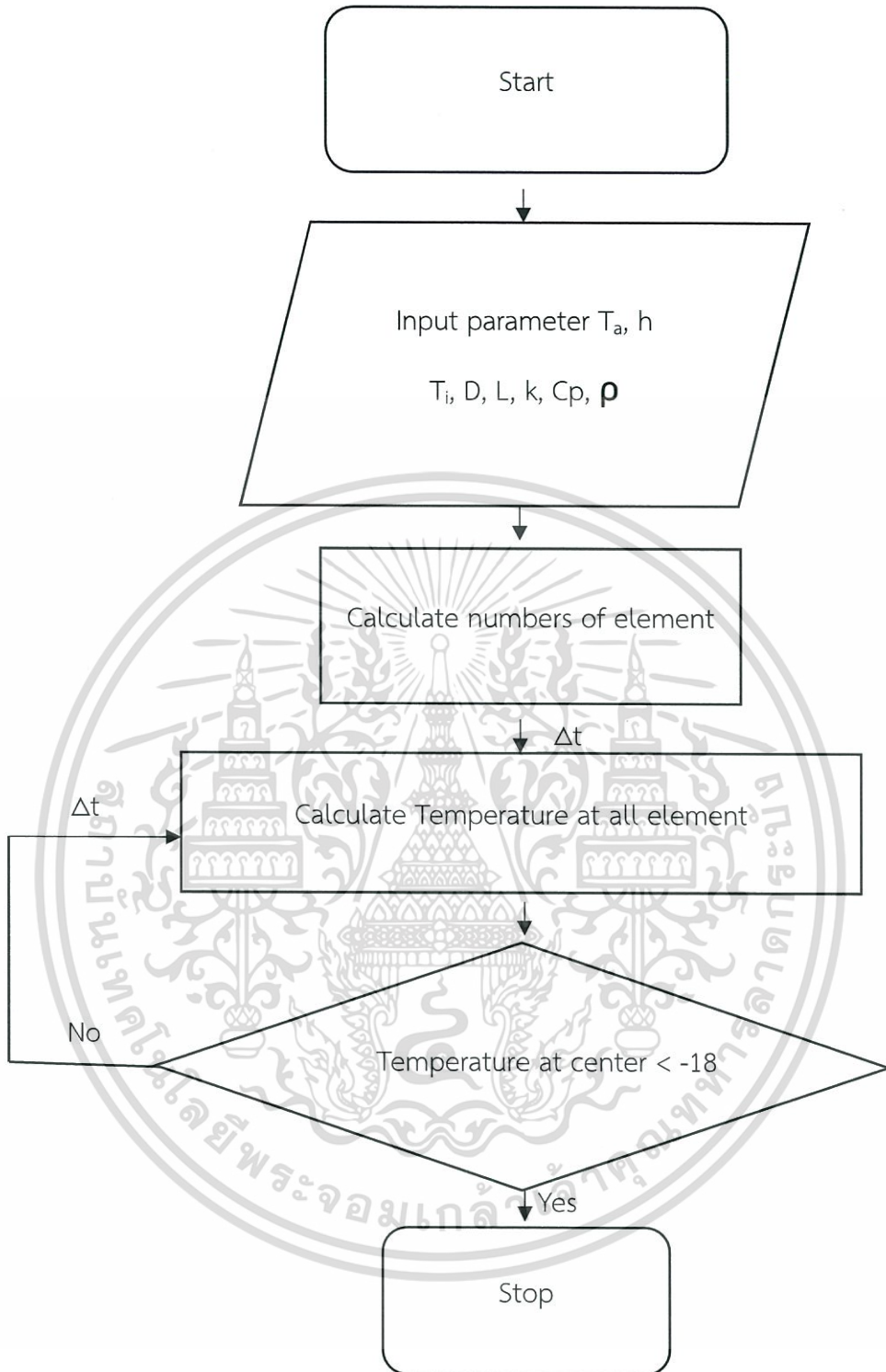
โดย ρ คือ ความหนาแน่นของอาหาร (kg/m^3)

C_p คือ ความจุความร้อนของอาหารที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

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

T คือ อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)

การทำงานของโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.1 ในการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งเป็นการคำนวณด้วย Finite element method เริ่มต้นด้วยการป้อนข้อมูล (Input parameter) ของอาหารคือ อุณหภูมิเริ่มต้น รูปร่าง ความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และข้อมูลของอากาศภายในเครื่องแช่เยือกแข็งคือ อุณหภูมิของอากาศ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณจำนวนชิ้นส่วนย่อย (element) เพื่อใช้ในการคำนวณอุณหภูมิ โปรแกรมจะคำนวณอุณหภูมิทุกชิ้นส่วนย่อยในรอบเวลา (Δt) และพิจารณาอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของวัตถุถ้ามีค่ามากกว่า -18 องศาเซลเซียส จะทำการคำนวณอุณหภูมิทุกชิ้นส่วนย่อยในรอบเวลา (Δt) ใหม่ จนอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของวัตถุมีค่าน้อยกว่า -18 องศาเซลเซียส จึงหยุดการทำงาน (Stop) แผนผังการทำนายเวลาแช่เยือกแข็งด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการทำนายเวลาแช่เยือกแข็งด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้และการเตรียมวัสดุ

3.2.1 วัสดุดิบ

วัสดุดิบที่ใช้ในการทดลอง คือ ไส้กรอกปัสคัก (เวียนนาหมู) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยต่างกัน 3 ขนาด คือ 1.64 ± 0.03 , 1.97 ± 0.02 และ 2.68 ± 0.04 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2 ไส้กรอกเวียนนาหมูมีองค์ประกอบหลักคือ โปรตีน 14.50%, ไขมัน 21.80%, คาร์โบไฮเดรต 2.10% น้ำ 59.70% เกลือ 1.90% (กรมอนามัย, 2544)



รูปที่ 3.2 ไส้กรอกปัสคัก

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด
Data logger	รุ่น 34970A ยี่ห้อ Agilent
Thermocouple	Type K
เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า	ปริมาตร 382 ลิตร อุณหภูมิตู้แช่แข็ง -20 องศาเซลเซียส รุ่น SF-PC1497 ยี่ห้อ Panasonic ประเทศญี่ปุ่น
เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า	อุณหภูมิตู้แช่แข็ง -38 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 3 m/s เครื่อง compact freezer ยี่ห้อ Patkol ประเทศไทย
เครื่องชั่งน้ำหนัก	ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Yamato รุ่น HB-120 ประเทศญี่ปุ่น
แท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0320 เมตร ยาว 0.0913 เมตร พื้นที่ผิว 0.0107 ตารางเมตร ปริมาตร 7.34×10^{-5} ลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่น 2700 kg/m^3 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ $923 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ค่าการนำความร้อน $237 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
เวอร์เนียคาลิเปอร์	ความละเอียด 0.05 มิลลิเมตร

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

วัดขนาดไส้กรอกบิลคัก (เวียนนาหมู) ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3 ขนาด คือ 1.64 ± 0.03 , 1.97 ± 0.02 และ 2.68 ± 0.04 เซนติเมตร โดยมีความยาวเท่ากัน คือ 5.50 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3



(ก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข.)

รูปที่ 3.3 การเตรียมตัวอย่างไส้กรอก (ก.) ตัวอย่างไส้กรอกทั้ง 3 ขนาด
(ข.) การวัดขนาดตัวอย่างไส้กรอกด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์

3.3.2 ขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง

นำไส้กรอกทั้ง 3 ขนาด จำนวนขนาดละ 3 ชิ้น ทดลองกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า ดังรูปที่ 3.4 ที่มีอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องแช่เยือกแข็งเฉลี่ย -21.48 ± 0.50 °C ใช้สาย Thermocouple (Type K) ที่เชื่อมต่อกับ Data logger ดังรูปที่ 3.5 เพื่อทำการบันทึกอุณหภูมิขณะแช่เยือกแข็งที่เวลาทุก ๆ 30 วินาที ทำการเสียบสาย Thermocouple ไปที่จุดกึ่งกลางของไส้กรอก ทำการแช่เยือกแข็งจนอุณหภูมิจุดกึ่งกลางของไส้กรอกเท่ากับ -18 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.6 และทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง



รูปที่ 3.4 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 Data logger ที่ต่อกับสาย Thermocouple เพื่อบันทึกข้อมูล



รูปที่ 3.6 การทดลองวัดอุณหภูมิของตัวอย่างไส้กรอกที่ใช้ในการทดลอง

นำไส้กรอกทั้ง 3 ขนาด จำนวนขนาดละ 3 ชิ้น ทดลองกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่ารูปที่ 3.7 ที่มีอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องแช่เยือกแข็งเฉลี่ย -21.48 ± 0.50 °C ใช้สาย Thermocouple (Type K) ที่เชื่อมต่อกับ Data logger เพื่อทำการบันทึกอุณหภูมิขณะแช่เยือกแข็งที่เวลาทุก ๆ 30 วินาที ทำการเสียบสาย Thermocouple ไปที่จุดกึ่งกลางของไส้กรอก ทำการแช่เยือกแข็งจนอุณหภูมิจุดกึ่งกลางของไส้กรอกเท่ากับ -18 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.4 – 3.6 และทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง เช่นเดียวกับการทดลองกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า



รูปที่ 3.7 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าที่ใช้ในการทดลอง

3.3.3 การคำนวณความหนาแน่น

คำนวณความหนาแน่นของสารละลาย n-Heptane ($\rho_{n\text{-Heptane}}$) โดยตวงสารละลายด้วยกระบอกตวงจะได้ปริมาตร ($V_{n\text{-Heptane}}$) และนำสารละลายที่ตวงได้ไปชั่งน้ำหนัก และจดบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ($m_{n\text{-Heptane}}$) เพื่อนำไปคำนวณหาความหนาแน่น ดังสมการที่ 3.2 จากนั้นใส่สารละลายลงในปิ๊กเกอร์

$$\rho_{n\text{-Heptane}} = \frac{m_{n\text{-Heptane}}}{V_{n\text{-Heptane}}} \quad (3.2)$$

จากนั้นชั่งน้ำหนักใส่กรอก 1 ชั้น บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) (m_{sample}) จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างดังกล่าวเสียบเข้ากับเข็มที่ติดอยู่ที่ขาตั้ง เพื่อนำมาใส่ลงในปิ๊กเกอร์ที่มีสารละลาย n-Heptane และชั่งน้ำหนักรวมของสารละลายและตัวอย่าง (m_{mix}) (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาตรของตัวอย่าง (V_{sample}) ดังสมการที่ 3.3 และนำไปคำนวณหาความหนาแน่นของตัวอย่าง (ρ_{sample}) ดังสมการที่ 3.4

$$V_{\text{sample}} = \frac{m_{\text{mix}} - m_{n\text{-Heptane}}}{\rho_{n\text{-Heptane}}} \quad (3.3)$$

$$\rho_{\text{sample}} = \frac{m_{\text{sample}}}{V_{\text{sample}}} \quad (3.4)$$

3.3.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน สามารถคำนวณจาก Lumped Capacitance Method ดังนี้

วัดขนาดแท่งอะลูมิเนียมทั้งรูปทรงทรงกระบอก บันทึกอุณหภูมิเริ่มต้นของแท่งอะลูมิเนียมด้วย Thermocouple (Type K) จากนั้นนำแท่งอะลูมิเนียมไปวางไว้ในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลมเป่าและเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า บันทึกอุณหภูมิของอะลูมิเนียมและอุณหภูมิภายในเครื่องแช่เยือกแข็งทุก ๆ 5 วินาที จนกระทั่งอุณหภูมิของวัตถุใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายในเครื่องแช่เยือกแข็ง นำค่าจากการทดลองไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่สภาวะต่าง ๆ โดยการเขียนกราฟระหว่าง $\ln \left(\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \right)$ กับเวลา (t) จะได้กราฟเป็นเส้นตรง สามารถคำนวณหาค่า h ได้ เมื่อทราบความชันของกราฟ

$$\text{ความชันของกราฟ (s)} = \frac{-hA_s}{\rho V C_p} \quad (3.5)$$

$$h = \frac{-s \rho V C_p}{A_s} \quad (3.6)$$

3.3.5 การคำนวณค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนจำเพาะของไส้กรอก

ค่าการนำความร้อนของไส้กรอกสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 2.1 ถึง 2.2 และสมการที่ 2.4 ถึง 2.7 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไส้กรอกสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 2.3 และสมการที่ 2.8 ซึ่งไส้กรอกมีองค์ประกอบหลักคือ โปรตีน 14.50%, ไขมัน 21.80%, คาร์โบไฮเดรต 2.10% น้ำ 59.70% เกลือ 1.90%

3.4 การทวนสอบค่าจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ทวนสอบโปรแกรมในการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งโดยการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งของค่าจากการทำนายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และค่าจากการทดลอง ดังสมการที่ 3.7

$$\text{Percent error} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{\text{Predicted temperature}_i - \text{Experimental temperature}_i}{\text{Predicted temperature}_i} \times 100\% \right)}{n} \quad (3.7)$$

โดยที่ i คือ เวลาในการแช่เยือกแข็ง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ความหนาแน่นของไส้กรอก

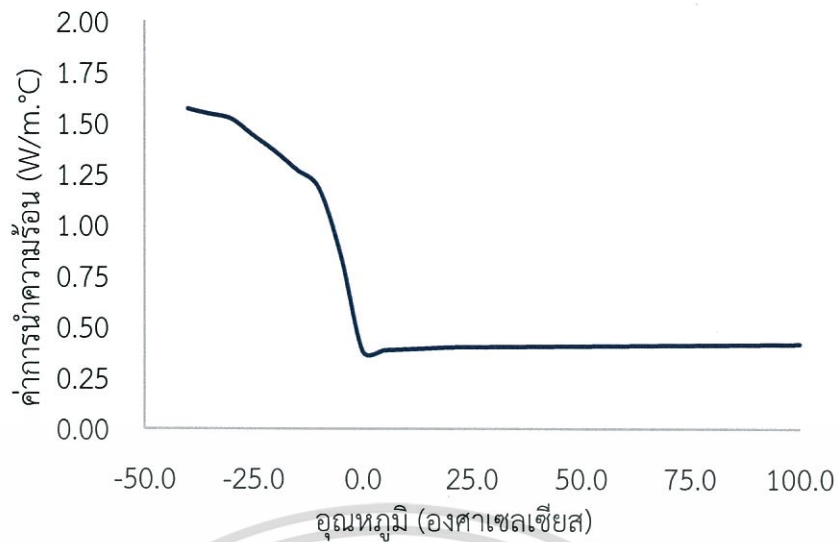
ความหนาแน่นของไส้กรอกที่ใช้ในการทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 ถึง 3.3 โดยทำการทดลองจากไส้กรอกทั้งสามขนาด พบว่าความหนาแน่นเฉลี่ยของไส้กรอกเท่ากับ 976.24 kg/m^3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.75 kg/m^3 แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของไส้กรอกจากการทดลอง

ครั้งที่	$m_{n\text{-Heptane}}$ (kg)	$V_{n\text{-Heptane}}$ (m^3)	$\rho_{n\text{-Heptane}}$ (kg/m^3)	m_{sample} (kg)	V_{sample} (m^3)	ρ_{sample} (kg/m^3)
1	0.0081	1.22×10^{-5}	666.91	0.0119	1.22×10^{-5}	978.210
2	0.0136	2.04×10^{-5}	666.91	0.0199	2.04×10^{-5}	975.658
3	0.0224	3.36×10^{-5}	666.90	0.0327	3.36×10^{-5}	974.855
ค่าเฉลี่ย						976.24
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						1.75

4.2 ค่าการนำความร้อนของไส้กรอก

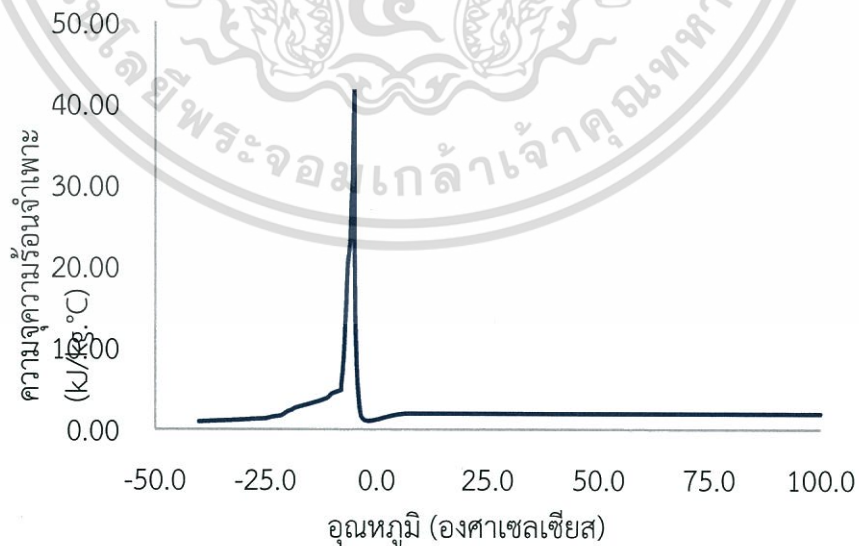
ค่าการนำความร้อนของไส้กรอกสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 2.1 และ 2.3 และสมการที่ 2.4 ถึง 2.7 พบว่าที่อุณหภูมิยิ่งต่ำกว่าจุดเยือกแข็งค่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มคงที่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อนของไส้กรอก

4.3 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไส้กรอก

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไส้กรอกสามารถคำนวณได้จากตารางที่ 2.4 และสมการที่ 2.8 พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ค่าความจุความร้อนจำเพาะมีแนวโน้มคงที่ค่าหนึ่งและเมื่อเข้าใกล้จุดเยือกแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้น และกลับมามีค่าคงที่อีกครั้งที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.2

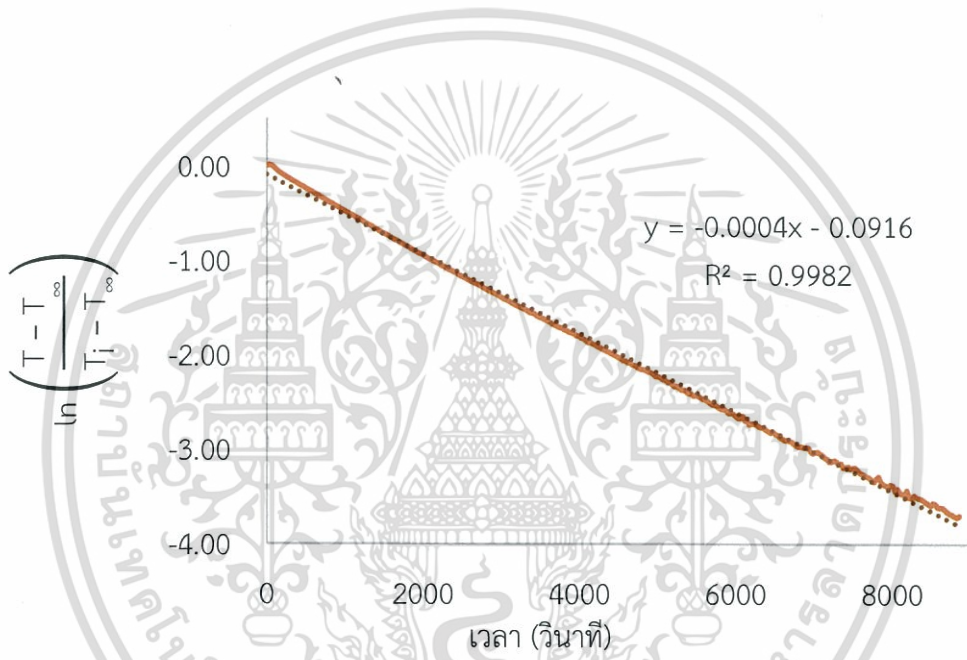


รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อความจุความร้อนจำเพาะของไส้กรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

จากการทดลองวัดอุณหภูมิของอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกเทียบกับอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องแช่เยือกแข็ง ณ เวลาใด ๆ เมื่อนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{T-T}{T_i-T_\infty}\right)$ และ t พบว่าความชันที่ได้นำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแช่เยือกแข็งทั้งสองเครื่องได้ จากสมการที่ 3.4 และคำนวณ Bi ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.1 จึงจะสามารถใช้วิธี Lumped Capacitance Method ได้ จากสมการที่ 2.19 ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{T-T}{T_i-T_\infty}\right)$ และ t ณ สภาวะต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.6



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{T-T}{T_i-T_\infty}\right)$ และ t ของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก

ที่ทดลองกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าครั้งที่ 1

จากรูปที่ 4.3 พบว่ากราฟมีความชันเท่ากับ -0.0004 คำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าเท่ากับ $6.84 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ และค่า Bi เท่ากับ 0.0002 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.1

ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

แท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก พื้นที่ผิว 0.0107 ตารางเมตร

ปริมาตร 7.34×10^{-5} ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่น 2700 kg/m^3

ค่าความจุความร้อนจำเพาะ $923 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$

ค่าการนำความร้อน $237 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$

จากสมการที่ 3.4 จะได้

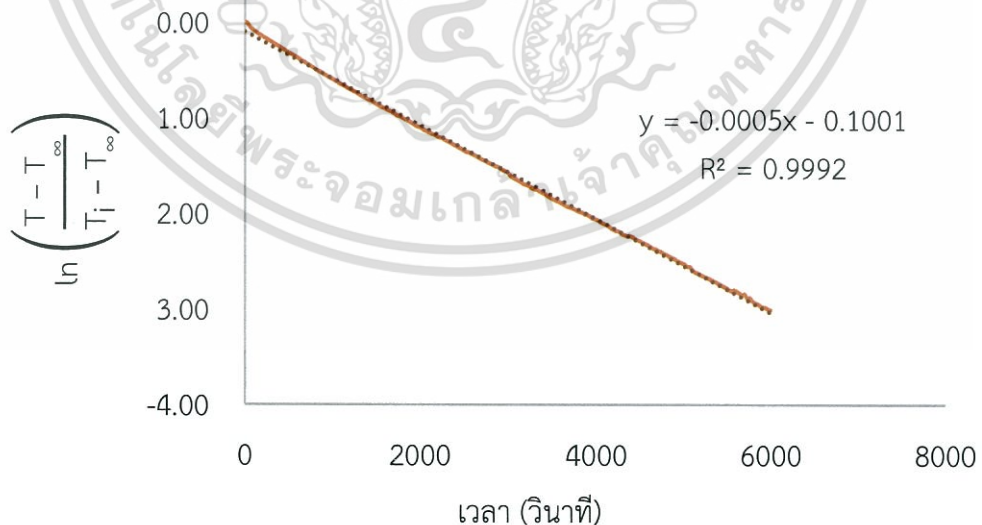
$$h = \frac{-(-0.0004) \times 2700 \times 7.34 \times 10^{-5} \times 923}{0.0107} \quad (4.1)$$

$$h = 6.84 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.2)$$

จากสมการที่ 2.18 จะได้

$$Bi = \frac{6.84 \times 7.34 \times 10^{-5}}{237 \times 0.0107} \quad (4.3)$$

$$Bi = 0.0002 \quad (4.4)$$

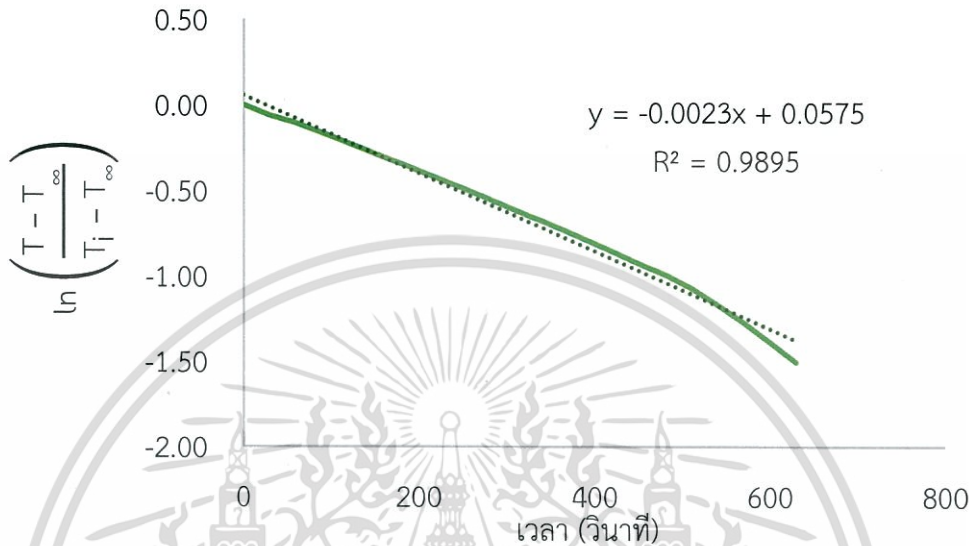


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left(\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right)$ และ t ของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก

ที่ทดลองกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าครั้งที่ 2

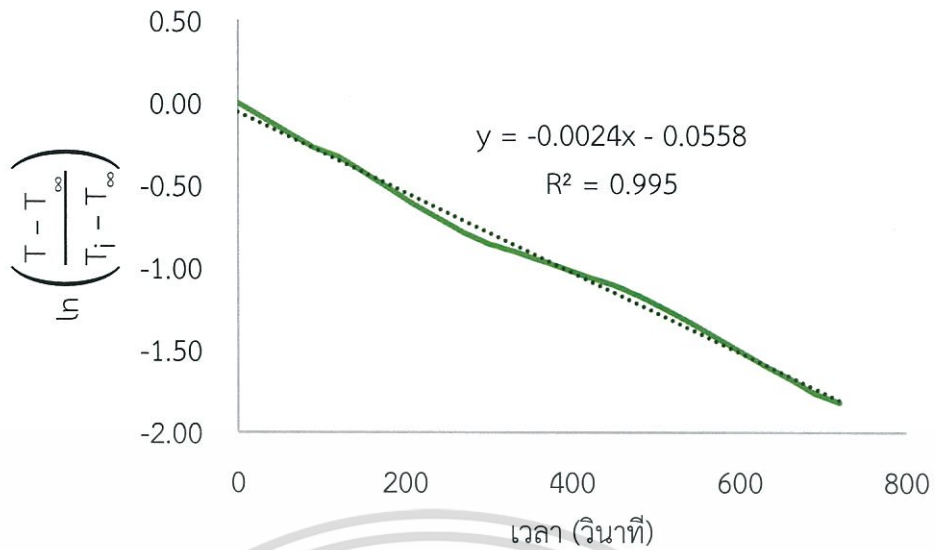
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 พบว่ากราฟมีความชันเท่ากับ -0.0005 คำนวนสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าเท่ากับ $8.55 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ และค่า Bi เท่ากับ 0.0002 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.1



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty}\right)$ และ t ของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกที่ทดลองกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าครั้งที่ 1

จากรูปที่ 4.5 พบว่ากราฟมีความชันเท่ากับ -0.0023 คำนวนสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าเท่ากับ $39.33 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ และค่า Bi เท่ากับ 0.0010 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.1



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}\right)$ และ t ของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก
ที่ทดลองกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าครั้งที่ 2

จากรูปที่ 4.6 พบว่ากราฟมีความชันเท่ากับ -0.0024 คำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าเท่ากับ $41.04 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ และค่า Bi เท่ากับ 0.0010 ซึ่งมิต่ำน้อยกว่า 0.1

จากผลการทดลองจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $7.70 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $1.21 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ และทุกการทดลองมีค่า Bi น้อยกว่า 0.01 แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า

การทดลอง	รูปทรง	T_i (°C)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ผิว (m ²)	ความชัน	h (W/m ² ·°C)	Bi
1	กระบอก	44.17	7.34×10^{-5}	0.0107	-0.0004	6.84	0.0002
2	กระบอก	45.53	7.34×10^{-5}	0.0107	-0.0005	8.55	0.0002
ค่าเฉลี่ย						7.70	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						1.21	

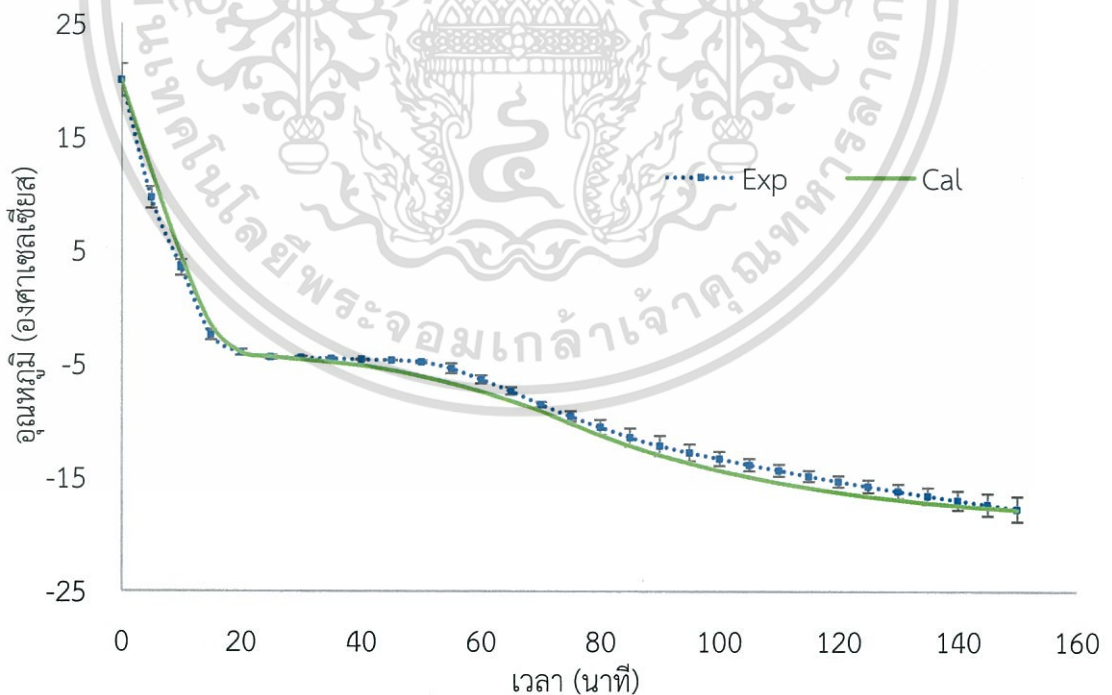
จากผลการทดลองจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $40.18 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $1.21 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ และทุกการทดลองมีค่า Bi น้อยกว่า 0.01 แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า

การทดลอง	รูปทรง	T_i (°C)	ปริมาตร (m ³)	พื้นที่ผิว (m ²)	ความชื้น	h (W/m ² ·°C)	Bi
1	กระบอก	45.76	7.34×10^{-5}	0.0107	-0.0023	39.33	0.0010
2	กระบอก	60.40	7.34×10^{-5}	0.0107	-0.0024	41.04	0.0010
ค่าเฉลี่ย						40.18	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						1.21	

4.5 การทำนายเวลาแช่เยือกแข็ง

การทำนายอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งกับเวลาที่สภาวะต่าง ๆ จากโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.1 เทียบกับการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.12



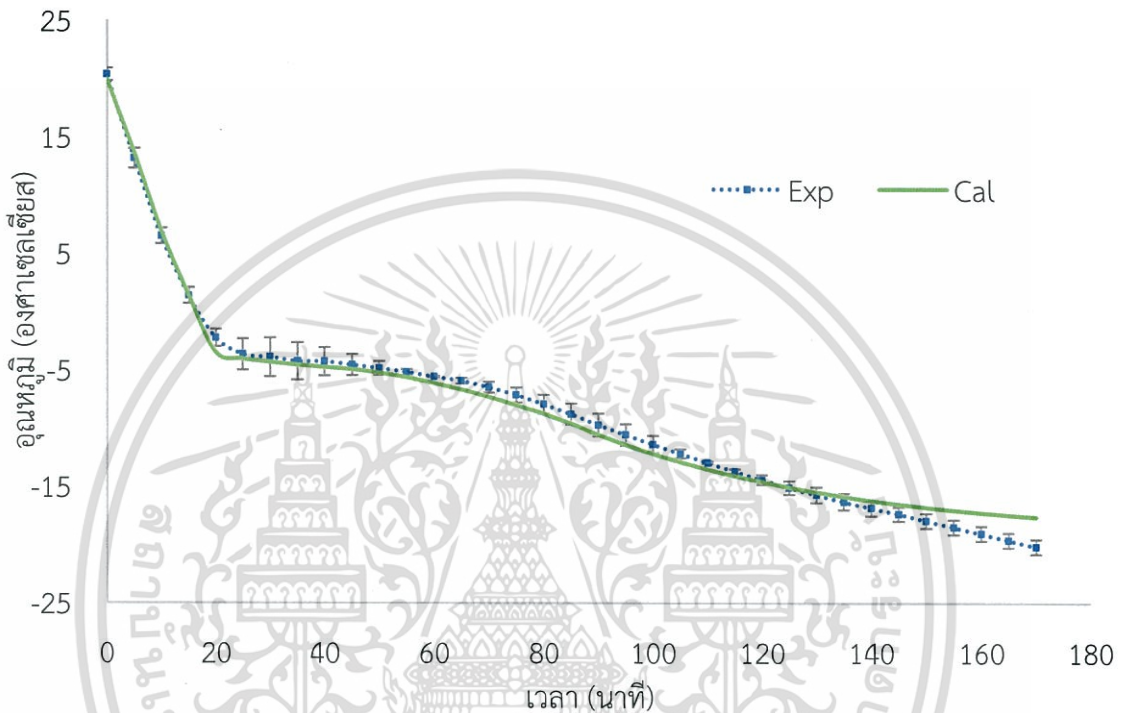
รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.64

เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า ($T_\infty = -21.48 \pm 0.50$ องศาเซลเซียส,

$$h = 7.70 \pm 1.21 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$$

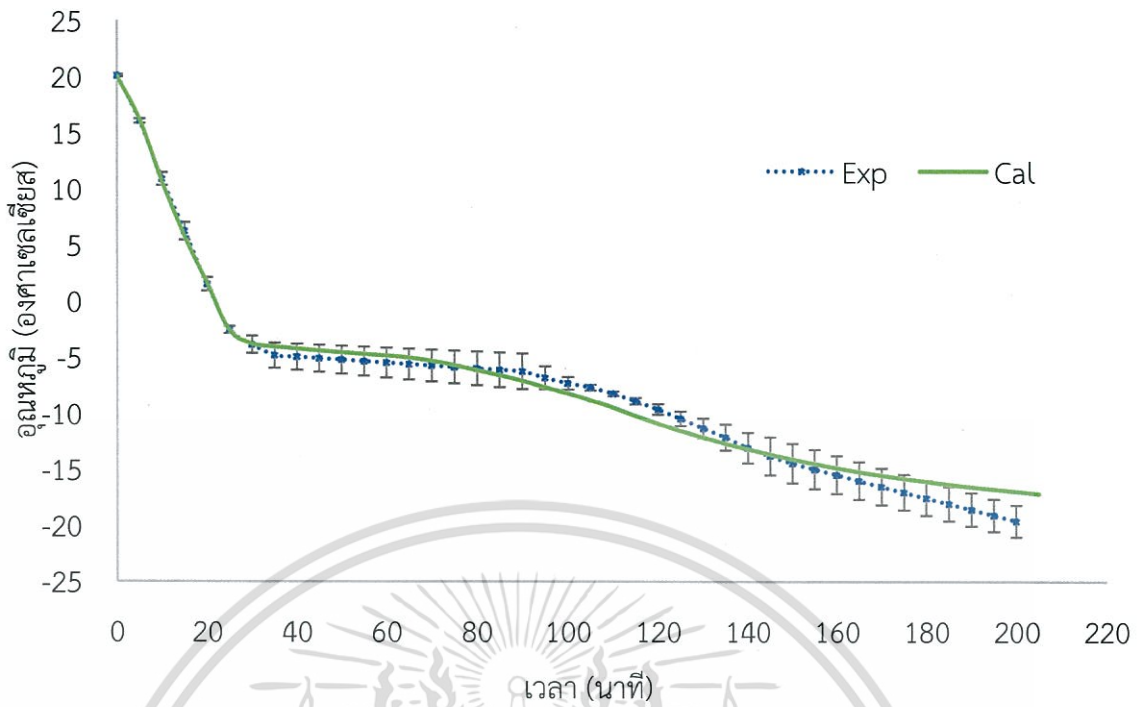
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 พบว่าไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.64 เซนติเมตร อุณหภูมิเริ่มต้น 20.03 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 152 นาที จนอุณหภูมิลดลงถึง -18.01 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 8.13% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.36%



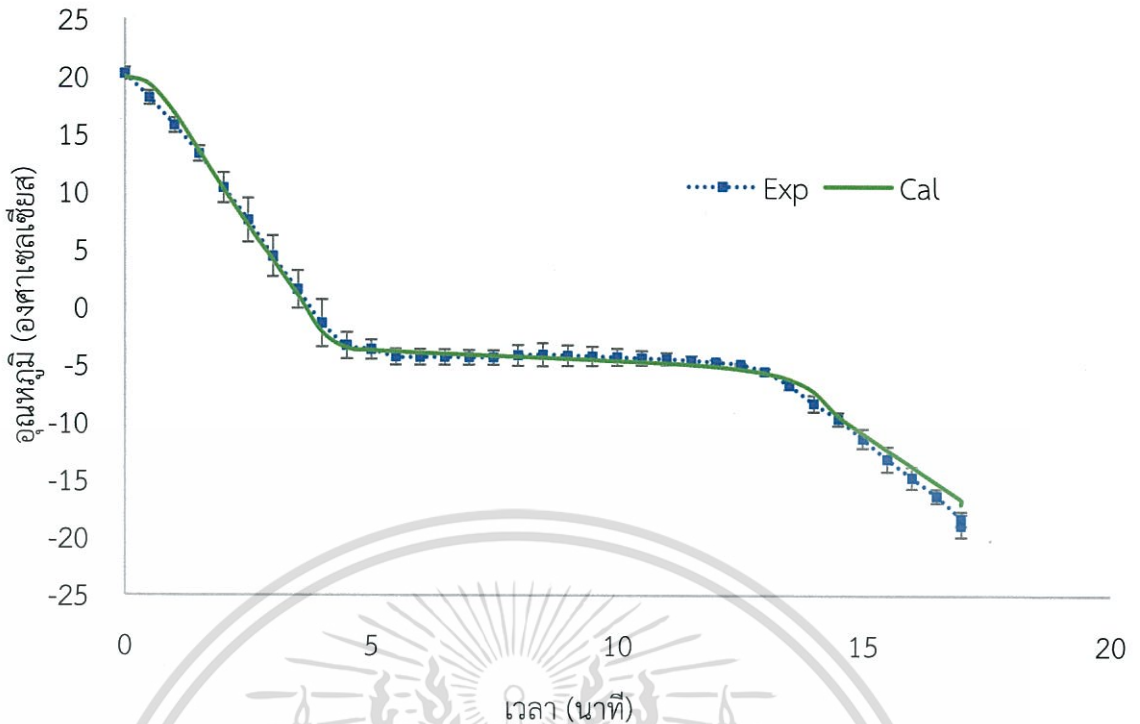
รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.97 เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า ($T_{\infty} = -21.48 \pm 0.50$ องศาเซลเซียส, $h = 7.70 \pm 1.21$ W/m².°C)

จากรูปที่ 4.8 พบว่าไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.97 เซนติเมตร อุณหภูมิเริ่มต้น 20.38 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 156 นาที จนอุณหภูมิลดลงถึง -18.01 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 9.06% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 4.77%



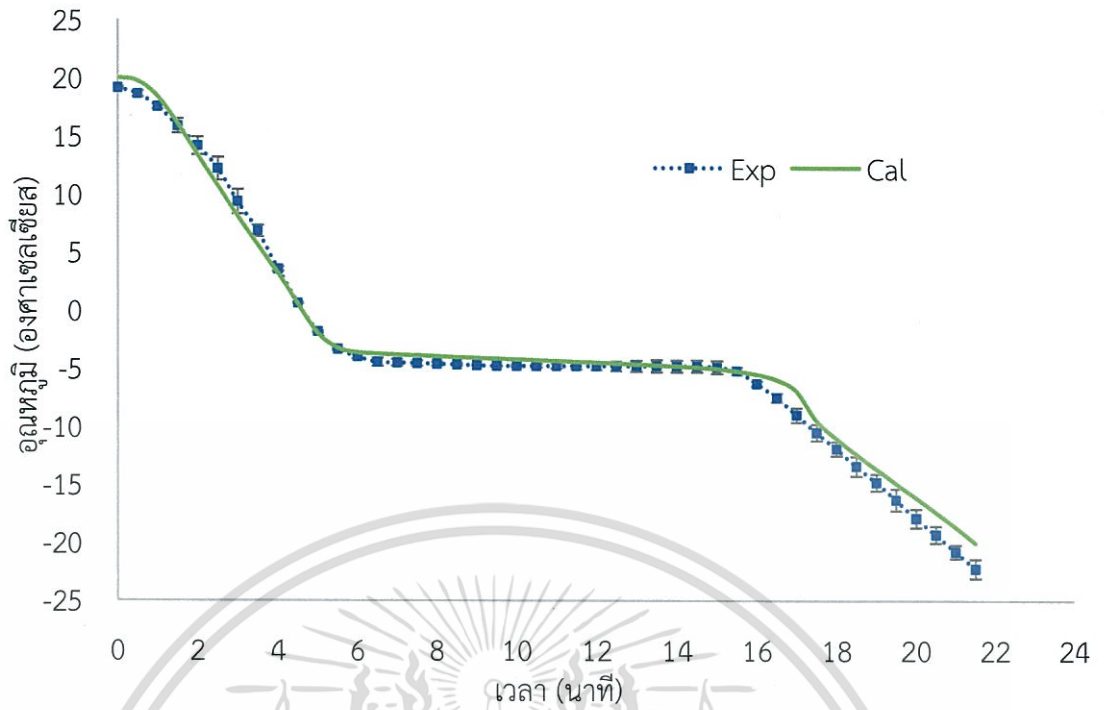
รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.68 เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า ($T_{\infty} = -21.48 \pm 0.50$ องศาเซลเซียส, $h = 7.706 \pm 1.21$ W/m².°C)

จากรูปที่ 4.9 พบว่าไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.68 เซนติเมตร อุณหภูมิเริ่มต้น 20.09 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 185 นาที จนอุณหภูมิลดลงถึง -18.04 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 8.53% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.02%



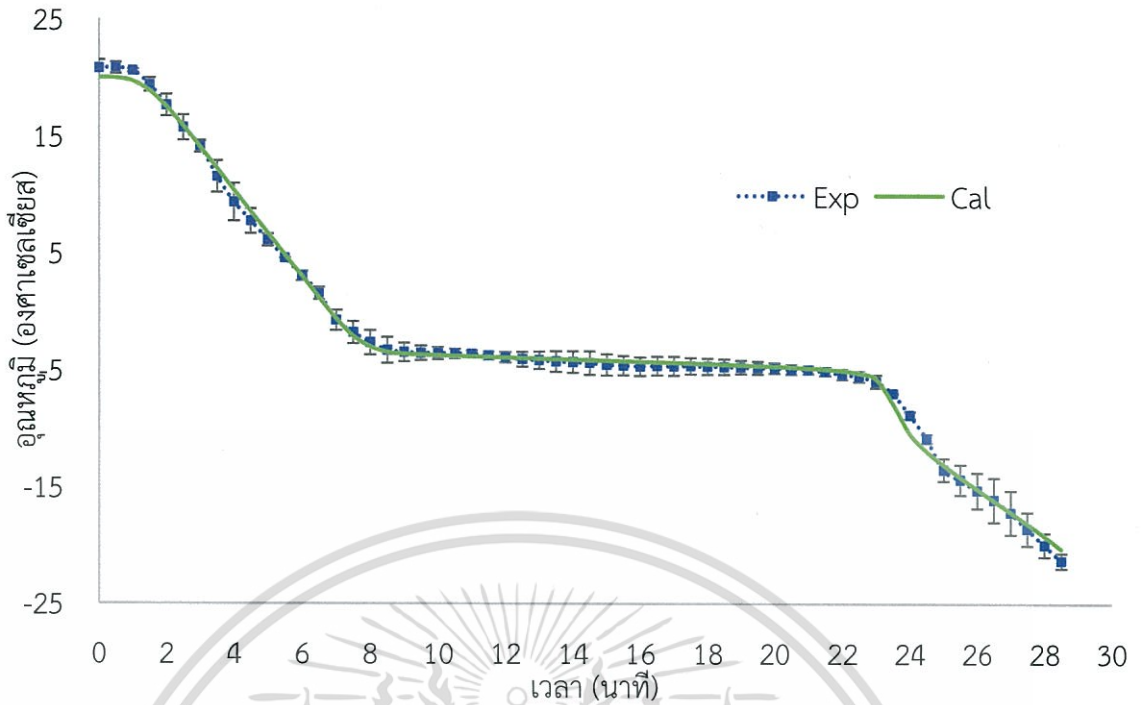
รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.64 เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า ($T_{\infty} = -36.50 \pm 1.58$ องศาเซลเซียส, $h = 40.18 \pm 1.21$ W/m².°C)

จากรูปที่ 4.10 พบว่าไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.64 เซนติเมตร อุณหภูมิเริ่มต้น 19.90 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 17 นาที จนอุณหภูมิลดลงถึง -18.28 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 8.22% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.98%



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.97 เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า ($T_{\infty} = -36.50 \pm 1.58$ องศาเซลเซียส, $h = 40.18 \pm 1.21$ W/m².°C)

จากรูปที่ 4.11 พบว่าไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.97 เซนติเมตร อุณหภูมิเริ่มต้น 19.13 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาทีจนอุณหภูมิลดลงถึง -18.43 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 11.72% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.01%



รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิกับเวลาขณะแช่เยือกแข็งของไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.68 เซนติเมตร กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า ($T_{\infty} = -36.50 \pm 1.58$ องศาเซลเซียส, $h = 40.18 \pm 1.21$ W/m².°C)

จากรูปที่ 4.12 พบว่าไส้กรอกเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.68 เซนติเมตร อุณหภูมิเริ่มต้น 20.80 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 27.50 นาทีจนอุณหภูมิลดลงถึง -18.57 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 5.09% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 4.87%

จากผลการทดลองการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของเวลาในการแช่เยือกแข็งที่ทำนายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่าจากการทดลองที่แช่เยือกแข็งไส้กรอกด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางทั้ง 3 ขนาดแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความผิดพลาดของเวลาในการแช่เยือกแข็งที่ทำนายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับค่าจากการทดลองที่แช่เยือกแข็งไส้กรอกด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า

เส้นผ่านศูนย์กลาง ไส้กรอก (ซม.)	เวลาที่ใช้ในการ แช่เยือกแข็ง (นาทื)	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด	ค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1.64	152.00	8.13	2.36
1.97	156.00	9.01	4.77
2.68	185.00	8.53	5.02

และจากผลการทดลองการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของเวลาในการแช่เยือกแข็งที่ทำนายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่าจากการทดลองที่แช่เยือกแข็งไส้กรอกด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางทั้ง 3 ขนาดแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความผิดพลาดของเวลาในการแช่เยือกแข็งที่ทำนายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับค่าจากการทดลองที่แช่เยือกแข็งไส้กรอกด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า

เส้นผ่านศูนย์กลาง ไส้กรอก (ซม.)	เวลาที่ใช้ในการ แช่เยือกแข็ง (นาที)	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด	ค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1.64	17.00	8.22	2.98
1.97	20.00	11.72	5.01
2.68	27.50	5.09	4.87

จากตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 พบว่าไส้กรอกทั้ง 3 ขนาด (1.64, 1.97 และ 2.68 เซนติเมตร) ที่วิธีการแช่เยือกแข็งต่างกันทั้ง 2 วิธี (เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่าและเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า) ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีผลมาจากหลายปัจจัย ดังนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไส้กรอกไม่ได้เท่ากันทุกชิ้นแต่ในการทำนายใช้ค่าเฉลี่ยจึงอาจทำให้เกิดความคาดเคลื่อน ไส้กรอกอาจจะไม่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกันตามที่ตั้งสมมติฐานเพื่อนำไปใช้ในการทำนายค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ได้จากการคำนวณอาจเกิดความคาดเคลื่อนจากค่าที่แท้จริง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการทำนายเวลาแช่เยือกแข็งของไส้กรอก โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข แบบ Finite element เข้ามาคำนวณร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (โปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.1) ศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไส้กรอก 1.64 ± 0.03 , 1.97 ± 0.02 และ 2.68 ± 0.04 เซนติเมตร ,วิธีการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า และเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า พบว่าอุณหภูมิที่ทำนายได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยที่สุดเท่ากับ 5.79% ซึ่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.78 (เส้นผ่านศูนย์กลางของไส้กรอก 2.68 ± 0.04 , แช่เยือกแข็งไส้กรอกด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า) และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 11.75% ซึ่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5.21 (เส้นผ่านศูนย์กลางของไส้กรอก 1.97 ± 0.02 , แช่เยือกแข็งไส้กรอกด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า) ซึ่งสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ไปพัฒนาต่อในการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งกับผลิตภัณฑ์อาหารชนิดอื่น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำนายเวลาแช่เยือกแข็ง ค่าสมบัติทางความร้อนของอาหาร คือ ค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนจำเพาะ ถ้ามีการทดลองหาค่าจริงนำมาใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็必将มีความแม่นยำมากขึ้น

5.2.2 อุณหภูมิของเครื่องแช่เยือกแข็งไม่ได้มีค่าคงที่ตลอดเวลา ถ้าสามารถใส่ค่าอุณหภูมิของเครื่องแช่เยือกแข็ง ณ เวลาใด ๆ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ก็必将มีความแม่นยำมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กรมอนามัย., 2544. ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย. 46.

ASHRAE, 2006. **Handbook - Refrigeration.**

Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., 1959. **Conduction of Heat in Solids**, 2nd edition.

Chang, H.D. and Tao, L.C., 1981. **Correlations of enthalpies of food systems.**

Journal of food Science. 46, 1493-1497.

Choi, Y. and Okos, M.R., 1986. **Effects of temperature and composition on thermal properties of foods.** Journal of Food Process and Applications. 1(1), 93-101.

Cogne, C., Nguyen, P.U., Lanoiselle, J.L., Hecke, E.V. and Clause, D., 2013. **Modeling heat and mass transfer during vacuum freezing of puree droplet.**

International Journal of Refrigeration. 36, 1319-1326.

Ferreira, S.R., Rojas, L.O.A., Souza, D.F.S. and Oliveira, J.A., 2016. **Freezing time of an infinite cylinder and sphere using the method of lines.** International

Journal of Refrigeration. 68, 37-49.

Frank, P.I. and David, P.D., 2007. **Fundamentals of heat and mass transfer**, 6th edition SI Version, John Wiley & Son.

Joshi, C., & Tao, L. C., 1974. **A numerical method of simulating the axisymmetrical freezing of food systems.** Journal of Food Science. 39, 623-626.

Logan, D.L., 2012. **A first course in the finite element method**, 5th edition.

Murakami, E.G. and Okos, M.R., 1989. **Measurement and prediction of thermal properties of foods.** Food Properties and Computer Aided Engineering of

Food Processing Systems. 3-48.

Nagaoka, J., Takagi, S., hotani, S., 1956. **Experiments on the freezing of fish by air**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- blast freezer.** Journal of Tokyo University of Fisheries. 42(1), 65-73.
- Pham, Q.T., 2013. **Freezing time formulas for foods with low moisture content, low freezing point and for cryogenic freezing.** Journal of Food Engineering. 127, 85-92.
- Plank, R., 1941. **Beitrage zur Berechrung und Bewertung der Gefrigeschwindigkeit von Lebensmittelm** zeitschrift fur die gesamte kalte Industrie. Beih Rcihe. 3(10), 1-16.
- Reidy, G.A., 1968. **Thermal properties of foods and methods of their determination.** M.S. Thesis, Food Science Department, Michigan State university, East Lansing.
- Saiwarun, C., Kalaya, L. and Ommee, K., 2001. **Freezing Time Prediction for Cuttlefish.** ScienceAsia. 27, 221-226.
- Santos, M.V., Vampa, V., Califano, A. and Zaritzky, N., 2010. **Numerical simulations of chilling and freezing processes applied to bakery products in irregularly 3D geometries.** Journal of Food Engineering. 100, 32-42.
- Sanz P.D., Dominguez M. and Mascheroni R.H., 1989. **Equations for the predictions of Thermophysical properties of meat products.** Larin American Applied Research. 19, 155-160.
- Singh, R.P. and Heldman, D.R., 2014. **Introduction to Food Engineering.** 521-563.
- Sun, D.W. and Zhu, X., 1999. **Effect of heat transfer direction on the numerical prediction of beef freezing processes.** Journal of Food Engineering. 42, 45-50.
- Tocci, A.M. and Mascheroni, R.H., 1995. **Numerical models for the simulation of the simultaneous heat and mass transfer during food freezing and**

storage. International Communications in Heat and Mass Transfer. 22,
251-260.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้ในการทดลอง

ชั้นที่	D ₁	D ₂	D ₃
1	1.65	1.96	2.68
2	1.64	2.00	2.72
3	1.66	1.98	2.65
4	1.60	1.99	2.78
5	1.68	2.00	2.66
6	1.61	1.96	2.70
7	1.65	1.97	2.68
8	1.61	1.99	2.64
9	1.67	1.97	2.73
10	1.63	1.99	2.69
11	1.60	2.00	2.69
12	1.63	1.92	2.70
13	1.65	1.99	2.70
14	1.61	1.97	2.63
15	1.64	1.96	2.66
16	1.65	1.94	2.65
17	1.68	1.96	2.61
18	1.60	1.96	2.67
19	1.68	1.96	2.70
20	1.61	1.95	2.70
21	1.64	2.00	2.70
ค่าเฉลี่ย	1.64	1.97	2.68
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.03	0.02	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2ก อุณหภูมิของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก ณ เวลาใด ๆ ที่ทดลองกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า ครั้งที่ 1

เวลา (วินาที)	T_{∞} (°C)	T (°C)	T_i (°C)	$T-T_{\infty}$	T_i-T_{∞}	$T-T_{\infty}/T_i-T_{\infty}$	$\ln(T-T_{\infty}/T_i-T_{\infty})$
0	29.60	44.17	44.17	14.57	14.57	1.00	0.00
300	-12.90	36.97	44.17	49.87	57.07	0.87	-0.13
600	-18.80	28.79	44.17	47.59	62.97	0.76	-0.28
900	-20.10	21.92	44.17	42.02	64.27	0.65	-0.42
1200	-20.50	16.15	44.17	36.65	64.67	0.57	-0.57
1500	-20.70	11.18	44.17	31.88	64.87	0.49	-0.71
1800	-20.80	6.94	44.17	27.74	64.97	0.43	-0.85
2100	-20.90	3.31	44.17	24.21	65.07	0.37	-0.99
2400	-21.10	0.18	44.17	21.28	65.27	0.33	-1.12
2700	-21.20	-2.49	44.17	18.72	65.37	0.29	-1.25
3000	-21.30	-4.92	44.17	16.38	65.47	0.25	-1.39
3300	-21.30	-6.91	44.17	14.39	65.47	0.22	-1.52
3600	-21.40	-8.69	44.17	12.71	65.57	0.19	-1.64
3900	-21.50	-10.24	44.17	11.26	65.67	0.17	-1.76
4200	-21.50	-11.58	44.17	9.92	65.67	0.15	-1.89
4500	-21.50	-12.84	44.17	8.66	65.67	0.13	-2.03
4800	-21.50	-13.86	44.17	7.64	65.67	0.12	-2.15
5100	-21.60	-14.77	44.17	6.83	65.77	0.10	-2.26
5400	-21.60	-15.66	44.17	5.94	65.77	0.09	-2.40
5700	-21.70	-16.42	44.17	5.28	65.87	0.08	-2.52
6000	-21.70	-17.02	44.17	4.68	65.87	0.07	-2.64
6300	-21.80	-17.62	44.17	4.18	65.97	0.06	-2.76
6600	-21.80	-18.10	44.17	3.70	65.97	0.06	-2.88
6900	-21.90	-18.53	44.17	3.38	66.07	0.05	-2.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3ก อุณหภูมิของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก ณ เวลาใด ๆ ที่ทดลองกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า ครั้งที่ 2

เวลา (วินาที)	T_{∞} (°C)	T (°C)	T_i (°C)	$T-T_{\infty}$	T_i-T_{∞}	$T-T_{\infty}/T_i-T_{\infty}$	$\ln(T-T_{\infty}/T_i-T_{\infty})$
0	29.10	45.53	45.53	16.43	16.43	1.00	0.00
300	-10.60	35.19	45.53	45.79	56.13	0.82	-0.20
600	-16.20	26.26	45.53	42.46	61.73	0.69	-0.37
900	-17.90	18.89	45.53	36.79	63.43	0.58	-0.54
1200	-19.20	12.84	45.53	32.04	64.73	0.49	-0.70
1500	-20.10	7.71	45.53	27.81	65.63	0.42	-0.86
1800	-21.00	3.43	45.53	24.43	66.53	0.37	-1.00
2100	-21.20	-0.15	45.53	21.05	66.73	0.32	-1.15
2400	-21.70	-3.20	45.53	18.50	67.23	0.28	-1.29
2700	-21.70	-5.69	45.53	16.01	67.23	0.24	-1.44
3000	-21.80	-7.87	45.53	13.93	67.33	0.21	-1.58
3300	-21.90	-10.17	45.53	11.73	67.43	0.17	-1.75
3600	-22.00	-11.79	45.53	10.22	67.53	0.15	-1.89
3900	-22.20	-13.20	45.53	9.01	67.73	0.13	-2.02
4200	-22.20	-14.47	45.53	7.73	67.73	0.11	-2.17
4500	-22.40	-15.52	45.53	6.88	67.93	0.10	-2.29
4800	-22.40	-16.41	45.53	5.99	67.93	0.09	-2.43
5100	-22.40	-17.32	45.53	5.08	67.93	0.07	-2.59
5400	-22.40	-17.99	45.53	4.41	67.93	0.06	-2.73
5700	-22.60	-18.63	45.53	3.97	68.13	0.06	-2.84
6000	-22.60	-19.24	45.53	3.36	68.13	0.05	-3.01
6300	-22.60	-19.65	45.53	2.95	68.13	0.04	-3.14
6600	-22.20	-20.03	45.53	2.18	67.73	0.03	-3.44
6900	-21.80	-20.26	45.53	1.54	67.33	0.02	-3.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4ก อุณหภูมิของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก ณ เวลาใด ๆ ที่ทดลองกับเครื่องแช่เยือก
แข็งแบบลมเป่า ครั้งที่ 1

เวลา (วินาที)	T_{∞} (°C)	T (°C)	T_i (°C)	$T-T_{\infty}$	T_i-T_{∞}	$T-T_{\infty}/T_i-T_{\infty}$	$\ln(T-T_{\infty}/T_i-T_{\infty})$
0	-0.50	45.76	45.76	46.26	46.26	1.00	0.00
30	-10.50	42.42	45.76	52.92	56.26	0.94	-0.06
60	-16.60	39.45	45.76	56.05	62.36	0.90	-0.11
90	-20.70	35.68	45.76	56.38	66.46	0.85	-0.16
120	-23.70	31.83	45.76	55.53	69.46	0.80	-0.22
150	-26.00	28.01	45.76	54.01	71.76	0.75	-0.28
180	-27.90	24.40	45.76	52.30	73.66	0.71	-0.34
210	-29.50	20.69	45.76	50.19	75.26	0.67	-0.41
240	-31.00	17.10	45.76	48.10	76.76	0.63	-0.47
270	-32.10	13.73	45.76	45.83	77.86	0.59	-0.53
300	-33.30	10.36	45.76	43.66	79.06	0.55	-0.59
330	-34.30	7.14	45.76	41.44	80.06	0.52	-0.66
360	-35.30	4.11	45.76	39.41	81.06	0.49	-0.72
390	-36.00	1.16	45.76	37.16	81.76	0.45	-0.79
420	-36.80	-1.74	45.76	35.06	82.56	0.42	-0.86
450	-37.40	-4.48	45.76	32.92	83.16	0.40	-0.93
480	-38.20	-7.01	45.76	31.19	83.96	0.37	-0.99
510	-38.50	-9.59	45.76	28.91	84.26	0.34	-1.07
540	-38.10	-12.02	45.76	26.08	83.86	0.31	-1.17
570	-37.70	-14.25	45.76	23.45	83.46	0.28	-1.27
600	-37.10	-16.41	45.76	20.69	82.86	0.25	-1.39
630	-36.60	-18.28	45.76	18.32	82.36	0.22	-1.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5ก อุณหภูมิของแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก ณ เวลาใด ๆ ที่ทดลองกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า ครั้งที่ 2

เวลา (วินาที)	T_{∞} (°C)	T (°C)	T_i (°C)	$T-T_{\infty}$	T_i-T_{∞}	$T-T_{\infty}/T_i-T_{\infty}$	$\ln(T-T_{\infty}/T_i-T_{\infty})$
0	-24.90	60.40	60.40	85.30	85.30	1.00	0.00
30	-26.80	52.92	60.40	79.72	87.20	0.91	-0.09
60	-28.20	45.73	60.40	73.93	88.60	0.83	-0.18
90	-29.50	39.06	60.40	68.56	89.90	0.76	-0.27
120	-30.80	35.04	60.40	65.84	91.20	0.72	-0.33
150	-31.70	28.89	60.40	60.59	92.10	0.66	-0.42
180	-32.80	22.83	60.40	55.63	93.20	0.60	-0.52
210	-33.40	17.39	60.40	50.79	93.80	0.54	-0.61
240	-34.20	12.84	60.40	47.04	94.60	0.50	-0.70
270	-34.80	8.62	60.40	43.42	95.20	0.46	-0.78
300	-35.40	5.40	60.40	40.80	95.80	0.43	-0.85
330	-36.00	3.23	60.40	39.23	96.40	0.41	-0.90
360	-36.40	0.95	60.40	37.36	96.80	0.39	-0.95
390	-37.10	-1.33	60.40	35.77	97.50	0.37	-1.00
420	-37.40	-3.47	60.40	33.93	97.80	0.35	-1.06
450	-37.90	-5.36	60.40	32.54	98.30	0.33	-1.11
480	-37.80	-7.32	60.40	30.48	98.20	0.31	-1.17
510	-37.20	-9.15	60.40	28.05	97.60	0.29	-1.25
540	-36.60	-10.93	60.40	25.68	97.00	0.26	-1.33
570	-35.90	-12.53	60.40	23.37	96.30	0.24	-1.42
600	-35.40	-14.11	60.40	21.29	95.80	0.22	-1.50
630	-34.90	-15.53	60.40	19.37	95.30	0.20	-1.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6ก เวลาในการแช่เยือกแข็งไส้กรอกทั้ง 3 ขนาดกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไม่มีลมเป่า

เวลา (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)		
	1.64±0.03	1.97±0.02	2.68±0.04
0.00	20.03	20.38	20.09
7.50	7.72	9.71	13.33
15.00	-2.42	1.42	6.25
22.50	-4.25	-3.76	-0.34
30.00	-4.46	-3.89	-3.85
37.50	-4.56	-4.14	-4.89
45.00	-4.67	-4.54	-5.08
52.50	-5.02	-5.00	-5.28
60.00	-6.35	-5.57	-5.47
67.50	-8.04	-6.19	-5.67
75.00	-9.59	-7.14	-5.86
82.50	-10.99	-8.36	-6.06
90.00	-12.18	-9.71	-6.25
97.50	-13.04	-10.99	-7.06
105.00	-13.84	-12.17	-7.68
112.50	-14.58	-13.32	-8.57
120.00	-15.29	-14.40	-9.63
127.50	-15.93	-15.38	-10.85
135.00	-16.57	-16.30	-12.12
142.50	-17.14	-17.09	-13.44
150.00	-17.72	-17.68	-14.43
157.50			-15.22
165.00			-15.99
172.50			-16.76
180.00			-17.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

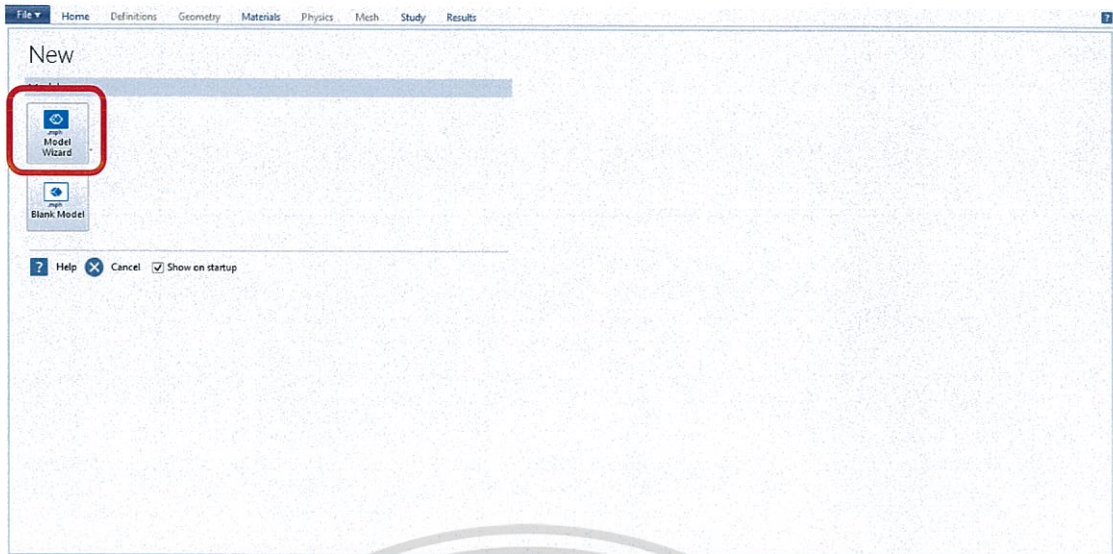
ตารางที่ 7ก เวลาในการแช่เยือกแข็งไส้กรอกทั้ง 3 ขนาดกับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า

เวลา (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)		
	1.64±0.03	1.97±0.02	2.68±0.04
0.00	20.26	19.13	20.80
1.00	15.79	17.53	20.60
2.00	10.38	14.16	17.65
3.00	4.45	9.36	14.14
4.00	-1.35	3.55	9.36
5.00	-3.61	-1.84	6.13
6.00	-4.28	-3.98	3.08
7.00	-4.31	-4.50	-0.71
8.00	-4.14	-4.61	-2.63
9.00	-4.15	-4.72	-3.46
10.00	-4.28	-4.84	-3.55
11.00	-4.44	-4.95	-3.60
12.00	-4.70	-5.06	-3.91
13.00	-5.53	-5.17	-4.15
14.00	-8.29	-5.34	-4.31
15.00	-11.33	-5.51	-4.54
16.00	-14.72	-7.15	-4.67
17.00	-18.28	-9.56	-4.63
18.00		-12.46	-4.66
19.00		-15.29	-4.73
20.00		-18.43	-4.81
21.00			-4.96
22.00			-5.32
23.00			-5.94
24.00			-8.81
25.00			-13.49
26.00			-15.27
27.00			-17.17
28.00			-19.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

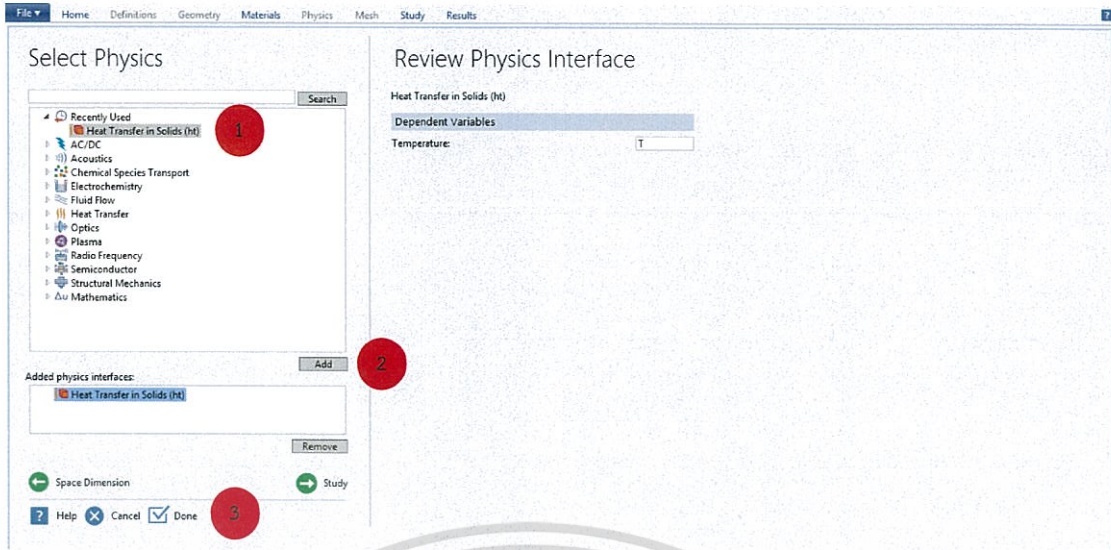


รูปที่ 1 เลือก Model wizard

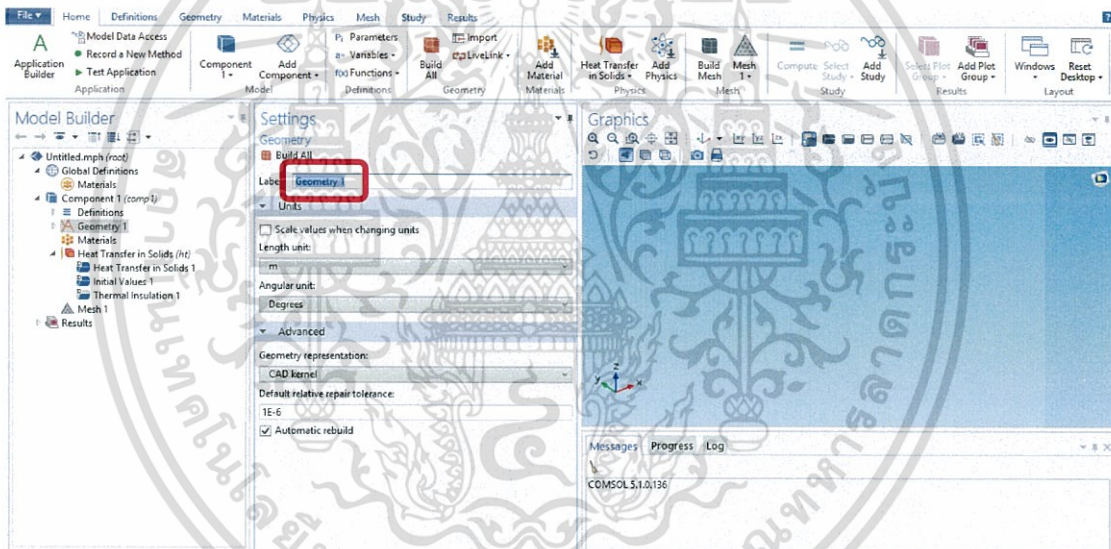


รูปที่ 2 เลือก 3D > Done

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

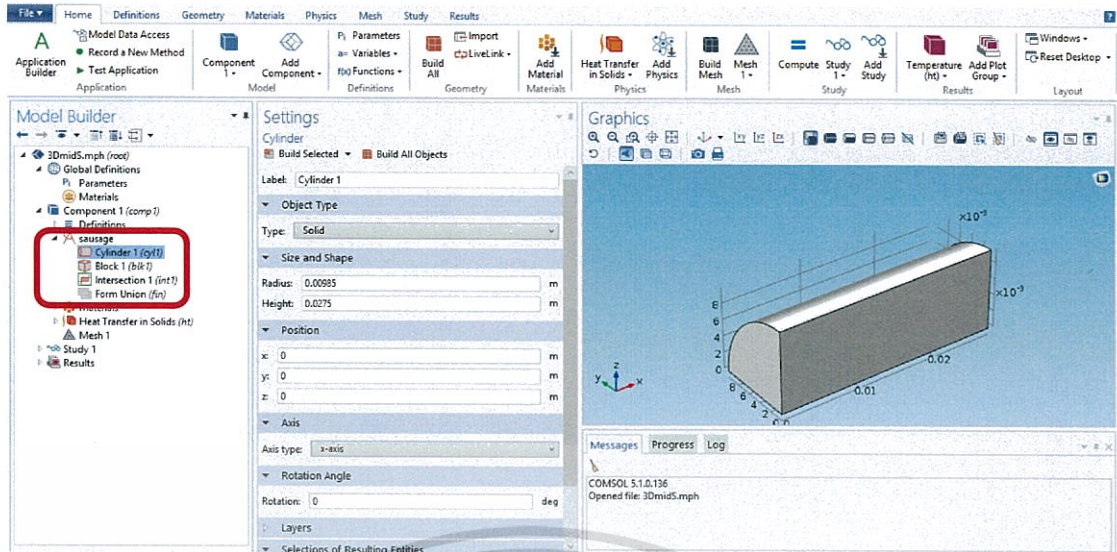


รูปที่ 3 เลือก Heat Transfer in Solids (ht) > Add > Done

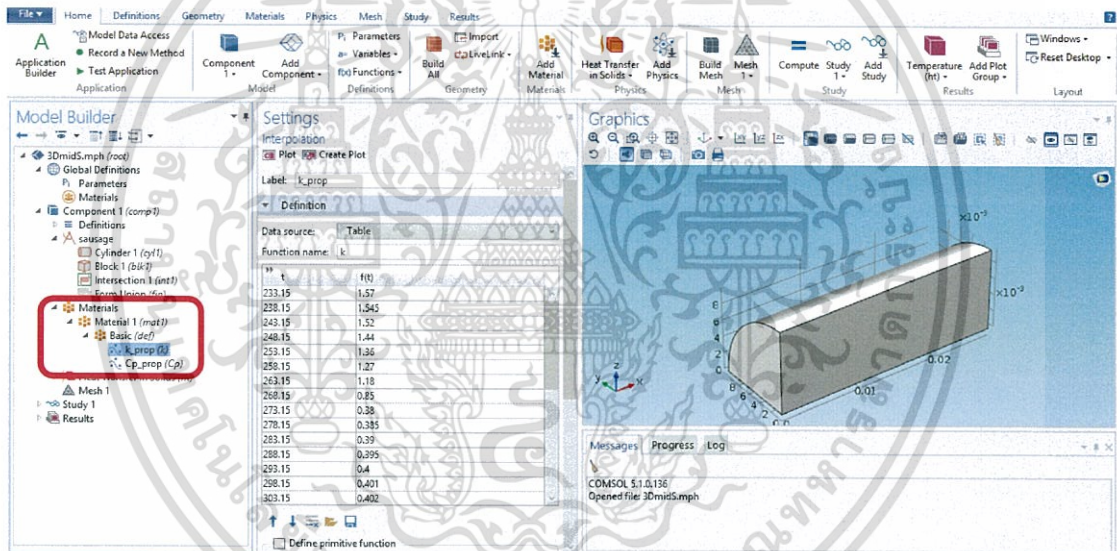


รูปที่ 4 ตั้งชื่อรูปทรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

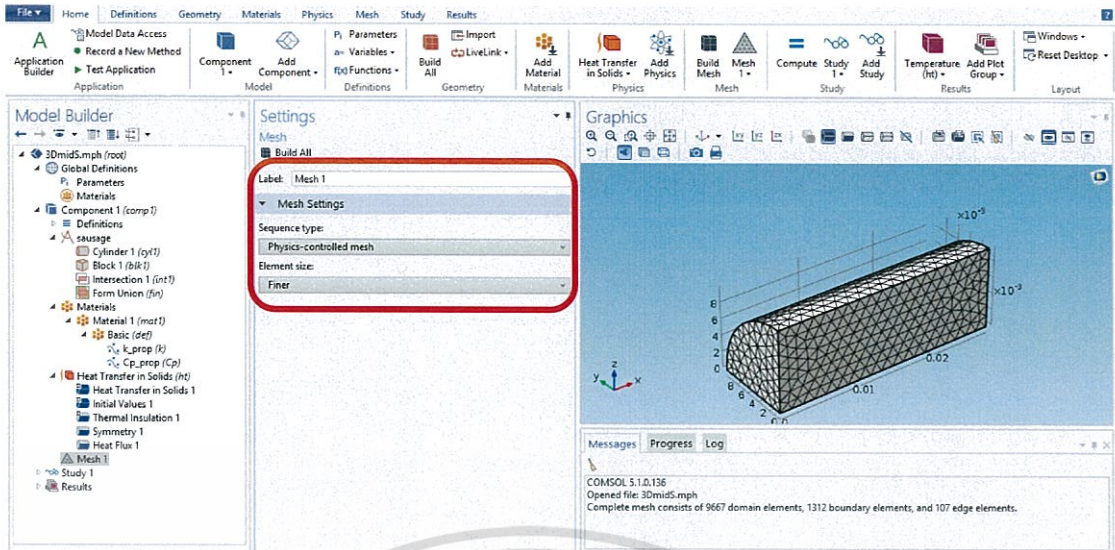


รูปที่ 5 ใส่ขนาดของไส้กรอก

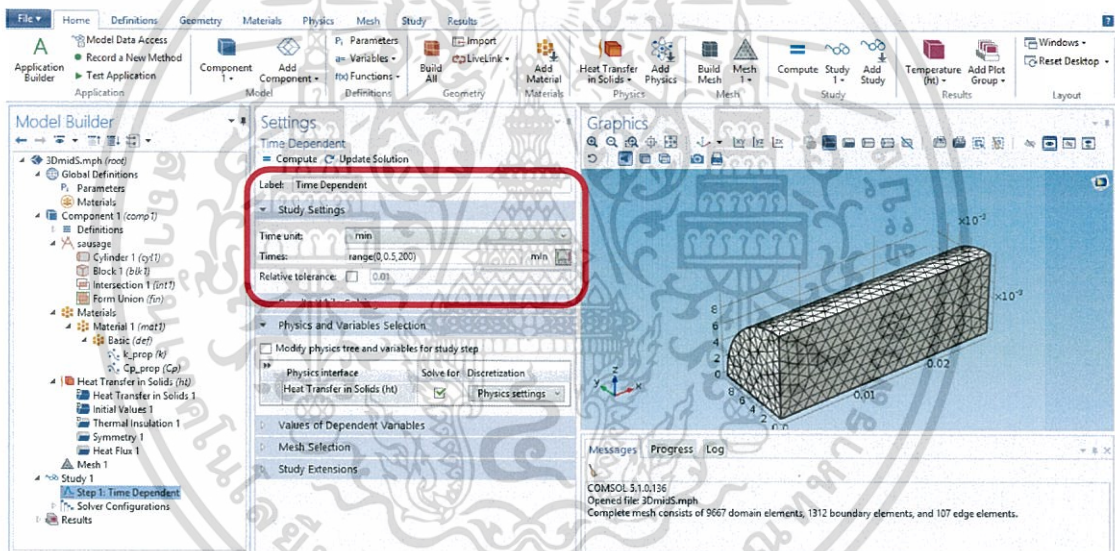


รูปที่ 6 ใส่ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของไส้กรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

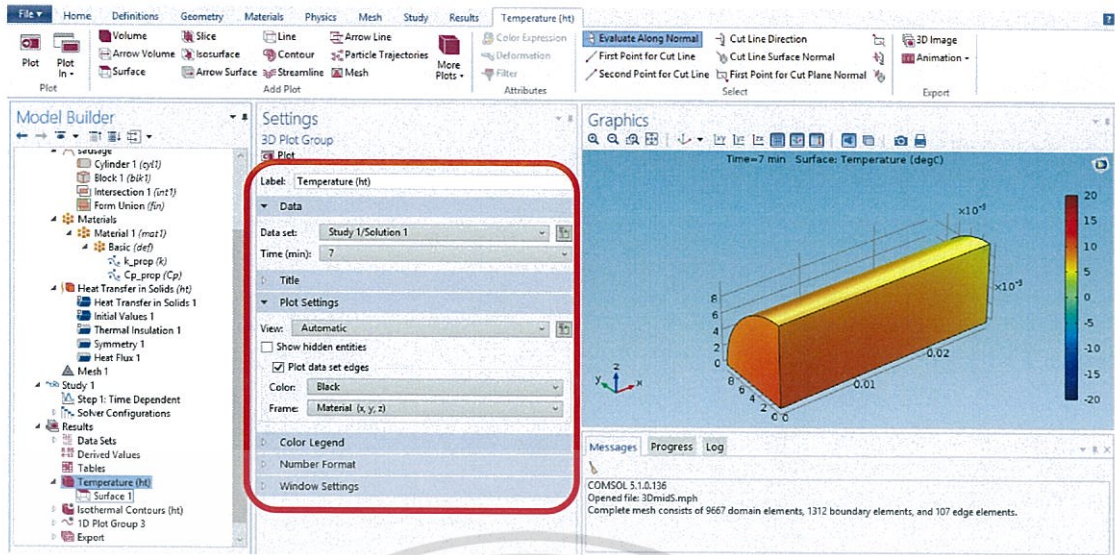


รูปที่ 7 แบ่งตัวอย่างเป็นชิ้นส่วนย่อย

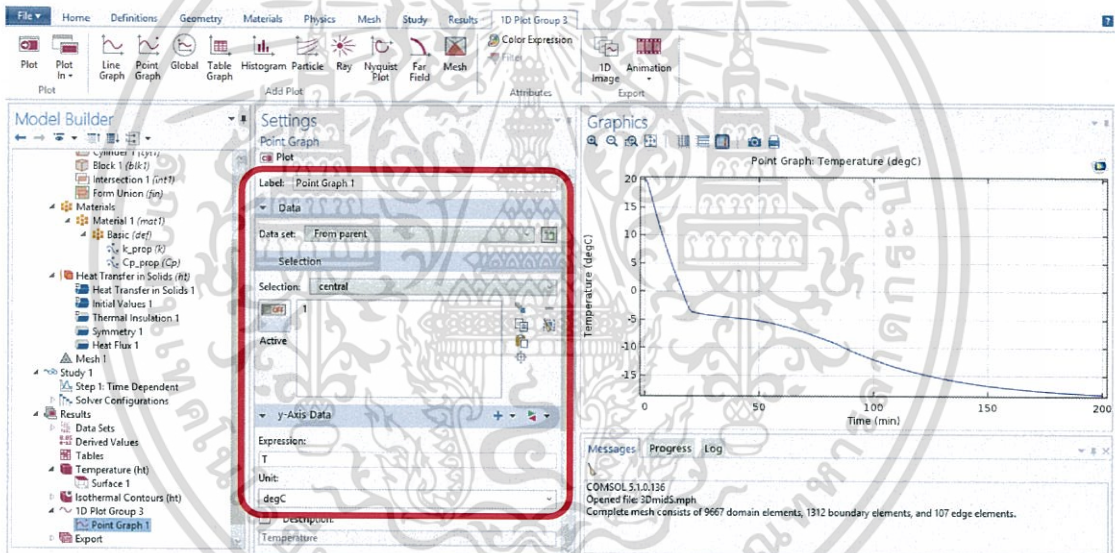


รูปที่ 8 ใส่เวลาที่วนรอบและเวลาทั้งหมดที่ต้องการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 ระดับสีแสดงอุณหภูมิของไส้กรอกที่คำนวณได้ ณ เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 10 ผลของอุณหภูมิของไส้กรอกที่คำนวณได้ ณ เวลาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้