



## รายงานสหกิจศึกษา

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ

COMPUTER SIMULATION PREDICTION OF VACUUM FREEZING TIME

นางสาวณัฐวรรณ พลอยมุกดา

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายเวลาการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นางสาวณัฐวรรณ พลอยมุกดา

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ รุ่งพระแสง

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน คุณวรท ลำเลิศพงศ์พนา

สถานประกอบการ บริษัท ไอ.ที.ซี. (1993) จำกัด

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการใช้วิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆใน  
เตงกวางในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งและทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง โดยอาศัยแบบจำลองการ  
ถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติในสภาวะไม่คงตัวและสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เพื่อให้การ  
ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น เปรียบเทียบกับการทดลองการแช่เยือกแข็งแบบ  
สุญญากาศโดยใช้เตงกวางความหนา 1, 1.3, 1.6 และ 2.5 เซนติเมตร การทำนายเวลาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์  
มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด -4.35, 44.87, 0.04 และ 58.13 % ตามลำดับ

คำสำคัญ : การทำนายเวลาการแช่เยือกแข็ง สมบัติทางความร้อน สมการการนำความร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

**Cooperative Title:** Computer simulation prediction of vacuum freezing time

**Student intern name:** Miss Natthawan Ploymugda

**Faculty:** Engineering      **Department:** Food engineer

**Advisor name:** Asst. Prof. Dr. Kiattisak Roonprasank

**Mentor name:** Mr. Warot Lamlertpongpana

**Company:** I.T.C. (1993) COMPANY LIMITED

## ABSTRACT

This research project presents the use of numerical methods by computer program to predict temperatures at various points in cucumbers during the freezing process and to predict the time used for freezing. By using a 1 dimensional heat transfer model in unstable conditions and thermal properties that change with temperature To make prediction of the freezing time more convenient and faster Compared with the vacuum freezing experiment using cucumbers of 1, 1.3, 1.6 and 2.5 cm. Thickness, the computer time prediction has the error percentage of -4.35, 44.87, 0.04 and 58.13 % respectively.

**Keywords :** prediction freezing time, thermal properties, heat conduction equation, mathematical model

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ รุ่งพระแสง ผู้ซึ่งให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาตั้งแต่แรกเริ่มจนโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึงแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆในระหว่างการทำโครงการ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณบริษัท ไอ.ที.ซี. (1993) จำกัด ที่มอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้เข้าไปศึกษาหาความรู้ และให้ประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาการปฏิบัติงาน สหกิจศึกษา

ขอขอบพระคุณ นายวรท ล้ำเลิศพงศ์พนา วิศวกรผู้ดูแลระหว่างการปฏิบัติงานสหกิจศึกษา ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการจัดทำโครงการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้คำแนะนำแก่ข้าพเจ้า รวมถึงเพื่อนๆนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกคนที่ให้ความสนใจและให้คำปรึกษาจนโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ผู้จัดทำ

## สารบัญ

|                                                    | หน้า |
|----------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                               | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                            | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....                               | III  |
| สารบัญ.....                                        | IV   |
| สารบัญตาราง.....                                   | VII  |
| สารบัญรูป.....                                     | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....                    | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                   | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                         | 2    |
| 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....                     | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                 | 3    |
| บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4    |
| 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                        | 4    |
| 2.1.1 การแช่เยือกแข็ง.....                         | 4    |
| 2.1.2 สมบัติของอาหาร.....                          | 6    |
| 2.1.3 การถ่ายเทความร้อน.....                       | 13   |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                     | 15   |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....                    | 19   |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                                         | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.1 โปรแกรมทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ.....                                   | 19   |
| 3.2 การทดลอง.....                                                                       | 23   |
| 3.2.1 วัตถุประสงค์.....                                                                 | 23   |
| 3.2.2 วิธีการทดลอง.....                                                                 | 23   |
| 3.3 การคำนวณ.....                                                                       | 24   |
| 3.3.1 การคำนวณความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน และค่าความจุความร้อน<br>จำเพาะของแตงกวา..... | 24   |
| 3.3.2 การคำนวณค่าความผิดพลาดจากการทำนาย.....                                            | 25   |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....                                             | 26   |
| 4.1 ผลการแช่เยือกแข็ง.....                                                              | 26   |
| 4.2 การทำนายเวลาแช่เยือกแข็งด้วย MATLAB.....                                            | 28   |
| 4.3 ค่าความผิดพลาดจากการทำนาย.....                                                      | 31   |
| 4.4 การคำนวณค่าไฟฟ้า.....                                                               | 32   |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....                                                | 33   |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....                                                                 | 33   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....                                                                     | 33   |
| เอกสารอ้างอิง.....                                                                      | 34   |
| ภาคผนวก                                                                                 |      |

ภาคผนวก ก การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำนายเวลาที่ใช้ในการแข่งเยือกแข็งแตงกวาแบบ  
สุญญากาศ

ภาคผนวก ข ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง



## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                          | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน (สิงหาคม 2562 – มกราคม 2563).....                                                         | 2    |
| 2.1 สมการประมาณค่าความหนาแน่นขององค์ประกอบหลักในอาหารซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิช่วง<br>-40 °C ถึง 150 °C.....    | 7    |
| 2.2 สมการประมาณค่าการนำความร้อนขององค์ประกอบหลักในอาหารซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิช่วง<br>-40 °C ถึง 150 °C.....  | 8    |
| 2.3 สมการประมาณค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบหลักในอาหารซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิช่วง<br>-40 °C ถึง 150 °C..... | 9    |
| 4.1 การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งแตงกวาแบบสุญญากาศด้วยวิธีต่างๆ.....                                              | 31   |
| 4.2 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งแตงกวาแบบสุญญากาศด้วย<br>โปรแกรม MATLAB.....            | 32   |
| 4.3 การคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งจากการทดลอง.....                                                       | 32   |
| 4.4 การประมาณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งจากการทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง.....                           | 32   |

## สารบัญรูป

| รูปที่                                                                                                  | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 กระบวนการแช่เยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์.....                                                           | 4    |
| 2.2 การแบ่งพื้นที่ในวิธีเชิงเลข.....                                                                    | 6    |
| 2.3 ความหนาแน่นของสโตรเบอร์รี่ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ.....                                          | 7    |
| 2.4 การทำนายค่าการนำความร้อนของนม น้ำผลไม้ และไส้กรอกซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ.....                   | 9    |
| 2.5 ความร้อนจำเพาะปรากฏของเซอร์รี่หวานซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ.....                                  | 11   |
| 2.6 กราฟแช่เยือกแข็งน้ำบริสุทธิ์และสารละลายในน้ำ.....                                                   | 12   |
| 2.7 สัดส่วนมวลน้ำแข็งของอาหารที่มีจุดเยือกแข็งต่างกัน 0.5 เคลวิน.....                                   | 13   |
| 2.8 การนำความร้อนในสถานะสม่ำเสมอในผนัง.....                                                             | 14   |
| 2.9 แบบจำลองรูปร่างของชิ้นส่วนย่อยที่ถูกแบ่งเพื่อใช้คำนวณในวิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite element method..... | 16   |
| 2.10 การทำนายอุณหภูมิที่เวลาต่างๆระหว่างการแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับผลการทดลอง.....                    | 17   |
| 2.11 เปรียบเทียบเวลาการแช่เยือกแข็งจากการทดลองกับการทำนายด้วยวิธีเชิงตัวเลข แพลงค์ และแพม.....          | 17   |
| 3.1 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของแตงกวา.....                                                             | 20   |
| 3.2 แผนผังการทำนายเวลาแช่เยือกแข็งด้วยโปรแกรม MATLAB.....                                               | 21   |
| 3.3 การทดลองแช่เยือกแข็งแตงกวา.....                                                                     | 23   |
| 3.4 แบบจำลองการทดลองแช่เยือกแข็งแตงกวา.....                                                             | 24   |
| 3.5 ความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะปรากฏของแตงกวา.....                             | 25   |
| 4.1 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศแตงกวาความหนา 1 เซนติเมตร.....                | 26   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                                     | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.2 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศต่ำกว่าความหนา 1.3 เซนติเมตร.....                | 26   |
| 4.3 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศต่ำกว่าความหนา 1.6 เซนติเมตร.....                | 27   |
| 4.4 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศต่ำกว่าความหนา 2.5 เซนติเมตร.....                | 27   |
| 4.5 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศต่ำกว่าความหนาต่างๆ.....                         | 28   |
| 4.6 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาจากการทดลองและการทำนายในการแช่เยือกแข็งต่ำกว่า<br>ความหนา 1 เซนติเมตร.....   | 28   |
| 4.7 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาจากการทดลองและการทำนายในการแช่เยือกแข็งต่ำกว่า<br>ความหนา 1.3 เซนติเมตร..... | 29   |
| 4.8 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาจากการทดลองและการทำนายในการแช่เยือกแข็งต่ำกว่า<br>ความหนา 1.6 เซนติเมตร..... | 29   |
| 4.9 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาจากการทดลองและการทำนายในการแช่เยือกแข็งต่ำกว่า<br>ความหนา 2.5 เซนติเมตร..... | 30   |
| 4.10 กราฟแสดงเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศต่ำกว่าที่ความหนาต่างๆที่ได้จากการ<br>คำนวณและการทดลอง.....   | 30   |
| 4.11 กราฟเวลาที่ทำนายในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศต่ำกว่าที่ความหนาต่างๆ.....                               | 31   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การแช่เยือกแข็ง เป็นกรรมวิธีหนึ่งในการแปรรูปอาหารเพื่อถนอมอาหาร โดยที่ยังคงความสด และรักษาคุณภาพของอาหารไว้ และสามารถเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง โดยพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำกัดรูปแบบ ทำให้กระจายสินค้าได้กว้างขวาง

การแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ เป็นหนึ่งในกรรมวิธีการแช่เยือกแข็งอาหาร โดยการลดความดันให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศขณะทำการแช่เยือกแข็ง ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการแช่เยือกแข็งเร็วกว่าการแช่เยือกแข็งที่บรรยากาศ โดยกระบวนการแช่เยือกแข็งเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของอาหาร อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของตัวกลาง ขนาดและรูปร่างของอาหาร และสมบัติทางความร้อนของอาหารล้วนส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งอาหาร การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งจึงเป็นขั้นตอนเริ่มต้นในการออกแบบกระบวนการผลิต

การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งสามารถคำนวณได้หลายวิธี ทั้งการใช้วิธีเชิงสังเคราะห์ (Analytical formulas) เช่นสมการของ Plank เป็นต้น หรือใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) เช่น Finite difference method (FDM), Finite volume method (FVM) และ Finite element method (FEM) เป็นต้น

วิธีเชิงเลข คือวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นำมาประยุกต์เพื่อใช้ในการคำนวณแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ซึ่งการคำนวณด้วยวิธีนี้จะได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ เนื่องจากการทำนายเวลาด้วยการคำนวณเองทำให้พบปัญหายุ่งยากเช่นการหาสมบัติของอาหาร ค่าสมบัติทางความร้อนต่างๆ เป็นต้น จึงต้องใช้เวลาในการคำนวณหรืออาจเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ การทำโปรแกรมสำหรับทำนายเวลาจึงช่วยให้สะดวก และรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอโปรแกรมทำนายเวลาการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศแทนกว่าโดยใช้โปรแกรม MATLAB ที่สะดวกสำหรับการคำนวณวิธีเชิงเลข

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบโปรแกรมคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศของแตงกวาที่ความหนาต่างๆ

1.2.2 เพื่อทดสอบความแม่นยำของวิธีเชิงเลขที่นำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศของแตงกวา

1.2.3 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศของอาหารชนิดอื่น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองคือแตงกวา แช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ Kryo'D Freezer jeew

1.3.2 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ และไม่คำนึงถึงการพาความร้อน

1.3.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ คือ MATLAB

## 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน (สิงหาคม 2562 – มกราคม 2563)

| ขั้นตอนการดำเนินงาน                                                                     | 2562 |      |      |      |      | 2563 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                                                                                         | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. |
| 1.4.1 ประชุมกับบริษัทเพื่อกำหนดหัวข้อและขอบเขตงาน                                       |      |      |      |      |      |      |
| 1.4.2 ศึกษาการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ                                                   |      |      |      |      |      |      |
| 1.4.3 ศึกษาการทำนายเวลาโดยวิธีเชิงสังเคราะห์                                            |      |      |      |      |      |      |
| 1.4.4 ศึกษาการทำนายเวลาโดยวิธีเชิงตัวเลข                                                |      |      |      |      |      |      |
| 1.4.5 นำเสนอความคืบหน้ากับผู้นิเทศงานครั้งที่ 1                                         |      |      |      |      |      |      |
| 1.4.6 นำเสนอเค้าโครงงานสหกิจศึกษากับภาควิชา                                             |      |      |      |      |      |      |
| 1.4.7 ศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB                                                         |      |      |      |      |      |      |
| 1.4.8 นำเสนอความคืบหน้ากับผู้นิเทศงานครั้งที่ 2                                         |      |      |      |      |      |      |
| 1.4.9 ออกแบบโปรแกรมทำนายเวลาโดยใช้โปรแกรม MATLAB                                        |      |      |      |      |      |      |
| 1.4.10 นำเสนอความคืบหน้ากับผู้นิเทศงานครั้งที่ 3                                        |      |      |      |      |      |      |
| 1.4.11 ทดลองแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศแตงกวาที่ความหนาต่างๆด้วยเครื่อง Kryo'D Freezer jeew |      |      |      |      |      |      |
| 1.4.12 ทดลองใช้งานโปรแกรม                                                               |      |      |      |      |      |      |

|                                          |  |  |  |  |  |  |
|------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| 1.4.13 ปรับปรุงโปรแกรม                   |  |  |  |  |  |  |
| 1.4.14 นำเสนอโครงการสหกิจศึกษากับภาควิชา |  |  |  |  |  |  |
| 1.4.15 เขียนรายงาน                       |  |  |  |  |  |  |

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 โปรแกรมสามารถทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศของแตงกวาที่มีความหนาต่างๆ ได้  
อย่างสะดวกและรวดเร็ว

1.5.2 โปรแกรมสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายเวลาการแช่เยือกแข็งของอาหารชนิดอื่น



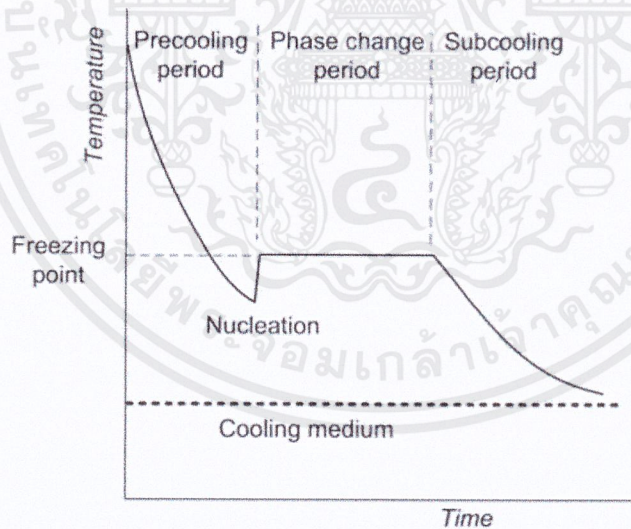
## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 การแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งเป็นกรรมวิธีการแปรรูปอาหารด้วยการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำลงถึง -18 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาคุณภาพอาหารด้วยการยับยั้งปฏิกิริยาจากจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมเสียของอาหาร โดยกระบวนการแช่เยือกแข็งนั้นช่วงแรกเป็นช่วงก่อนแช่เยือกแข็ง เป็นการลดอุณหภูมิอาหารจากอุณหภูมิเริ่มต้นสู่อุณหภูมิจุดเยือกแข็งของอาหาร เกิดผลึกน้ำแข็งในอาหาร ช่วงที่สองคือช่วงการแช่เยือกแข็ง เป็นช่วงกำจัดความร้อนแฝงเพื่อให้น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง และช่วงที่สามเป็นการลดอุณหภูมิอาหารให้ต่ำลงถึง -18 องศาเซลเซียส โดยเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง (Freezing time) คือ เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการลดอุณหภูมิกึ่งกลางอาหารจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิต่ำสุด



รูปที่ 2.1 กระบวนการแช่เยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์

ที่มา : Food Freezing and Thawing Calculation

วิธีการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งสามารถคำนวณได้หลายวิธี ได้แก่วิธีเชิงสังเคราะห์ วิธีเชิงประมาณ วิธีเชิงประจักษ์ และวิธีเชิงเลข

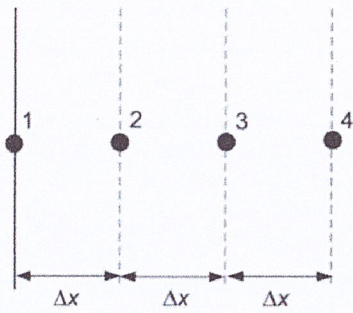
วิธีเชิงสังเคราะห์ (Analytical methods) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด มีรูปแบบสมการที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อนเพียงพอในการอธิบายปัญหาและแก้ปัญหาได้ด้วยการวิเคราะห์ ทำให้ง่ายต่อสถานการณ์ทางกายภาพ เช่น สภาวะแวดล้อม รูปทรงของอาหาร และสมบัติของอาหารที่ถูกตั้งสมมติฐานว่ามีค่าคงที่ หรือรูปทรงของอาหารที่ตั้งสมมติฐานว่าเป็นแผ่นบาง ทรงกระบอกอนันต์ หรือทรงกลม เป็นต้น จึงเป็นเหตุให้วิธีเชิงสังเคราะห์มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ทางปฏิบัติ แต่กลับเป็นที่สนใจของนักวิจัยที่นำไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการอื่น ๆ และอาจเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการพัฒนาวิธีการประมาณและเชิงประจักษ์ ตัวอย่างเช่นสมการของแพลงค์

วิธีเชิงประมาณ (Approximate methods) เพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้ยุ่งเกินไป จะมีการแบ่งกระบวนการแช่เยือกแข็งออกเป็นช่วงลดอุณหภูมิและช่วงที่มีการเปลี่ยนสถานะ และตั้งสมมติฐานว่าสมบัติทางกายภาพของอาหารมีค่าคงที่ตลอดในแต่ละช่วง แม้ว่าในทางปฏิบัติสมบัติของอาหารจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ โดยหวังว่าการประมาณค่าอย่างรอบคอบจะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำเพียงพอในการนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ ตัวอย่างเช่น วิธีของ Pham (1984), Mascheroni and Calvelo (1982)

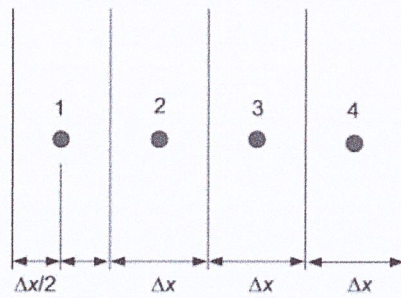
วิธีเชิงประจักษ์ (Empirical methods) อาจจะหรืออาจจะมีส่วนที่ไม่ขึ้นอยู่กับทฤษฎี รวมถึงตัวแปรที่ได้ข้อมูลจากการทดลองหรือการคำนวณเชิงตัวเลข ไม่มีการจำกัดจำนวนปัจจัยที่นำมาพิจารณาราบใดที่มีการใช้ตัวแปรเชิงประจักษ์เพียงพอ อย่างไรก็ตามสมการที่ได้มีแนวโน้มที่จะทำงานได้ไม่ดี เมื่ออยู่นอกเหนือสภาวะเงื่อนไขที่ทดลอง ตัวอย่างเช่น วิธีของ Pham (1986), Salvadori and Mascheroni (1991)

วิธีเชิงเลข (Numerical methods) เกี่ยวกับการแบ่งพื้นที่และเวลาออกเป็นส่วนย่อยเล็กๆ หรือปริมาตรควบคุม จากนั้นจึงแก้สมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและตัวแปรอื่น ๆ สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำเท่าที่ความต้องการหากมีอุปกรณ์ที่ใช้คำนวณเพียงพอ วิศวกรเชิงปฏิบัติจะมีความสนใจในวิธีเชิงประมาณ เชิงประจักษ์หรือเชิงตัวเลขมากกว่า ในขณะที่นักวิจัยพบว่าวิธีเชิงสังเคราะห์มีประโยชน์เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับวิธีเชิงประมาณหรือเชิงประจักษ์ และใช้สำหรับการประมาณผลกระทบของตัวแปรในการออกแบบกระบวนการ

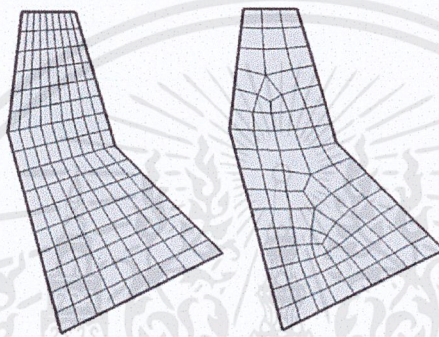
วิธีเชิงเลขเริ่มจากขั้นตอนการแบ่งพื้นที่ โดยวิธีการที่นิยม คือ finite difference method (FDM) ที่เหมาะกับอาหารรูปทรงปกติ เช่น แผ่นบาง ทรงกระบอก ทรงกลม หรือทรงสี่เหลี่ยม เป็นต้น finite elements method (FEM) และ finite volume method (FVM) เหมาะสำหรับอาหารที่มีรูปทรงซับซ้อน



(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 2.2 การแบ่งพื้นที่ในวิธีเชิงเลข (ก.) วิธี finite difference (ข.) วิธี finite volume (ค.) วิธี finite elements

ที่มา : Food Freezing and Thawing Calculation

### 2.1.2 สมบัติของอาหาร

1. ความหนาแน่น (Density,  $\rho$ ) ในอาหารมวล 1 หน่วย แต่ละองค์ประกอบมีสัดส่วนมวล  $x_i$  และมีปริมาตรเท่ากับ  $x_i/\rho_i$  ความหนาแน่นรวมของอาหารจึงเท่ากับมวลทั้งหมด (1)หารด้วยปริมาตรทั้งหมด

$$\rho = \frac{1}{\sum x_i/\rho_i}$$

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอาหาร ( $\text{kg/m}^3$ )

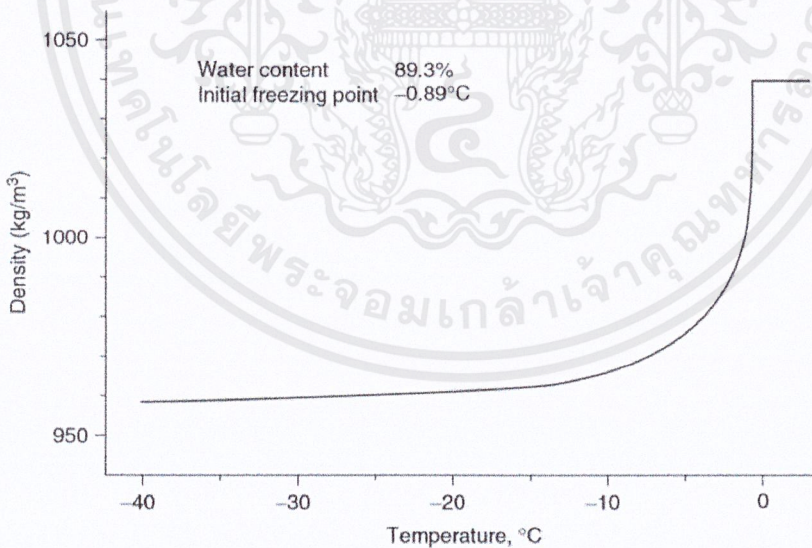
$x_i$  คือ สัดส่วนมวลขององค์ประกอบในอาหาร

$\rho_i$  คือ ความหนาแน่นขององค์ประกอบในอาหาร ( $\text{kg/m}^3$ )

ตารางที่ 2.1 สมการประมาณค่าความหนาแน่นขององค์ประกอบหลักในอาหารซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิช่วง -40 °C ถึง 150 °C (Choi and Okos, 1986)

| องค์ประกอบหลัก | สมการ                                                                                 |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| โปรตีน         | $\rho = (1.3299 \times 10^3) - (5.1840 \times 10^{-1}T)$                              |
| ไขมัน          | $\rho = (9.2559 \times 10^2) - (4.1757 \times 10^{-1}T)$                              |
| คาร์โบไฮเดรต   | $\rho = (1.5995 \times 10^3) - (3.1046 \times 10^{-1}T)$                              |
| ไฟเบอร์        | $\rho = (1.3115 \times 10^3) - (3.6589 \times 10^{-1}T)$                              |
| เถ้า           | $\rho = (2.4238 \times 10^3) - (2.8063 \times 10^{-1}T)$                              |
| น้ำ            | $\rho = (9.9718 \times 10^2) + (3.1439 \times 10^{-3}T) - (3.7574 \times 10^{-3}T^2)$ |
| น้ำแข็ง        | $\rho = (9.1689 \times 10^2) - (1.3071 \times 10^{-1}T)$                              |

ความหนาแน่นของน้ำแข็งน้อยกว่าความหนาแน่นของน้ำ เช่นเดียวกับกับความหนาแน่นของอาหารแช่เยือกแข็งที่น้อยกว่าความหนาแน่นของอาหารที่ไม่แช่เยือกแข็ง การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นจะเป็นไปตามสัดส่วนของน้ำที่แข็งตัวซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.3 ความหนาแน่นของสตรอเบอร์รี่ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ที่มา : Heldman, 1982

2.ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, k) ค่าการนำความร้อนของอาหารบ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในอาหาร โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนในอาหาร เช่น องค์ประกอบในอาหาร ความพรุนของอาหาร เป็นต้น ในการแช่เยือกแข็ง การเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายใน 10 °C ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็งของอาหาร เนื่องจากการนำความร้อนของน้ำแข็งมีค่ามากกว่าการนำความร้อนของน้ำประมาณ 4 เท่า

ตารางที่ 2.2 สมการประมาณค่าการนำความร้อนขององค์ประกอบหลักในอาหารซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ช่วง -40 °C ถึง 150 °C (Choi and Okos, 1986)

| องค์ประกอบหลัก | สมการ                                                                                 |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| โปรตีน         | $k = (1.7881 \times 10^{-1}) + (1.1958 \times 10^{-3}T) - (2.7178 \times 10^{-6}T^2)$ |
| ไขมัน          | $k = (1.8071 \times 10^{-1}) - (2.7064 \times 10^{-3}T) - (1.7749 \times 10^{-7}T^2)$ |
| คาร์โบไฮเดรต   | $k = (1.8071 \times 10^{-1}) - (2.7064 \times 10^{-3}T) - (1.7749 \times 10^{-7}T^2)$ |
| ไฟเบอร์        | $k = (1.8331 \times 10^{-1}) + (1.2497 \times 10^{-3}T) - (3.1683 \times 10^{-6}T^2)$ |
| เถ้า           | $k = (3.2962 \times 10^{-1}) + (1.4011 \times 10^{-3}T) - (2.9069 \times 10^{-6}T^2)$ |
| น้ำ            | $k = (5.7109 \times 10^{-1}) + (1.7625 \times 10^{-3}T) - (6.7063 \times 10^{-6}T^2)$ |
| น้ำแข็ง        | $k = 2.2196 - (6.2459 \times 10^{-3}T) + (1.0154 \times 10^{-4}T^2)$                  |

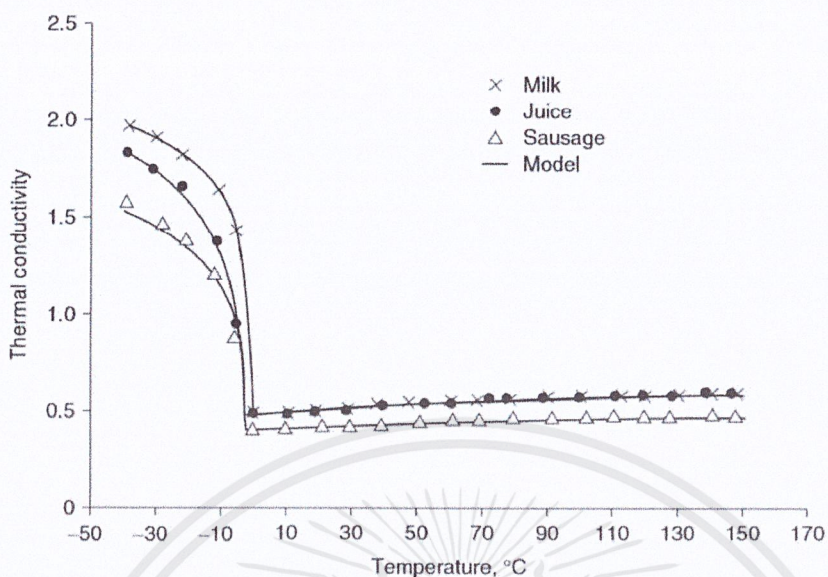
โดยค่าการนำความร้อนของอาหารคำนวณได้จากสมการดังนี้ (Murakami & Okos, 1989)

$$k = \sum x_i^v k_i$$

โดย k คือ ค่าการนำความร้อน W/(m·K)

$k_i$  คือ ค่าการนำความร้อนขององค์ประกอบในอาหาร

$x_i^v$  คือ volume fraction ขององค์ประกอบในอาหาร ซึ่งหาได้จาก  $x_i^v = \frac{x_i/\rho_i}{\sum x_i^v k_i}$



รูปที่ 2.4 การทำนายค่าการนำความร้อนของนม น้ำผลไม้ และไส้กรอกซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ที่มา : Choi and Okos, 1984

3. ความร้อนจำเพาะ (specific heat,  $c_p$ ) เป็นสมบัติเชิงความร้อน หมายถึงปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุมวลหนึ่งหน่วยอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งองศา

ตารางที่ 2.3 สมการประมาณค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบหลักในอาหารซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ช่วง  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Choi and Okos, 1986)

| องค์ประกอบหลัก                                                                    | สมการ                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| โปรตีน                                                                            | $c_p = 2.0082 + (1.2089 \times 10^{-3}T) - (1.3129 \times 10^{-6}T^2)$ |
| ไขมัน                                                                             | $c_p = 1.9842 + (1.4733 \times 10^{-3}T) - (4.8006 \times 10^{-6}T^2)$ |
| คาร์โบไฮเดรต                                                                      | $c_p = 1.5488 + (1.9625 \times 10^{-3}T) - (5.9399 \times 10^{-6}T^2)$ |
| ไฟเบอร์                                                                           | $c_p = 1.8459 + (1.8306 \times 10^{-3}T) - (4.6509 \times 10^{-6}T^2)$ |
| เกลือ                                                                             | $c_p = 1.0926 + (1.8896 \times 10^{-3}T) - (3.6817 \times 10^{-6}T^2)$ |
| น้ำ (อุณหภูมิช่วง $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) | $c_p = 4.1289 - (5.3062 \times 10^{-3}T) + (9.9516 \times 10^{-4}T^2)$ |
| น้ำ (อุณหภูมิช่วง $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) | $c_p = 4.1289 - (9.0864 \times 10^{-5}T) + (5.4731 \times 10^{-6}T^2)$ |
| น้ำแข็ง                                                                           | $c_p = 2.0623 + (6.0769 \times 10^{-3}T)$                              |

โดยสามารถหาค่าความร้อนจำเพาะของอาหารได้ดังนี้

$$c_u = \sum c_i x_i$$

โดย  $c_u$  คือ ความร้อนจำเพาะเหนือจุดเยือกแข็ง (kJ/kg.K)

$c_i$  คือ ความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบในอาหาร

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความร้อนจำเพาะของอาหารตามอุณหภูมิตั้งรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าความร้อนจำเพาะของอาหารแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเยือกแข็งประมาณ 20 °C ขึ้นไป จะไม่แตกต่างจากความร้อนจำเพาะของอาหารที่ไม่แช่แข็งมากนัก โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิแช่เยือกแข็งความร้อนจำเพาะของอาหารจะแสดงในรูปแบบค่าความร้อนจำเพาะปรากฏ (Apparent specific heat) ซึ่งเป็นผลรวมของค่าความร้อนจำเพาะและความร้อนแฝง หรือความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง โดยมีสมการประมาณค่าความร้อนจำเพาะปรากฏซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (Chen, 1985) ดังนี้

$$c_{pa} = 1.55 + 1.26x_s - \frac{(x_{wo} - x_b)L_0T_f}{T^2}$$

โดย  $c_{pa}$  คือ ความร้อนจำเพาะปรากฏ (kJ/kg.K)

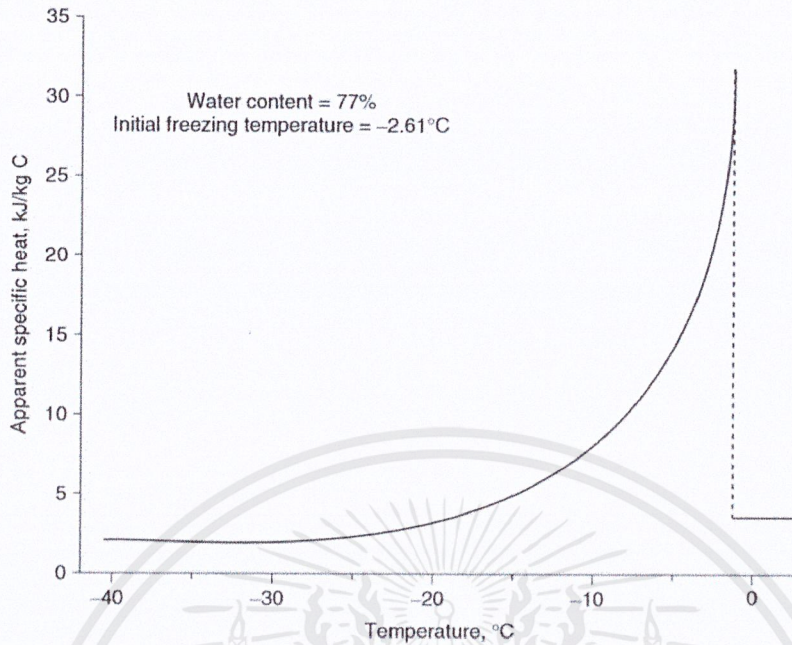
$x_s$  คือ สัดส่วนมวลของแข็งในอาหาร

$x_{wo}$  คือ สัดส่วนมวลของน้ำในอาหาร

$x_b$  คือ สัดส่วนมวลของ bound water มีค่าประมาณ  $0.4x_p$  โดย  $x_p$  คือ สัดส่วนมวลของโปรตีนในอาหาร

$L_0$  คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำ มีค่าประมาณ 333.6 kJ/kg

$T_f$  คือ อุณหภูมิเยือกแข็งของอาหาร (°C)



รูปที่ 2.5 ความร้อนจำเพาะปรากฏของเซอรัร่หวานซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ที่มา : Heldman, 1982

4.จุดเริ่มต้นเยือกแข็งของอาหาร (Initial freezing point) คืออุณหภูมิที่น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ซึ่งสามารถคำนวณอุณหภูมิจุดเยือกแข็งของอาหารต่างๆตามประเภทอาหารดังนี้ (Chang and Tao, 1981)

กลุ่มเนื้อสัตว์

$$T_f = 271.18 + 1.47x_w$$

กลุ่มผักและผลไม้

$$T_f = 287.56 - 49.19x_w + 37.07x_w^2$$

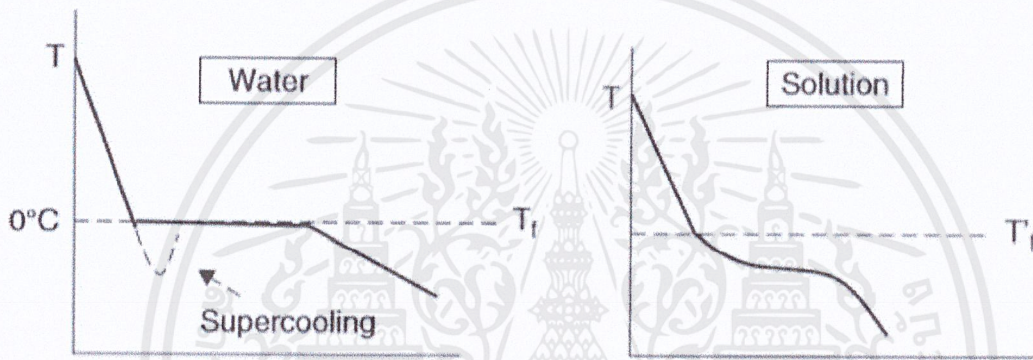
กลุ่มน้ำผลไม้

$$T_f = 120.47 + 327.35x_w - 176.49x_w^2$$

โดย  $T_f$  คือ อุณหภูมิจุดเยือกแข็งของอาหาร (K)

$x_w$  คือ สัดส่วนมวลของน้ำในอาหาร

จุดแช่เยือกแข็งของอาหารต่ำกว่าจุดแช่เยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากสารละลายในน้ำในอาหารนั้นเอง ที่อุณหภูมิเริ่มต้นแช่เยือกแข็ง น้ำบางส่วนในอาหารเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งและเหลือสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่า ดังนั้นจุดแช่เยือกแข็งของอาหารจึงลดลง และในความเป็นจริงอาหารจะไม่ถูกแช่เยือกแข็งอย่างสมบูรณ์ได้ที่อุณหภูมิเดียว เนื่องจากองค์ประกอบที่ซับซ้อนของอาหาร การเปลี่ยนแปลงในการแช่เยือกแข็งของอาหารจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ โดยจุดเริ่มต้นแช่เยือกแข็งคืออุณหภูมิที่เริ่มเกิดผลึกน้ำแข็ง โดยจุดแช่เยือกแข็งมีความสำคัญในการสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาอาหาร และใช้ในการคำนวณสมบัติทางความร้อนของอาหารอีกด้วย

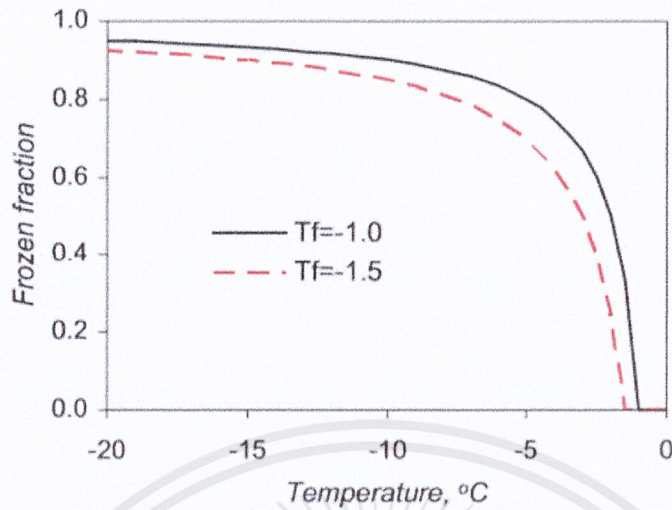


รูปที่ 2.6 กราฟแช่เยือกแข็งน้ำบริสุทธิ์และสารละลายในน้ำ

ที่มา : Food Process Engineering and Technology

5. สัดส่วนมวลน้ำแข็ง (Frozen fraction) คือสัดส่วนมวลของน้ำที่เปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งเมื่อผ่านจุดเริ่มต้นแช่เยือกแข็งของอาหาร เป็นหนึ่งในองค์ประกอบของอาหารที่ใช้ในการคำนวณสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดแช่เยือกแข็ง โดยมีสมการคำนวณสัดส่วนมวลน้ำแข็งสำหรับอาหารกลุ่มเนื้อสัตว์ ปลา นม ไข่ ผัก และผลไม้ดังนี้ (Tchigeov, 1979)

$$x_{ice} = \frac{1.105}{1 + \frac{0.7138}{\ln(T_f - T + 1)}} x_w$$



รูปที่ 2.7 สัดส่วนมวลน้ำแข็งของอาหารที่มีจุดเยือกแข็งต่างกัน 0.5 เคลวิน

ที่มา : Food Freezing and Thawing Calculation

### 2.1.3 การถ่ายเทความร้อน

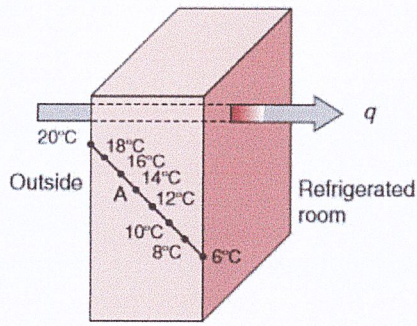
การถ่ายเทความร้อน คือการส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยรูปแบบการถ่ายเทความร้อนได้แก่การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน

สภาวะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady state หรือ Transient state) เกิดขึ้นช่วงแรกของการถ่ายเทความร้อน แก้ววัตถุ อุณหภูมิที่จุดๆหนึ่งของวัตถุมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป เขียนในรูปสมการ

$$\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0$$

เมื่อวัตถุได้รับการถ่ายเทความร้อนเป็นเวลานานจนอุณหภูมิที่จุดหนึ่งจุดใดในวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา เรียกสภาวะนี้ว่าสภาวะสม่ำเสมอ (Steady state) เขียนในรูปสมการได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$



รูปที่ 2.8 การนำความร้อนในสภาวะสม่ำเสมอในผนัง

ที่มา : Introduction to Food Engineering

กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's heat conduction law) แสดงพฤติกรรมการนำความร้อน กล่าวว่าการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือฟลักซ์ของความร้อนที่การถ่ายเท ณ ตำแหน่งหนึ่งๆจะเป็น ปรากฏโดยตรงกับค่าลบของเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่เกิดการถ่ายเทความร้อนนั้น เขียนเป็นสมการการนำความร้อนในแนวแกนเดียวได้ดังต่อไปนี้

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

เมื่อ  $q$  คือ ความร้อนที่เกิดการถ่ายเท มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร

$k$  คือ ค่าการนำความร้อน มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน

$\frac{\partial T}{\partial x}$  คือ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแนวแกน  $x$  มีหน่วยเป็นเคลวินต่อเมตร

ทำการประยุกต์รวมกฎข้อที่ 1 ของฟูเรียร์สำหรับการนำความร้อนเข้ากับกฎข้อที่ 1 ของทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยกล่าวว่าพลังงานเป็นปริมาณคงที่ และสมมติให้ทำการศึกษารายการถ่ายเทความร้อนในระบบที่การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการนำความร้อนเท่านั้น จะได้สมการดังสมการข้างล่างสำหรับกรณีการนำความร้อนในมิติเดียว ซึ่งเรียกว่ากฎข้อที่ 2 ของฟูเรียร์สำหรับการนำความร้อน

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S_q$$

หรือ

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S_q$$

โดย  $\rho$  คือความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )

$c$  คือ ความร้อนจำเพาะ ( $\text{J/kg.K}$ )

$\alpha$  คือ ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity) มีค่าเท่ากับ  $\frac{k}{\rho c_p}$

$S_q$  คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน ( $\text{W/m}^3$ ) ในกระบวนการแช่เยือกแข็งส่วนใหญ่ไม่มีความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน แม้ว่าในบางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์  $S_q$  ใช้แสดงความร้อนแฝงที่ปลดปล่อยและมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ แต่ในแบบจำลองอื่นๆ ความร้อนแฝงถูกรวมอยู่ในความร้อนจำเพาะ เรียกว่าความร้อนจำเพาะปรากฏ

ในการแก้สมการการนำความร้อนจำเป็นต้องรู้เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ แบบที่ 1 (Dirichlet boundary condition) เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม หรือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นศูนย์ เป็นเงื่อนไขขอบเขตแบบแอดิยาบติก (adiabatic boundary condition)

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_s = 0$$

แบบที่ 2 (Neumann boundary condition) เมื่อมีฟลักซ์ความร้อน  $q_s$  ที่ขอบเขต แสดงดังนี้

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_s = q_s$$

แบบที่ 3 (Robin boundary condition) หรือกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) เมื่อนำวัตถุหนึ่งไปวางไว้ในสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าวัตถุนั้น วัตถุจะถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมทำให้ตัวเองมีอุณหภูมิลดลงหรือเย็นลง โดยอัตราการเย็นตัวของวัตถุภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดให้ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุนั้นกับสิ่งแวดล้อม เมื่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ  $h$  สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_s = h(T_a - T_s)$$

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วยสมการเชิงวิเคราะห์ของ Plank (1941) โดยมีสมมติฐานคือการถ่ายโอนความร้อนในอาหารเกิดจากการนำความร้อนแต่เพียงอย่างเดียว สมบัติทางกายภาพของอาหารมีค่าคงที่ และเวลาในการแช่เยือกแข็งคือเวลาในช่วงที่ใช้ความร้อนแฝงเปลี่ยนสถานะน้ำในอาหารเป็นน้ำแข็งเท่านั้น ไม่

รวมถึงช่วงเวลาที่ใช้ความร้อนสัมผัสในการลดอุณหภูมิอาหารก่อนถึงจุดเยือกแข็งและการลดอุณหภูมิอาหารหลังจากผ่านจุดเยือกแข็งแล้ว ทำให้เวลาที่ได้จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนสูง

Nagaoka *et al.* (1956) มีการทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งโดยพัฒนาจากสมการของแพลงค์ แต่มีการคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในช่วงความร้อนสัมผัสด้วย

Cogne *et al.* (2013) ทำการทดลองแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศหยดน้ำซูป และจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียวและการถ่ายเทมวลด้วยโปรแกรม COMSOL โดยวิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite element method เพื่อทำนายอุณหภูมิและมวลที่สูญเสียระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง โดยมีการศึกษาตัวแปรที่ส่งผล ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหยดน้ำซูป อุณหภูมิเริ่มต้นของหยดน้ำซูป และความดันสุญญากาศในกระบวนการ



รูปที่ 2.9 แบบจำลองรูปร่างของชิ้นส่วนย่อยที่ถูกแบ่งเพื่อใช้คำนวณในวิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite element method

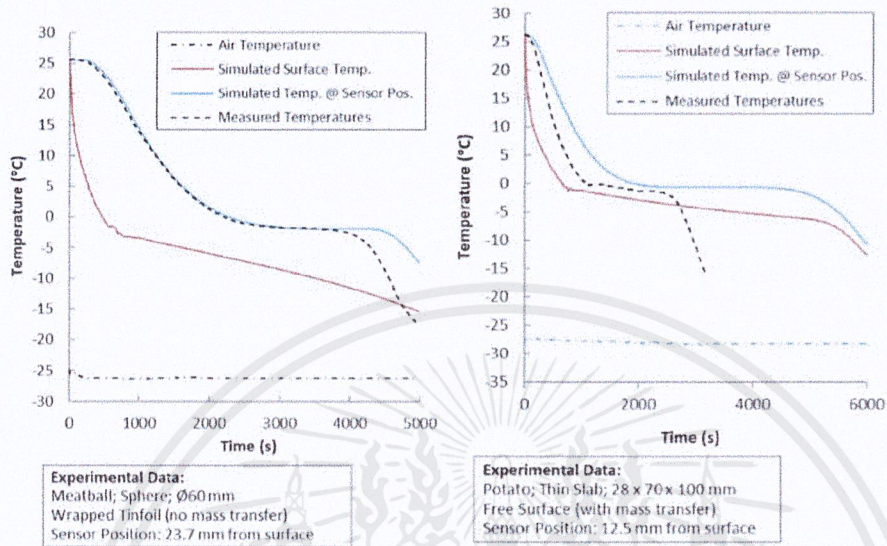
ที่มา : Cogne *et al.* (2013)

Fernando Zigunov (2018) ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งอาหารรูปทรงแผ่นสี่เหลี่ยมบาง ทรงกระบอกยาวและทรงกลม โดยจำลองการถ่ายเทความร้อน 1 มิติในสภาวะไม่คงตัว ดังนี้

$$\frac{1}{x^m} \frac{\partial}{\partial x} \left( k x^m \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

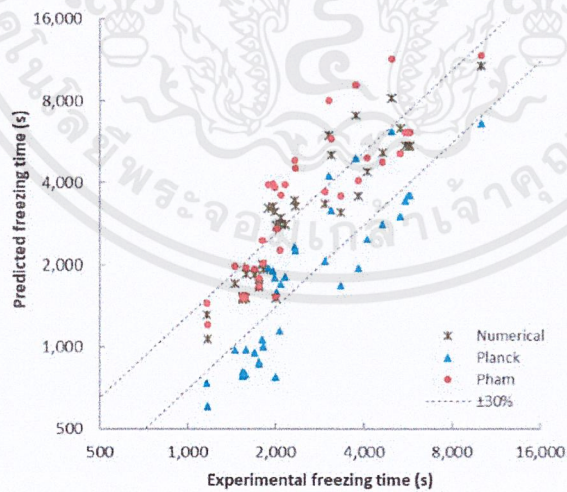
โดยประมาณค่าสมบัติทางความร้อนจากองค์ประกอบหลักในอาหารซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ (Choi and Okos, 1986) และทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite difference method โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel® VBA เปรียบเทียบผลจากการทดลองแช่เยือกแข็งอาหาร 40 ตัวอย่างที่มีรูปทรง

และขนาดแตกต่างกันด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเย็นเป่าชนิดอุโมงค์ พบว่า 55% ของตัวอย่างมีค่าความผิดพลาด  $\pm 15\%$



รูปที่ 2.10 การทำนายอุณหภูมิที่เวลาต่างๆระหว่างการแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ที่มา : Fernando Zigunov (2018)



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบเวลาการแช่เยือกแข็งจากการทดลองกับการทำนายด้วยวิธีเชิงตัวเลข แพลงค์ และแพม

ที่มา : Fernando Zigunov (2018)

ซึ่งงานวิจัยนี้มีการทำนายเวลาโดยใช้วิธีเชิงเลขเช่นเดียวกับ Fernando Zigunov (2018) และ Cogne *et al.* (2013) โดยเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียวในอาหารรูปทรงแผ่นที่ความหนาต่างๆโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ แต่ไม่มีการถ่ายเทมวลเนื่องจากเป็นการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศโดยลดความดันเมื่อการแช่เยือกแข็งผ่านจุดแช่เยือกแข็งแล้ว



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 โปรแกรมทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศ

โปรแกรมที่ใช้ในการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศดังกล่าว คือโปรแกรม MATLAB คำณวนโดยใช้ function pdepe solver ใช้คำณวน Partial Differential Equation ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \frac{\partial u}{\partial t} = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} \left( x^m f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \right) + s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$$

โดย  $f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$  คือ flux term

$s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$  คือ source term

$t_0 \leq t \leq t_f$  และ  $a \leq x \leq b$

$m$  คือ ค่าคงที่ ;  $m = 0$  สำหรับอาหารรูปทรงแผ่น

$m = 1$  สำหรับอาหารทรงกระบอก

$m = 2$  สำหรับอาหารทรงกลม

เงื่อนไขเริ่มต้น  $u(x, t_0) = u_0(x)$  สำหรับ  $t = t_0$  และ  $a \leq x \leq b$

เงื่อนไขขอบเขต  $p(x, t, u) + q(x, t) f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = 0$  สำหรับ  $x = a$  หรือ  $x = b$  และ  $t_0 \leq t \leq t_f$

โดยสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณคือสมการการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ สภาวะไม่คงตัว ดังนี้

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

จัดสมการให้อยู่ในรูปแบบสมการสำหรับฟังก์ชัน pdepe solver

$$\frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = x^0 \frac{\partial}{\partial x} \left( x^0 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + 0$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นคือ  $T(x, t_0) = T_0(x)$  สำหรับ  $t = t_0$  และ  $0 \leq x \leq L$

และมีเงื่อนไขขอบเขตคือ

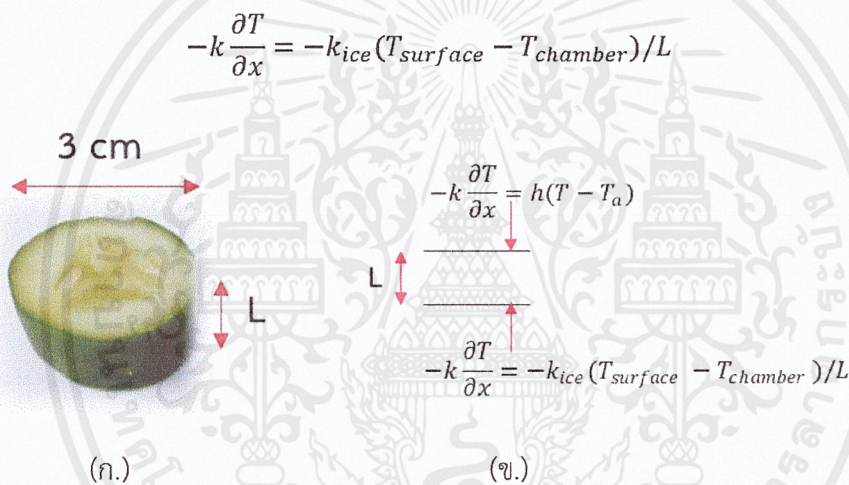
ที่ผิวอาหารด้านบนมีการพาความร้อน

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a)$$

แต่เนื่องจากเป็นการพาความร้อนโดยอากาศนิ่ง ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำ ในงานวิจัยนี้จึงไม่คำนึงถึงการพาความร้อน ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวอาหารด้านบนจะมีค่าดังนี้

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

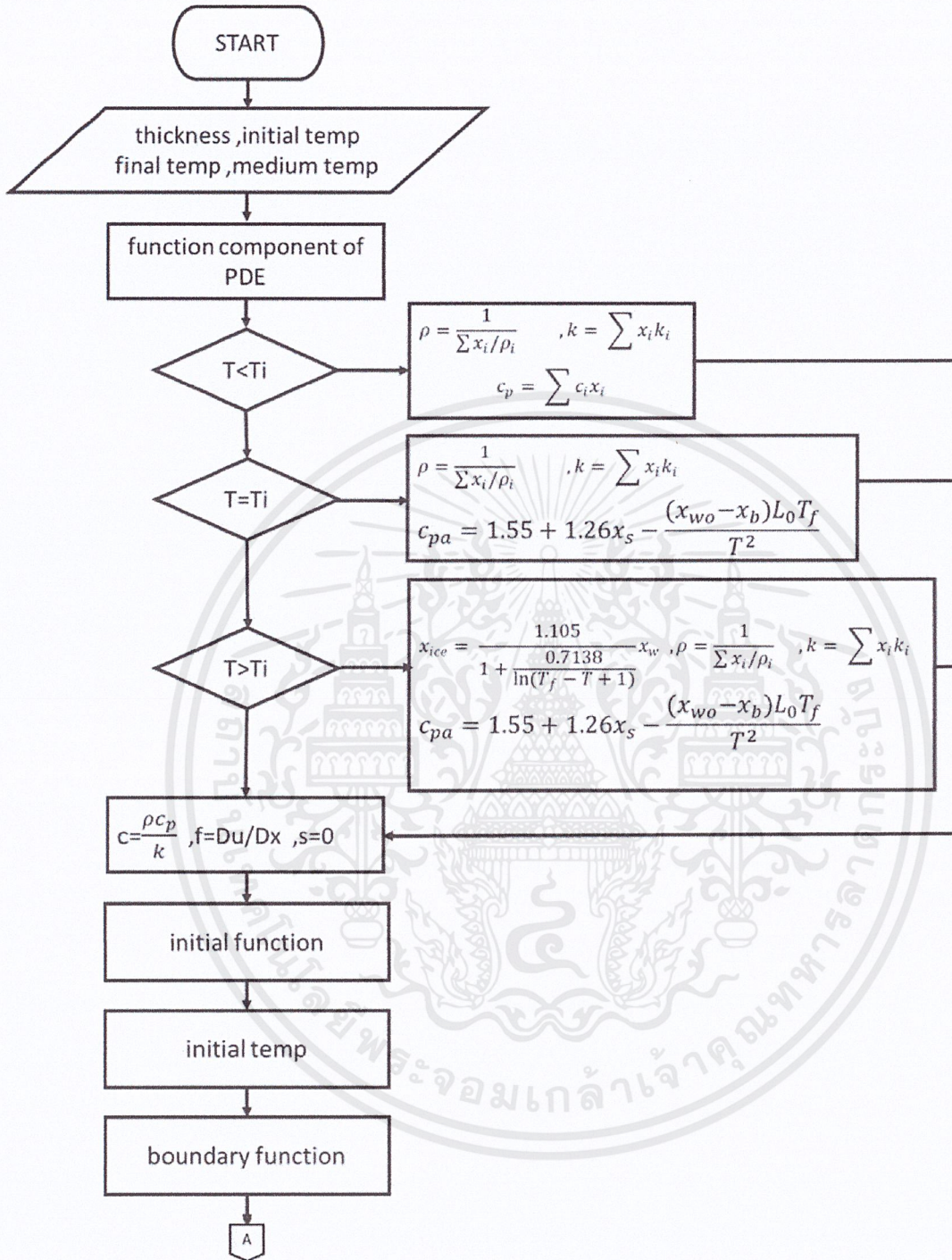
ที่ผิวอาหารด้านล่างมีการสัมผัสกับตัวถังของเครื่องแช่เยือกแข็ง

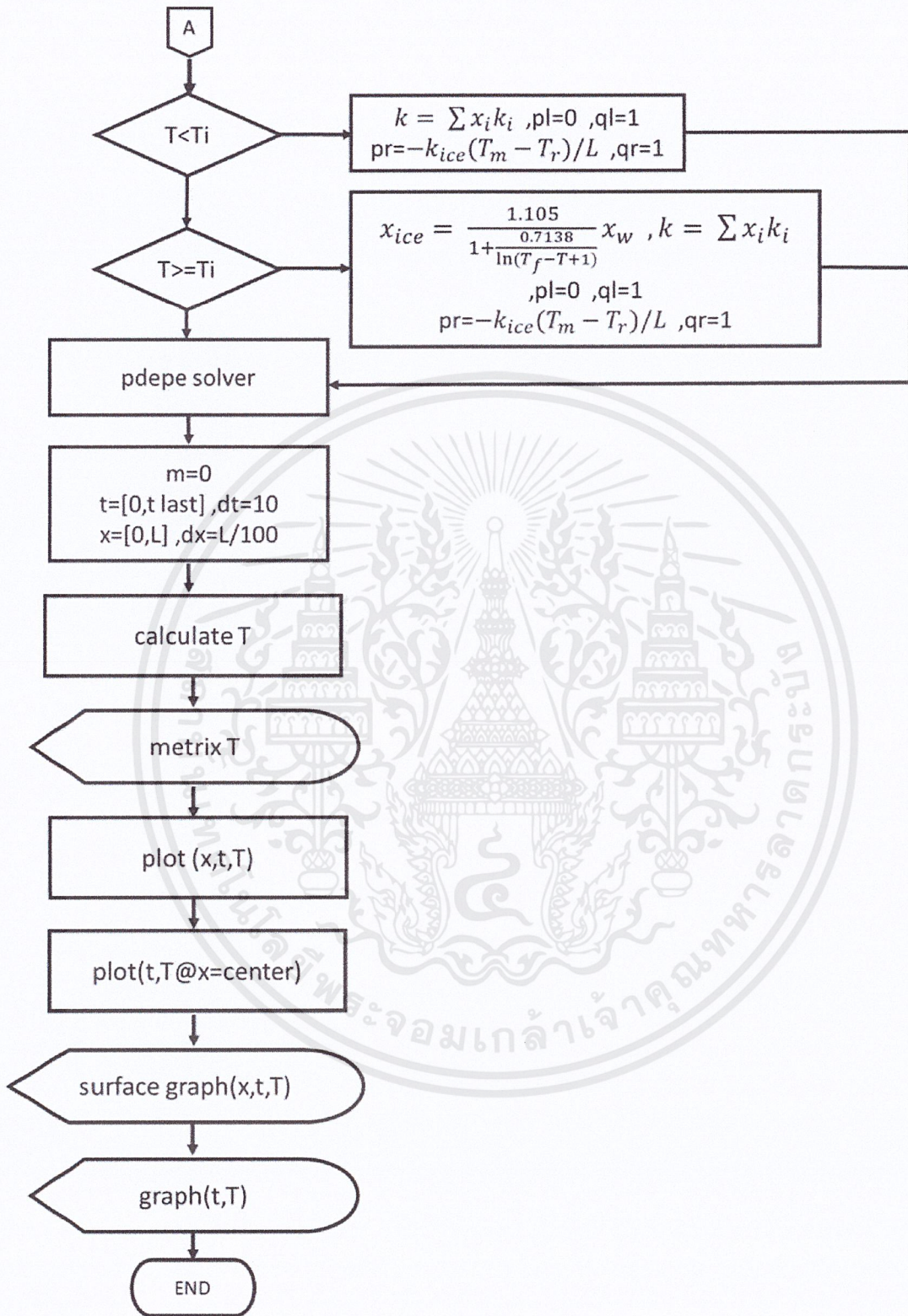


รูปที่ 3.1 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของแตงกวา (ก.) ขนาดและรูปทรงของแตงกวา

(ข.) แบบจำลองเงื่อนไขขอบเขตของการถ่ายเทความร้อน

การทำงานของโปรแกรม MATLAB ในการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งเริ่มต้นด้วยการป้อนข้อมูลของอาหาร คือ ความหนา อุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการ และข้อมูลของเครื่องแช่เยือกแข็ง คือ อุณหภูมิของตัวถังที่มีการสัมผัสกับอาหาร จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณอุณหภูมิทุกจุดย่อยในทุกๆรอบเวลาที่กำหนดโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของอาหารซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ จะทำการคำนวณจนครบรอบเวลาที่กำหนดจึงหยุดการทำงาน แผนผังการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.1





รูปที่ 3.2 แผนผังการทำนายเวลาแช่เยือกแข็งด้วยโปรแกรม MATLAB

### 3.2 การทดลอง

#### 3.2.1 วัดฤดูดับ

วัดฤดูดับที่ใช้ในการทดลอง คือ แดงกวา ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-3.4 เซนติเมตร หั่นตามแนวขวางที่ความหนาเฉลี่ยต่างกัน 4 ขนาด คือ 1, 1.3, 1.6 และ 2.5 เซนติเมตร

#### 3.2.2 วิธีการทดลอง

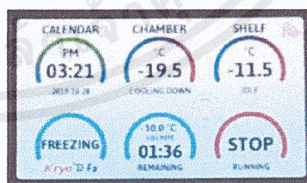
นำแดงกวาทั้ง 4 ความหนา ทดลองแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง Kryo'D Freezer jeew ที่ความดันบรรยากาศ วัดอุณหภูมิแดงกวา และอุณหภูมิถังด้วย RTD PT100 และบันทึกผลทุกๆ 30 วินาที และวัดกระแสไฟฟ้าด้วยแคลมป์มิเตอร์ทุกๆ 30 วินาที จนอุณหภูมิกึ่งกลางของแดงกวาเท่ากับ -6 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลดความดันลงจนถึงประมาณ 700 ปาสคาล และแช่เยือกแข็งจนอุณหภูมิกึ่งกลางของแดงกวาเท่ากับ -18 องศาเซลเซียส บันทึกข้อมูลทุกๆ 30 วินาทีเช่นเดิม



(ก.)



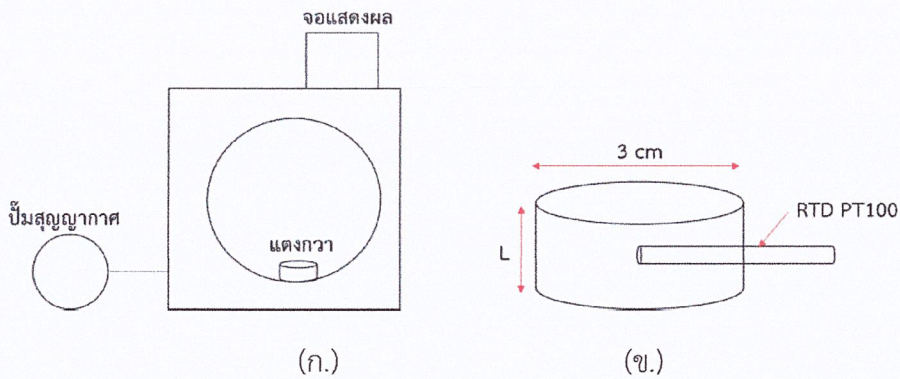
(ข.)



(ค.)

รูปที่ 3.3 การทดลองแช่เยือกแข็งแดงกวา (ก.) เครื่อง Kryo'D Freezer (jeew)

(ข.) แดงกวาหั่นตามขวาง (ค.) จอแสดงผล

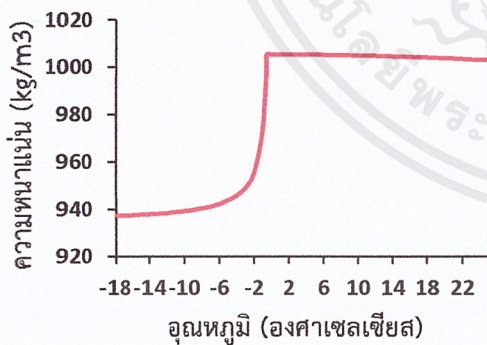


รูปที่ 3.4 แบบจำลองการทดลองแช่เยือกแข็งแผงกาว (ก.) ตำแหน่งการวางแผงกาว  
(ข.) การเสียบโพรบวัดอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลาง

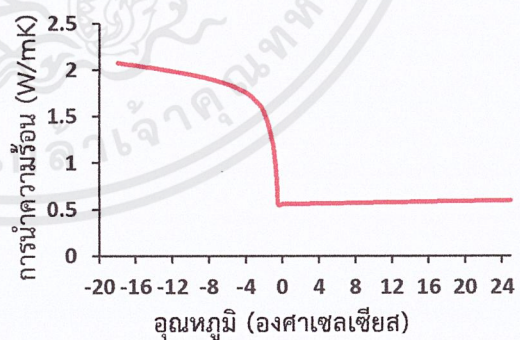
### 3.3 การคำนวณ

#### 3.3.1 การคำนวณความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน และค่าความจุความร้อนจำเพาะของแผงกาว

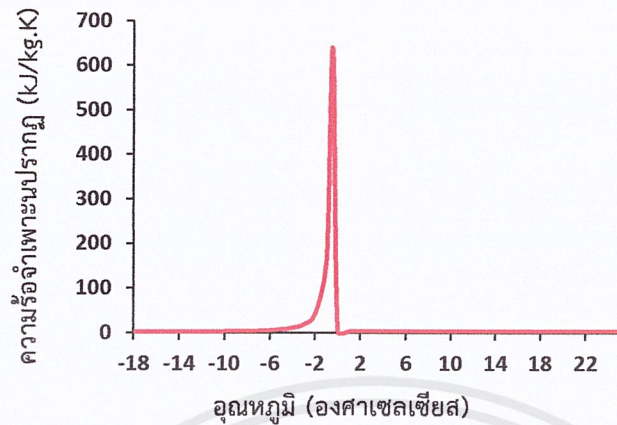
ความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน และค่าความจุความร้อนจำเพาะของแผงกาวสามารถคำนวณได้จากตารางในหัวข้อที่ 2.1.2 โดยแผงกาวมีองค์ประกอบหลักคือ โพรตีน 0.69%, ไขมัน 0.13%, คาร์โบไฮเดรต 2.76%, น้ำ 96.01% และเถ้า 0.41% โดยแผงกาวมีจุดแช่เยือกแข็งเท่ากับ -0.5 องศาเซลเซียส (ASHRAE 2006)



(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 3.5 สมบัติทางความร้อนของแตงกวาซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (ก.) ความหนาแน่น

(ข.) ค่าการนำความร้อน (ค.) ค่าความจุความร้อนจำเพาะปรากฏ

### 3.3.2 การคำนวณค่าความผิดพลาดจากการทำนาย

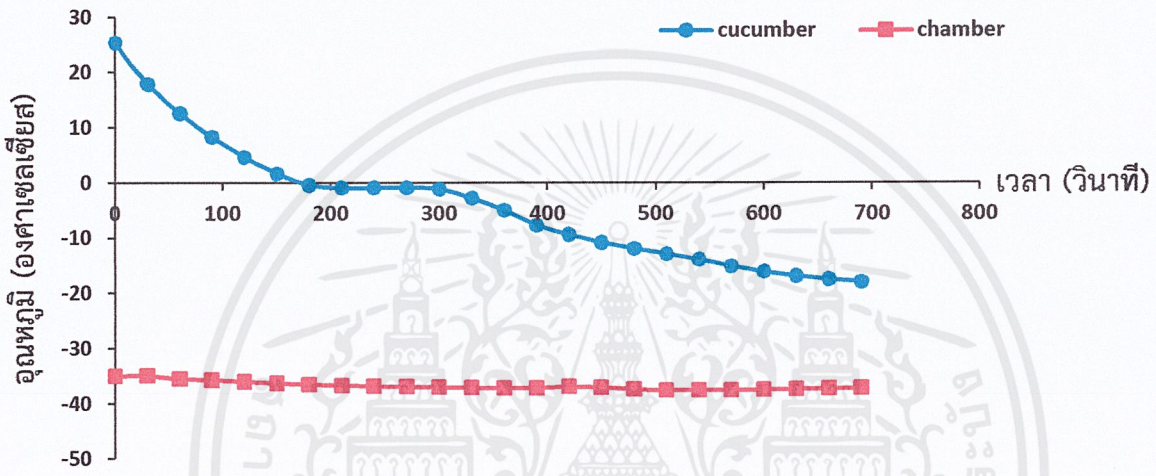
ทดสอบโปรแกรมโดยการทำนายเวลาและเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของเวลาการแช่เยือกแข็งจากการทำนายและจากการทดลอง

$$\text{ค่าความผิดพลาด (\%)} = \left( \frac{\text{เวลาที่ทำนาย} - \text{เวลาจากการทดลอง}}{\text{เวลาจากการทดลอง}} \right) \times 100$$

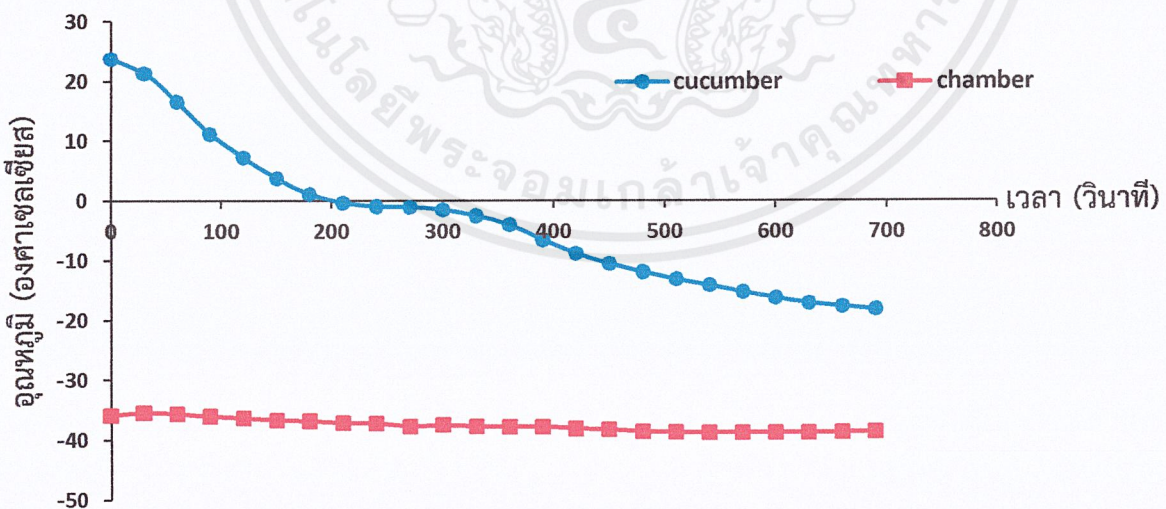
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

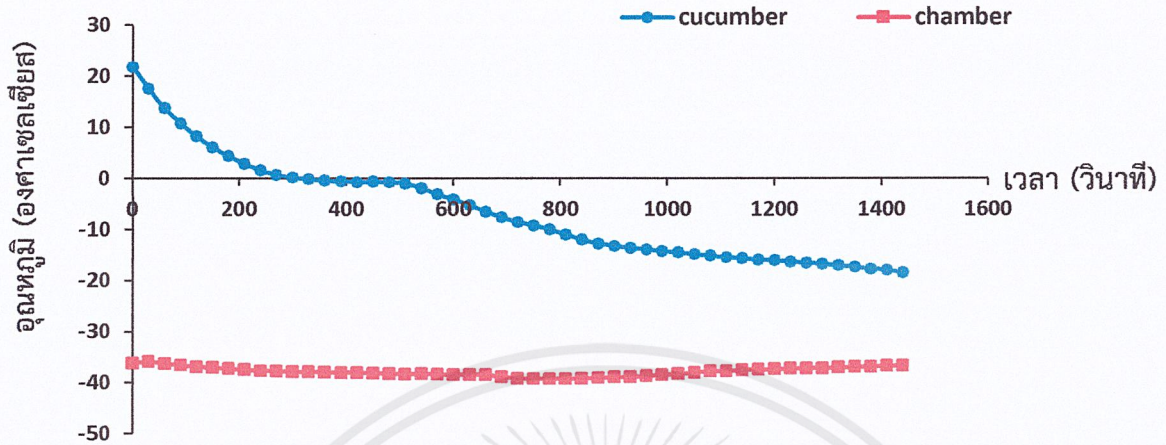
#### 4.1 ผลการแช่เยือกแข็ง



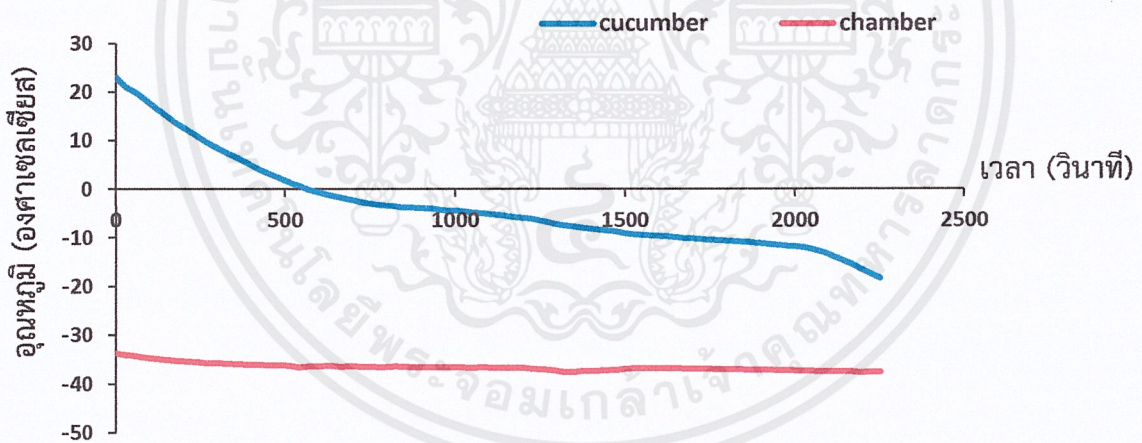
รูปที่ 4.1 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศต่ำกว่าความหนา 1 เซนติเมตร



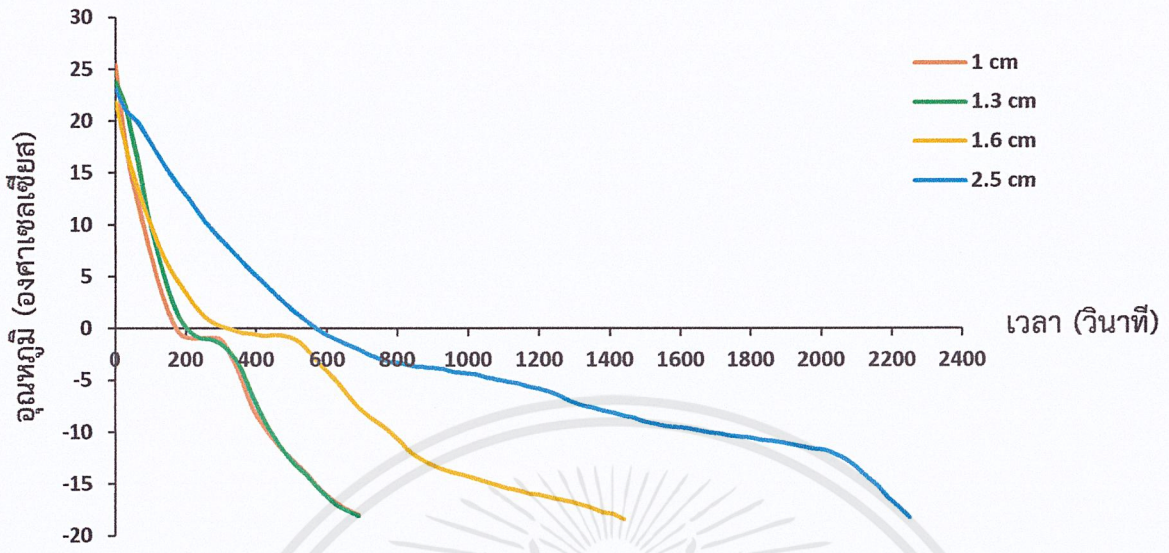
รูปที่ 4.2 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศต่ำกว่าความหนา 1.3 เซนติเมตร



รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศแตกกวาความหนา 1.6 เซนติเมตร

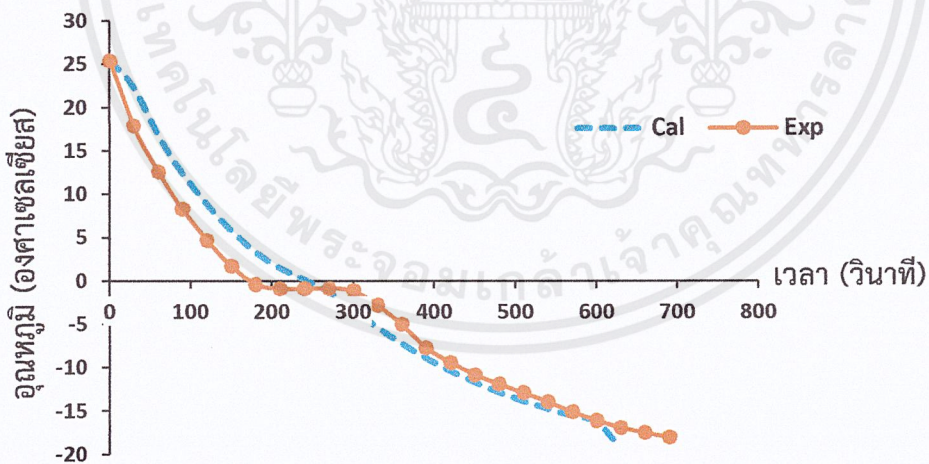


รูปที่ 4.4 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศแตกกวาความหนา 2.5 เซนติเมตร

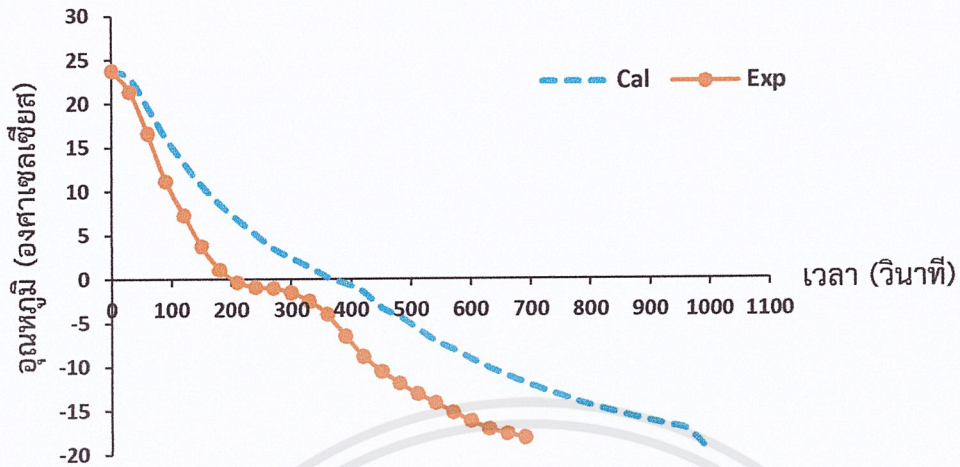


รูปที่ 4.5 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศต่างกวางความหนาต่างๆ

#### 4.2 การทำนายเวลาแช่เยือกแข็งด้วย MATLAB

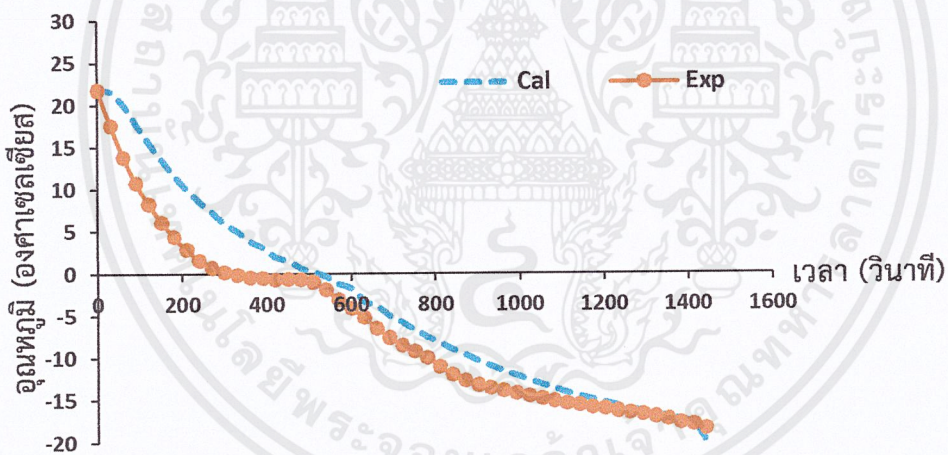


รูปที่ 4.6 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาจากการทดลองและการทำนายในการแช่เยือกแข็งต่างกวางความหนา 1 เซนติเมตร



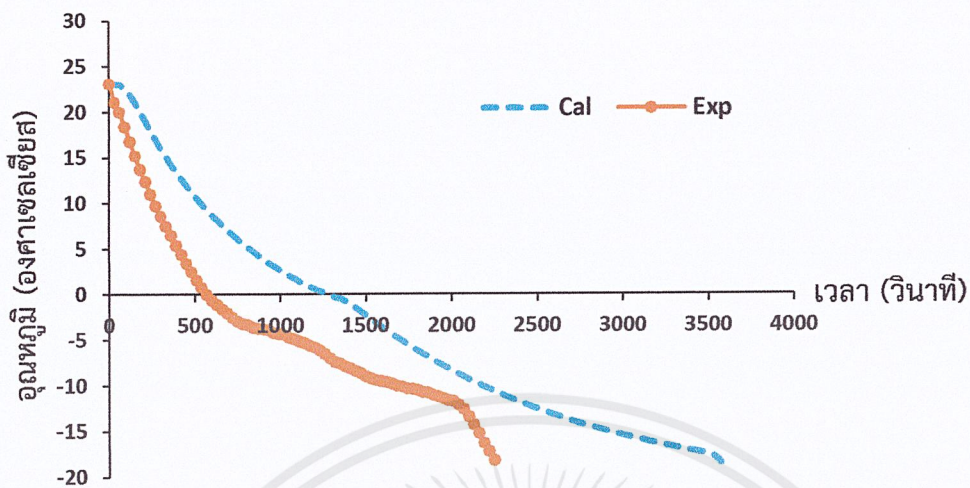
รูปที่ 4.7 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาจากการทดลองและการทำนายในการแช่เยือกแข็งแดงกว่าความหนา

1.3 เซนติเมตร

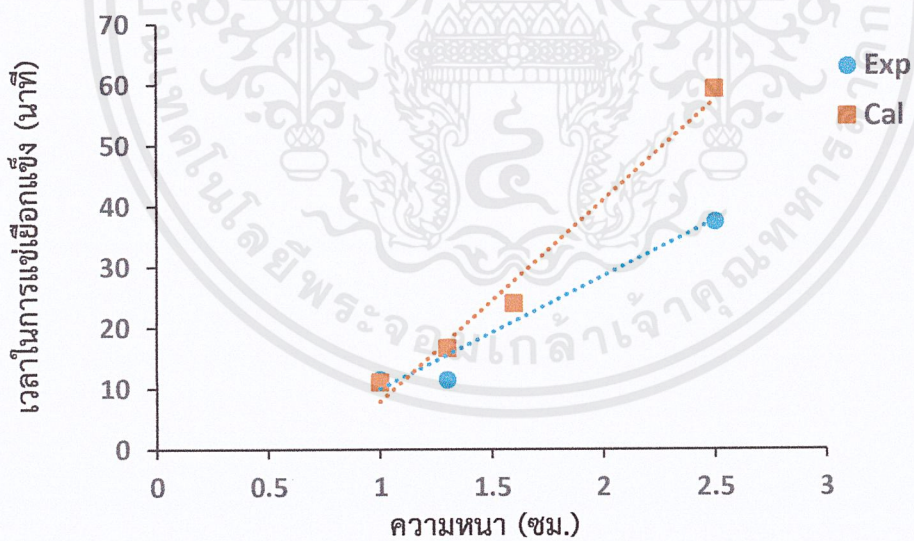


รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาจากการทดลองและการทำนายในการแช่เยือกแข็งแดงกว่าความหนา

1.6 เซนติเมตร



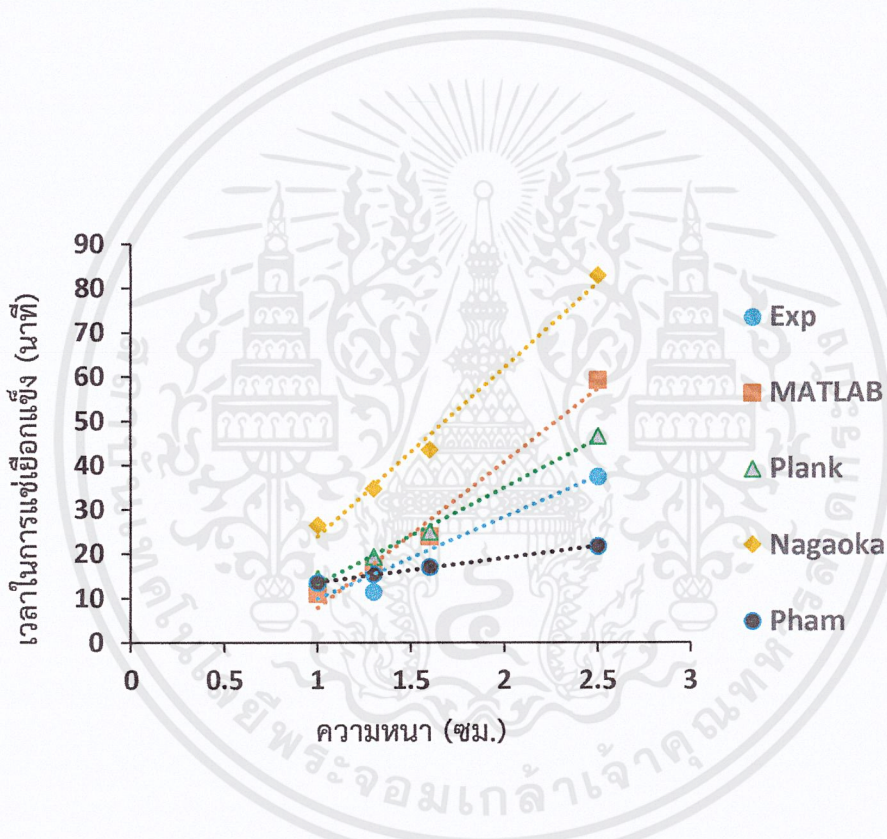
รูปที่ 4.9 กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาจากการทดลองและการทำนายในการแช่เยือกแข็งสแตงกวาความหนา 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงเวลาในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศสแตงกวาที่ความหนาต่างๆที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

ตารางที่ 4.1 แสดงการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งแตงกวาแบบสุญญากาศด้วยวิธีต่างๆ

| ความหนา<br>แตงกวา (ซม.) | เวลาในการแช่<br>เยือกแข็ง (นาที) | เวลาในการทำนาย (นาที) |       |         |       |
|-------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------|---------|-------|
|                         |                                  | MATLAB                | Plank | Nagaoka | Pham  |
| 1                       | 11.5                             | 11                    | 14.44 | 26.54   | 13.49 |
| 1.3                     | 11.5                             | 16.66                 | 19.43 | 34.84   | 15.47 |
| 1.6                     | 24                               | 14.01                 | 25.1  | 43.59   | 17.11 |
| 2.5                     | 37.5                             | 59.3                  | 46.79 | 82.96   | 21.85 |



รูปที่ 4.11 กราฟเวลาที่ทำนายในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศแตงกวาที่ความหนาต่างๆด้วยวิธีต่างๆ

#### 4.3 ค่าความผิดพลาดจากการทำนาย

ตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งแตงกวาแบบสุญญากาศด้วยโปรแกรม MATLAB

| ความหนา<br>แตงกวา (ซม.) | อุณหภูมิเริ่มต้น<br>(องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิตั้ง<br>(องศาเซลเซียส) | เวลาในการแช่<br>เยือกแข็ง (นาท) | เวลาในการ<br>ทำนาย (นาท) | ค่าความ<br>ผิดพลาด (%) |
|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1                       | 25.4                               | -36.7                          | 11.5                            | 11                       | -4.35                  |
| 1.3                     | 23.8                               | -37.5                          | 11.5                            | 16.66                    | 44.87                  |
| 1.6                     | 21.8                               | -37.7                          | 24                              | 24.01                    | 0.04                   |
| 2.5                     | 23.1                               | -36.52                         | 37.5                            | 59.3                     | 58.13                  |

#### 4.4 การคำนวณค่าไฟฟ้า

ตารางที่ 4.3 แสดงการคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งจากการทดลอง

| Thickness<br>(cm) | I<br>(Amp) | V<br>(Volt) | Power<br>(kW) | freezing time<br>(sec) | kWh unit | Cost (Baht) |
|-------------------|------------|-------------|---------------|------------------------|----------|-------------|
| 1                 | 3.53       | 220         | 0.6213        | 690                    | 0.1191   | 0.6905      |
| 1.3               | 3.28       | 220         | 0.5773        | 690                    | 0.1106   | 0.6416      |
| 1.6               | 3.47       | 220         | 0.6107        | 1440                   | 0.2443   | 1.4164      |
| 2.5               | 3.48       | 220         | 0.6125        | 2250                   | 0.3828   | 2.2196      |

ตารางที่ 4.4 แสดงการประมาณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งจากการทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง

| Thickness<br>(cm) | I (Amp) | V<br>(Volt) | Power<br>(kW) | Prediction freezing<br>time (sec) | kWh unit | Cost (Baht) |
|-------------------|---------|-------------|---------------|-----------------------------------|----------|-------------|
| 1                 | 3.53    | 220         | 0.6213        | 510                               | 0.088    | 0.5103      |
| 1.3               | 3.28    | 220         | 0.5773        | 750                               | 0.1203   | 0.6974      |
| 1.6               | 3.47    | 220         | 0.6107        | 1050                              | 0.1781   | 1.0328      |
| 2.5               | 3.48    | 220         | 0.6125        | 2310                              | 0.3930   | 2.2788      |

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอโปรแกรมที่ใช้ในการทำนายเวลาการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศของแตงกวา โดยใช้วิธีเชิงเลขในการคำนวณโดยใช้ฟังก์ชัน pdepe ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งเหมาะสำหรับการแก้ปัญหาสมการ Partial Differential Equation โดยงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาขนาดความหนาของแตงกวาที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการใช้โปรแกรมทำนายเวลามีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยที่สุดเท่ากับ 0.04% และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 58.13 % โดยเวลาที่ได้จากการทำนายส่วนใหญ่มากกว่าเวลาที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย โดยเฉพาะที่ความหนา 2.5 เซนติเมตร ที่เวลาที่ได้จากการทำนายนั้นมากกว่าเวลาที่ได้จากการทดลองมาก และมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุด ซึ่งอาจเป็นเพราะการ แช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศนั้นทำได้รวดเร็วกว่าการแช่เยือกแข็งที่ความดันบรรยากาศ และในการทำเวลานี้ไม่ได้คำนึงถึงการพาความร้อนจึงอาจส่งผลให้เวลาที่ทำนายมากกว่าเวลาที่ใช้ในการทดลอง และมีการทำนายเวลาโดยใช้วิธีอื่นๆเพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบ พบว่าการทำนายเวลาด้วยวิธีเชิงเลขมีความแม่นยำสูงกว่า โดยสมการของ Plank และ Nagaoka ได้เวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งมากกว่าการทดลอง และสมการของ Pham ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งได้ใกล้เคียงมากกว่า โดยเฉพาะที่ความหนาต่ำๆ คือ 1, 1.3 และ 1.6 เซนติเมตร นอกจากนี้การทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งยังสามารถนำไปคำนวณค่าพลังงานที่ต้องใช้เพื่อนำไปประมาณต้นทุนค่าไฟฟ้าได้

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ค่าความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะของแตงกวาที่ใช้คำนวณในโปรแกรมเป็นค่าจากการคำนวณทางทฤษฎี โดยคำนวณจากสัดส่วนองค์ประกอบหลักของแตงกวา หากมีการทดลองหาค่าจริงมาใช้ในการทำนาย โปรแกรมจะมีความแม่นยำมากขึ้น

5.2.2 อาหารที่ใช้ในการทดลองคือแตงกวา ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

5.2.3 อุณหภูมิของเครื่องแช่เยือกแข็งที่ใช้ในการคำนวณเป็นอุณหภูมิเฉลี่ย เนื่องจากเครื่องแช่เยือกแข็งมีอุณหภูมิไม่คงที่

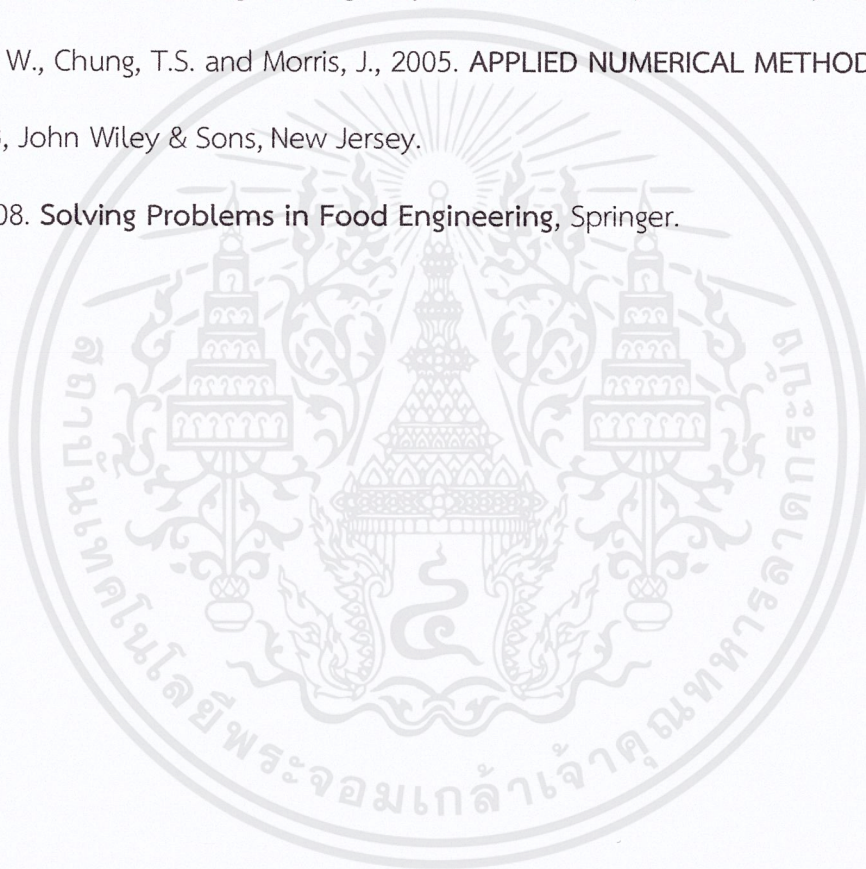
5.2.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำเวลานี้ ไม่ได้คำนึงถึงการพาความร้อน


5.2.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำเวลานี้คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนในทิศทางเดียว

## เอกสารอ้างอิง

- ASHRAE, 2006. **Handbook:Refrigeration (SI)**, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.
- Berk, Z., 2009. **Food Process Engineering and Technology**.
- Cogne, C., Nguyen, P.U., Lanoiselle, J.L., Hecke, E.V. and Clausse, D., 2013. **Modeling heat and mass transfer during vacuum freezing of puree droplet**. International Journal of Refrigeration. 36, 1319-1326.
- Delgado, A.E. and Da-Wen Sun, 2001. **Heat and mass transfer models for predicting freezing processes - a review**. Journal of Food Engineering. 47, 157-174.
- Dima, J.B., Santos, M.V., Baron, P.J., Califano, A. and Zaritzky, N.E. 2014. **Experimental study and numerical modeling of the freezing process of marine products**. Food and Bioproducts Processing. 92, 54-66.
- Evans, J.A., 2008. **Frozen Food Science and Technology**, Blackwell Publishing, UK.
- Fernando Zigunov, Flávia Zinani and Janice da Silva, 2018. **Numerical simulations of food freezing times using thermophysical food property models**. Estudos Tecnológicos em Engenharia. 12(1), 1-13.
- Ferreira, S.R., 2017. **Freezing time of a slab using the method of lines**. International Journal of Refrigeration.
- Frihat, M., Al-Zgoul, B., Radaedeh, J., Al-Rashdan, M. and Al-Frihat, A.H., 2012. **ESTIMATION OF FOOD PRODUCT FREEZING TIME**. Bul. Inst. Polit. Iași, t. 58(62), 40-47.
- Giannakourou, M. and Giannou, V., 2015. **FOOD ENGINEERING HANDBOOK**, CRC Press.
- Heldman, D.R. and Lund, D.B., 2007. **Handbook of food engineering**, 2<sup>nd</sup> edition.

- Mittal, G.S., Hanenian, R. and Mallikarjunan, P., 1993. **Evaluation of freezing time prediction models for meat patties**. Canadian Agricultural Engineering. 35(1), 75-81.
- Pham, Q.T., 2014. **Food Freezing and Thawing Calculations**, Springer.
- Singh, R.P. and Heldman, D.R., 2009. **Introduction to Food Engineering**, Fourth Edition, Elsevier.
- Singh, R.P. and Sarkar, A., 2005. **Engineering Properties of Foods**, Third Edition, CRC Press.
- Yang, W.Y., Cao, W., Chung, T.S. and Morris, J., 2005. **APPLIED NUMERICAL METHODS USING MATLAB**, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Yanniotis, S., 2008. **Solving Problems in Food Engineering**, Springer.





ภาคผนวก ก  
การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำนายเวลาที่ใช้ในการแข่งเยือกแข็งแตงกวาแบบ  
สุญญากาศ

## การเขียนโปรแกรม

```
% Calculate freezing time from pdepe solver function
function MyProject
global L T0 Tf Ta;
display ('Calculate freezing time');
% input parameter
L = input (' Input thickness of food (m) : ');
T0 = input (' Input ininitial temperature (degC) : ');
Tf = input (' Input final temperature (degC) : ');
Ta = input (' Input ambient temperature (degC) : ');

m = 0; % shape factor:slab=0,cylinder=1,sphere=2
x = linspace (0,L,101);
% from 0[upper surface] to L[lower surface] 101 nodes
% upper surface = node1 ,lower surface = node 101
% at center = node 51
t = linspace (0,6000,600);
% calculate from 0 to final time=6000 sec
% time step =10 sec
sol = pdepe (m,@pdex1pde,@pdex1ic,@pdex1bc,x,t);
% function pdepe solve PDE from m,x,t,[c,f,s],initial condition,boundary condition
u = sol (:,:,1);
% u = temperature of food
% u = matrix [600x101]

% plot surface graph
figure;
surf (x,t,u); % A surface plot is often a good way to study a solution.
title ('Temperature (degC)');
xlabel ('x (m)');
```

```

ylabel ('Time (sec)');
% plot Temp-time at center
figure;
plot (t,u(:,51));
title ('Temperature at center (degC)');
xlabel ('Time (sec)');
ylabel ('Temperature (degC)');
fztime = interp1(u(:,51),t,Tf,'linear','extrap'); % find time to reach final temperature
fprintf ('Freezing time (min) = %.2f,fztime/60); % display freezing time in minute
u % display matrix of temp

% local function for find c,f,s
function [c,f,s] = pdex1pde(x,t,u,DuDx)
    if u > -0.5 % -0.5 is initial freezing point of cucumber
        % find specific heat from Choi&Okos
        % specific heat of water ,mass fraction of water in cucumber=96.01%
        cp_m = 0.9601*(4.1289-(9.0864*(10^(-5))*u)+(5.4731*(10^(-6))*(u^2)));
        % specific heat of protein ,mass fraction of protein in cucumber=0.69%
        cp_p = 0.0069*(2.0082+(1.2089*(10^(-3))*u)-(1.3129*(10^(-6))*(u^2)));
        % specific heat of fat ,mass fraction of fat in cucumber=0.13%
        cp_f = (1.9842+(1.4733*(10^(-3))*u)-(4.8008*(10^(-6))*(u^2)))*0.0013;
        % specific heat of carb ,mass fraction of carb in cucumber=2.76%
        cp_c = (1.5488+(1.9625*(10^(-3))*u)-(5.9399*(10^(-6))*(u^2)))*0.0276;
        % specific heat of fiber ,mass fraction of fiber in cucumber=0.8%
        cp_fi = (1.8459+(1.8306 *(10^(-3))*u)-(4.6509*(10^(-6))*(u^2)))*0.008;
        % specific heat of ash ,mass fraction of ash in cucumber=0.41%
        cp_a = (1.0926+(1.8896*(10^(-3))*u)-(3.6817*(10^(-6))*(u^2)))*0.0041;
        % total specific heat
        cp = (cp_m+cp_p+cp_f+cp_c+cp_fi+cp_a)*1000;
        % find density from Choi&Okos

```

% density of water

$$p_m = 0.9601 / ((9.9718 * (10^2)) + (3.1439 * (10^{-3}) * u) - (3.7574 * (10^{-3}) * (u^2)));$$

$$p_p = 0.0069 / ((1.3299 * (10^3)) - (5.184 * 0.1 * u)); \quad \% \text{ density of protein}$$

$$p_f = 0.0013 / ((9.2559 * 100) - (4.1757 * (10^{-1}) * u)); \quad \% \text{ density of fat}$$

$$p_c = 0.0276 / ((1.5991 * 1000) - (3.1046 * 0.1 * u)); \quad \% \text{ density of carb}$$

$$p_{fi} = 0.008 / ((1.3115 * 1000) - (3.6589 * 0.1 * u)); \quad \% \text{ density of fiber}$$

$$p_a = 0.0041 / ((2.4238 * (10^3)) - (2.8063 * 0.1 * u)); \quad \% \text{ density of ash}$$

$$p = 1 / (p_m + p_p + p_f + p_c + p_{fi} + p_a); \quad \% \text{ total density}$$

% find thermal conductivity

$$k_m = ((5.7109 * (10^{-1})) + (1.7625 * (10^{-3}) * u) - (6.7036 * (10^{-6}) * (u^2))) * 0.9601;$$

$$k_p = ((1.7881 * (10^{-1})) + (1.1958 * (10^{-3}) * u) - (2.7178 * (10^{-6}) * (u^2))) * 0.0069;$$

$$k_f = ((1.8071 * (10^{-1})) - (2.7604 * (10^{-4}) * u) - (1.7749 * (10^{-7}) * (u^2))) * 0.0013;$$

$$k_c = ((2.0141 * (10^{-1})) + (1.3874 * (10^{-3}) * u) - (4.3312 * (10^{-6}) * (u^2))) * 0.0276;$$

$$k_{fi} = ((1.8331 * (10^{-1})) + (1.2497 * (10^{-3}) * u) - (3.1683 * (10^{-6}) * (u^2))) * 0.008;$$

$$k_a = ((3.2962 * (10^{-1})) + (1.4011 * (10^{-3}) * u) - (2.9069 * (10^{-6}) * (u^2))) * 0.0041;$$

$$k = k_m + k_p + k_f + k_c + k_{fi} + k_a; \quad \% \text{ total thermal conductivity}$$

% find [c,f,s]

$$c = p * cp / k;$$

$$f = DuDx;$$

$$s = 0;$$

end

if u == -0.5

$$cp = 1000 * (1.55 + (1.26 * 0.04) - ((0.96 - (0.4 * 0.0069)) * 333.6 * (-0.5) / (u^2)));$$

% at u = -0.5 , density of cucumber = 1005.57 , thermal conductivity = 0.5573

$$c = 1005.57 * cp / 0.5573;$$

$$f = DuDx;$$

$$s = 0;$$

end

```

if u < -0.5
% below freezing point ,water convert to ice
% find mass fraction of ice
ice = (1.105*0.9601)/(1+(0.7138/log(0.5-u)));
% find density
p_m = (0.9601-ice)/((9.9718*(10^2))+3.1439*(10^(-3))*u-(3.7574 *(10^(-3))*(u^2)));
p_i = ice/((9.1689*100)-(1.3071*0.1*u)); % density of ice
p_p = 0.0069/((1.3299*(10^3))-(5.184*0.1*u));
p_f = 0.0013/((9.2559*100)-(4.1757*(10^(-1))*u));
p_c = 0.0276/((1.5991*1000)-(3.1046*0.1*u));
p_fi = 0.008/((1.3115*1000)-(3.6589*0.1*u));
p_a = 0.0041/((2.4238*(10^3))-(2.8063*0.1*u));
p = 1/(p_m+p_i+p_p+p_f+p_c+p_fi+p_a);
% find thermal conductivity
k_m = ((5.7109*(10^(-1)))+(1.7625*(10^(-3))*u)-(6.7036*(10^(-6))*(u^2)))*(0.9601-ice);
k_i = (2.2196-(6.2489*(10^(-3))*u)+(1.0154*(10^(-4))*(u^2)))*ice;
k_p =((1.7881*(10^(-1)))+(1.1958*(10^(-3))*u)-(2.7178*(10^(-6))*(u^2)))*0.0069;
k_f =((1.8071*(10^(-1)))-(2.7604*(10^(-4))*u)-(1.7749*(10^(-7))*(u^2)))*0.0013;
k_c =((2.0141*(10^(-1)))+(1.3874*(10^(-3))*u)-(4.3312*(10^(-6))*(u^2)))*0.0276;
k_fi =((1.8331*(10^(-1)))+(1.2497*(10^(-3))*u)-(3.1683*(10^(-6))*(u^2)))*0.008;
k_a =((3.2962*(10^(-1)))+(1.4011*(10^(-3))*u)-(2.9069*(10^(-6))*(u^2)))*0.0041;
k = k_m +k_i+k_p+k_f+k_c+k_fi+k_a;
% find apparent specific heat
cp = 1000*(1.55+(1.26*0.04)-((0.96-(0.4*0.0069))*333.6*(-0.5)/(u^2)));
c = p*cp/k;
f = DuDx;
s = 0;
end
end

```

```

% local function for initial condition (initial temperature of food)
function u0 = pdex1ic(x)
u0 = T0;
end

% local function for boundary condition
function [pl,q,pr,qr] = pdex1bc(xl,ul,xr,ur,t)
% l=left boundary (at upper surface) neglect convection
if ul >= -0.5 % ul is temp at upper surface
    k_m = ((5.7109*(10^(-1)))+(1.7625*(10^(-3))*ul)-(6.7036*(10^(-6))*(ul^2)))*0.9601;
    k_p = ((1.7881*(10^(-1)))+(1.1958*(10^(-3))*ul)-(2.7178*(10^(-6))*(ul^2)))*0.0069;
    k_f = ((1.8071*(10^(-1)))-(2.7604*(10^(-4))*ul)-(1.7749*(10^(-7))*(ul^2)))*0.0013;
    k_c = ((2.0141*(10^(-1)))+(1.3874*(10^(-3))*ul)-(4.3312*(10^(-6))*(ul^2)))*0.0276;
    k_fi = ((1.8331*(10^(-1)))+(1.2497*(10^(-3))*ul)-(3.1683*(10^(-6))*(ul^2)))*0.008;
    k_a = ((3.2962*(10^(-1)))+(1.4011*(10^(-3))*ul)-(2.9069*(10^(-6))*(ul^2)))*0.0041;
    k = k_m+k_p+k_f+k_c+k_fi+k_a;
    pl = 0;
    ql = k;
end
if ul < -0.5
    ice = (1.105*0.9601)/(1+(0.7138/log(0.5-ul)));
    k_m = ((5.7109*(10^(-1)))+(1.7625*(10^(-3))*ul)-(6.7036*(10^(-6))*(ul^2)))*(0.9601-ice);
    k_i = (2.2196-(6.2489*(10^(-3))*ul)+(1.0154*(10^(-4))*(ul^2)))*ice;
    k_p = ((1.7881*(10^(-1)))+(1.1958*(10^(-3))*ul)-(2.7178*(10^(-6))*(ul^2)))*0.0069;
    k_f = ((1.8071*(10^(-1)))-(2.7604*(10^(-4))*ul)-(1.7749*(10^(-7))*(ul^2)))*0.0013;
    k_c = ((2.0141*(10^(-1)))+(1.3874*(10^(-3))*ul)-(4.3312*(10^(-6))*(ul^2)))*0.0276;
    k_fi = ((1.8331*(10^(-1)))+(1.2497*(10^(-3))*ul)-(3.1683*(10^(-6))*(ul^2)))*0.008;
    k_a = ((3.2962*(10^(-1)))+(1.4011*(10^(-3))*ul)-(2.9069*(10^(-6))*(ul^2)))*0.0041;
    k = k_m + k_i+k_p+k_f+k_c+k_fi+k_a;
    pl = 0;

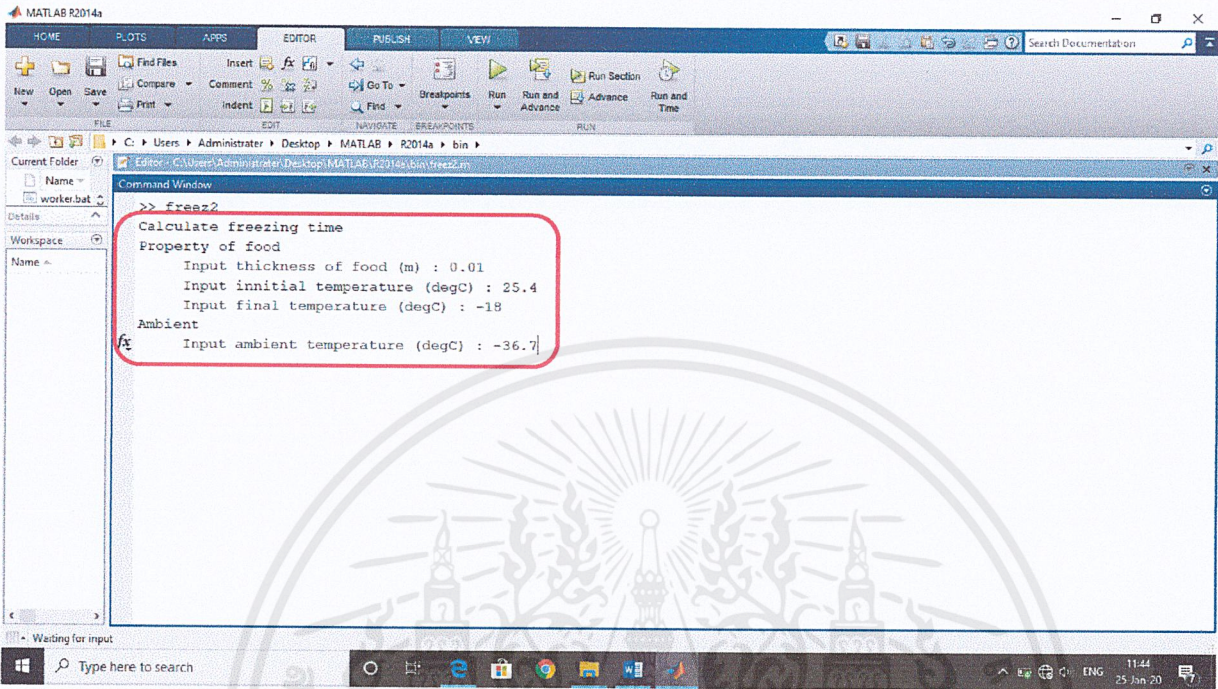
```

```

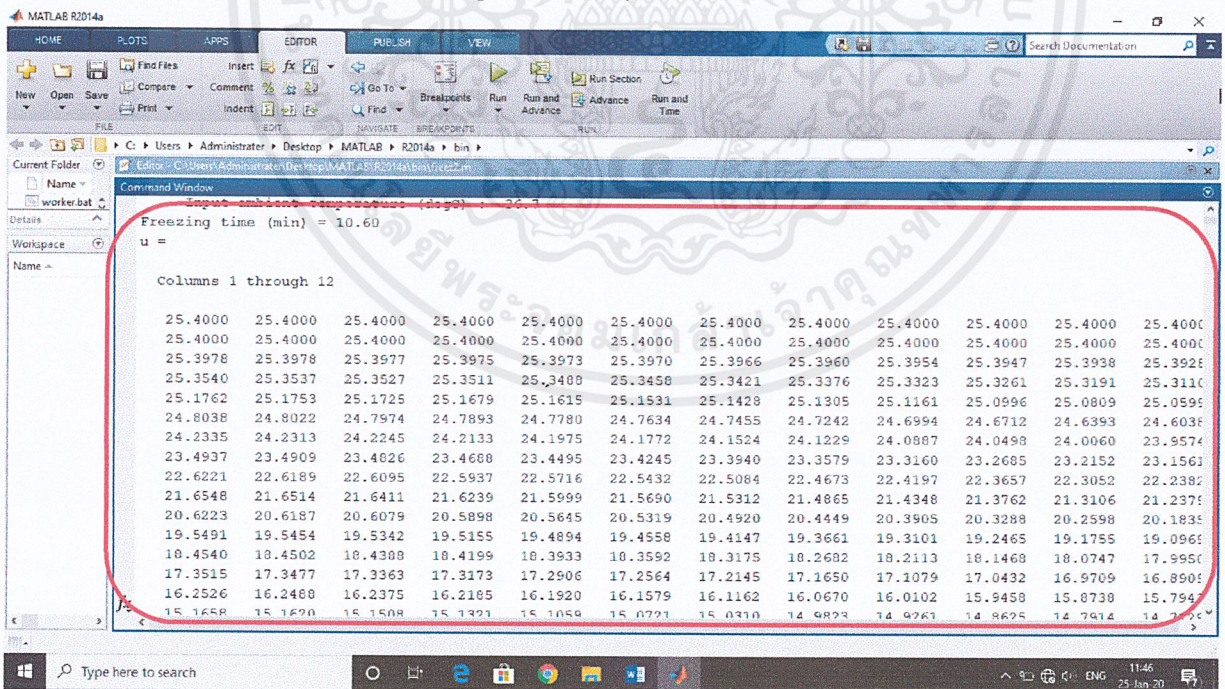
    ql = k;
end
% r=right boundary (at lower surface)
if ur >= -0.5 % ur is temp at lower surface contact chamber
    k_m = ((5.7109*(10^(-1)))+(1.7625*(10^(-3))*ur)-(6.7036*(10^(-6))*(ur^2)))*0.9601;
    k_p = ((1.7881*(10^(-1)))+(1.1958*(10^(-3))*ur)-(2.7178*(10^(-6))*(ur^2)))*0.0069;
    k_f = ((1.8071*(10^(-1)))-(2.7604*(10^(-4))*ur)-(1.7749*(10^(-7))*(ur^2)))*0.0013;
    k_c = ((2.0141*(10^(-1)))+(1.3874*(10^(-3))*ur)-(4.3312*(10^(-6))*(ur^2)))*0.0276;
    k_fi = ((1.8331*(10^(-1)))+(1.2497*(10^(-3))*ur)-(3.1683*(10^(-6))*(ur^2)))*0.008;
    k_a = ((3.2962*(10^(-1)))+(1.4011*(10^(-3))*ur)-(2.9069*(10^(-6))*(ur^2)))*0.0041;
    k = k_m+k_p+k_f+k_c+k_fi+k_a;
    % for conduction freezing
    pr = -2.6*(Ta-ur)/0.001; % thermal conductivity of ice at -37 degC is 2.6 W/mK
    qr = k;
end
if ur < -0.5
    ice = (1.105*0.9601)/(1+(0.7138/log(0.5-ur)));
    k_m = ((5.7109*(10^(-1)))+(1.7625*(10^(-3))*ur)-(6.7036*(10^(-6))*(ur^2)))*(0.9601-ice);
    k_i = (2.2196-(6.2489*(10^(-3))*ur)+(1.0154*(10^(-4))*(ur^2)))*ice;
    k_p = ((1.7881*(10^(-1)))+(1.1958*(10^(-3))*ur)-(2.7178*(10^(-6))*(ur^2)))*0.0069;
    k_f = ((1.8071*(10^(-1)))-(2.7604*(10^(-4))*ur)-(1.7749*(10^(-7))*(ur^2)))*0.0013;
    k_c = ((2.0141*(10^(-1)))+(1.3874*(10^(-3))*ur)-(4.3312*(10^(-6))*(ur^2)))*0.0276;
    k_fi = ((1.8331*(10^(-1)))+(1.2497*(10^(-3))*ur)-(3.1683*(10^(-6))*(ur^2)))*0.008;
    k_a = ((3.2962*(10^(-1)))+(1.4011*(10^(-3))*ur)-(2.9069*(10^(-6))*(ur^2)))*0.0041;
    k = k_m +k_i+k_p+k_f+k_c+k_fi+k_a;
    pr = -2.6*(Ta-ur)/0.001;
    qr = k;
end
end
end
end

```

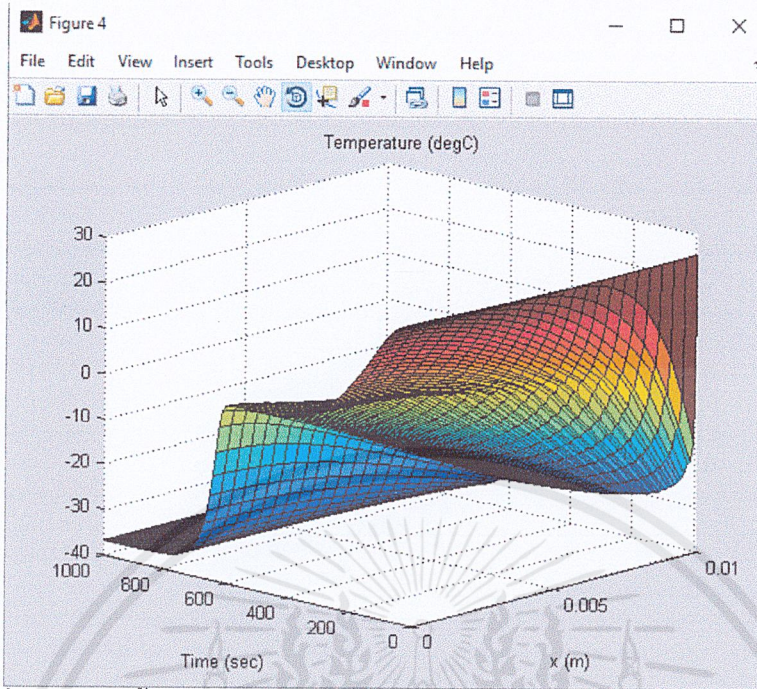
## การรันโปรแกรม



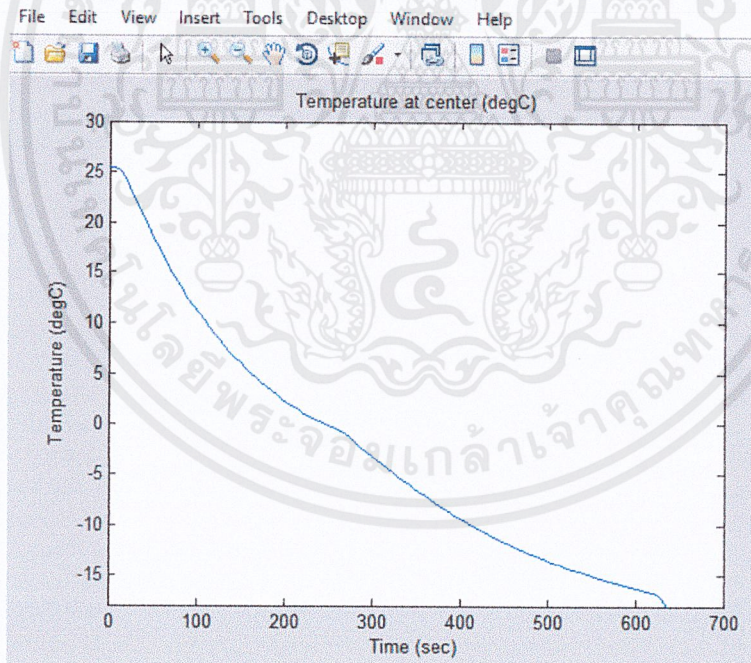
## รูปที่ 1ก อินพุตค่าตัวแปร



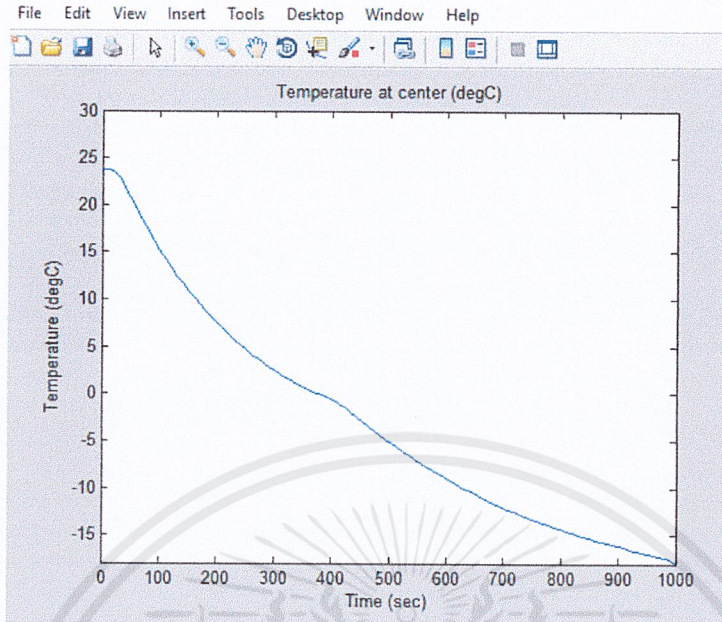
## รูปที่ 2ก โปรแกรมแสดงเวลาในการแช่เยือกแข็งและเมตริกซ์ของอุณหภูมิ



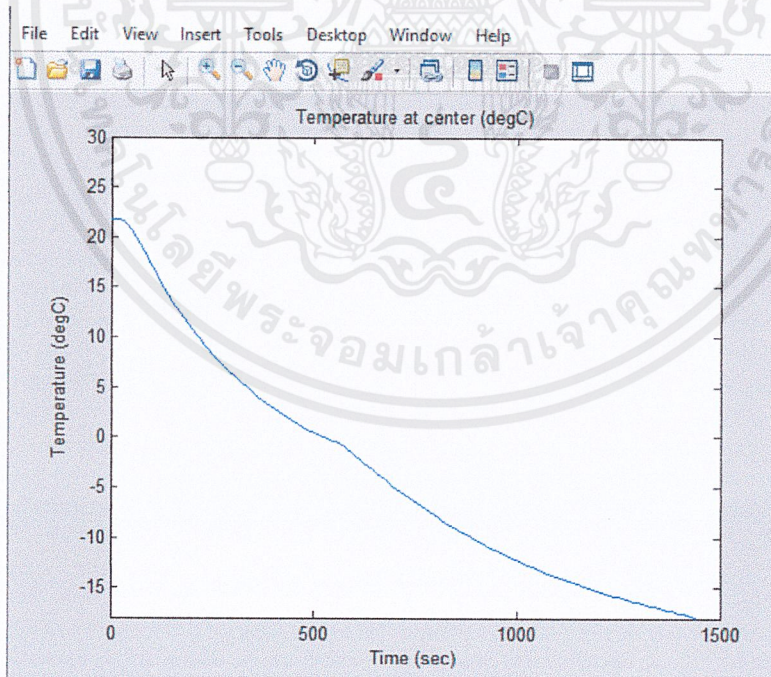
รูปที่ 3ก กราฟพื้นผิวแสดงอุณหภูมิที่ระยะต่างๆในทิศทางความหนาและเวลา



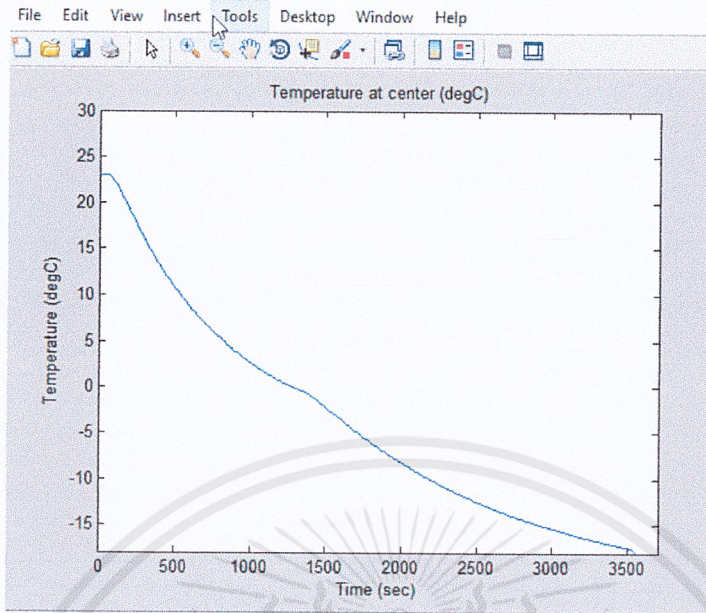
รูปที่ 4ก กราฟแสดงการทำนายอุณหภูมิที่เวลาต่างๆที่จุดกึ่งกลางแตงกว่าความหนา 1 เซนติเมตร ด้วยโปรแกรมMATLAB



รูปที่ 5ก กราฟแสดงการทำนายอุณหภูมิที่เวลาต่างๆที่จุดกึ่งกลางแดงกว่าความหนา 1.3 เซนติเมตร ด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 6ก กราฟแสดงการทำนายอุณหภูมิที่เวลาต่างๆที่จุดกึ่งกลางแดงกว่าความหนา 1.6 เซนติเมตร ด้วยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 7ก กราฟแสดงการทำนายอุณหภูมิที่เวลาต่างๆที่จุดกึ่งกลางแท่งกว่าความหนา 2.5 เซนติเมตร ด้วยโปรแกรม MATLAB



ตารางที่ 1 ข แสดงเวลา อุณหภูมิอาหาร และอุณหภูมิดังในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศของแตงกวาหนา 1 เซนติเมตร

| เวลา (วินาที) | อุณหภูมิอาหาร | อุณหภูมิดัง | กระแสไฟฟ้า |
|---------------|---------------|-------------|------------|
| 0             | 25.4          | -35         | 3.61       |
| 30            | 17.9          | -34.9       | 3.62       |
| 60            | 12.6          | -35.5       | 3.58       |
| 90            | 8.3           | -35.7       | 3.52       |
| 120           | 4.7           | -36         | 3.62       |
| 150           | 1.7           | -36.3       | 3.65       |
| 180           | -0.4          | -36.5       | 3.73       |
| 210           | -0.9          | -36.7       | 3.58       |
| 240           | -0.9          | -36.8       | 3.56       |
| 270           | -0.9          | -36.9       | 3.6        |
| 300           | -1.1          | -37         | 3.69       |
| 330           | -2.8          | -37.1       | 3.72       |
| 360           | -5            | -37.2       | 3.48       |
| 390           | -7.7          | -37.2       | 3.46       |
| 420           | -9.4          | -36.9       | 3.51       |
| 450           | -10.8         | -37.1       | 3.55       |
| 480           | -11.9         | -37.4       | 3.52       |
| 510           | -12.9         | -37.6       | 3.41       |
| 540           | -13.9         | -37.6       | 3.43       |
| 570           | -15.1         | -37.6       | 3.5        |
| 600           | -16.1         | -37.5       | 3.55       |
| 630           | -16.9         | -37.4       | 3.42       |
| 660           | -17.5         | -37.3       | 3.44       |
| 690           | -18           | -37.2       | 3.46       |
| เฉลี่ย        |               | -36.7       | 3.53       |

ตารางที่ 2ข แสดงเวลา อุณหภูมิอาหาร และอุณหภูมิถึงในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศของแตงกวาหนา 1.3 เซนติเมตร

| เวลา (วินาที) | อุณหภูมิอาหาร | อุณหภูมิจึง | กระแสไฟฟ้า |
|---------------|---------------|-------------|------------|
| 0             | 23.8          | -35.8       | 3.34       |
| 30            | 21.4          | -35.4       | 3.34       |
| 60            | 16.6          | -35.6       | 3.34       |
| 90            | 11.2          | -36         | 3.37       |
| 120           | 7.3           | -36.3       | 3.26       |
| 150           | 3.8           | -36.6       | 3.31       |
| 180           | 1.1           | -36.8       | 3.31       |
| 210           | -0.3          | -37.1       | 3.38       |
| 240           | -0.9          | -37.2       | 3.26       |
| 270           | -1            | -37.7       | 3.24       |
| 300           | -1.5          | -37.5       | 3.26       |
| 330           | -2.5          | -37.7       | 3.32       |
| 360           | -4            | -37.8       | 3.35       |
| 390           | -6.5          | -37.8       | 3.2        |
| 420           | -8.8          | -38.1       | 3.18       |
| 450           | -10.5         | -38.3       | 3.2        |
| 480           | -11.9         | -38.6       | 3.26       |
| 510           | -13.1         | -38.7       | 3.3        |
| 540           | -14.1         | -38.8       | 3.31       |
| 570           | -15.2         | -38.8       | 3.19       |
| 600           | -16.2         | -38.8       | 3.23       |
| 630           | -17.1         | -38.8       | 3.26       |
| 660           | -17.6         | -38.7       | 3.35       |
| 690           | -18.1         | -38.6       | 3.2        |
| เฉลี่ย        |               | -37.6       | 3.28       |

ตารางที่ 3ข แสดงเวลา อุณหภูมิอาหาร และอุณหภูมิตั้งในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศของแตงกวาหนา 1.6 เซนติเมตร

| เวลา (วินาที) | อุณหภูมิอาหาร | อุณหภูมิตั้ง | กระแสไฟฟ้า |
|---------------|---------------|--------------|------------|
| 0             | 21.8          | -36.1        | 3.53       |
| 30            | 17.6          | -35.8        | 3.53       |
| 60            | 13.8          | -36.2        | 3.55       |
| 90            | 10.8          | -36.5        | 3.56       |
| 120           | 8.3           | -36.8        | 3.56       |
| 150           | 6.1           | -37          | 3.56       |
| 180           | 4.4           | -37.2        | 3.56       |
| 210           | 2.9           | -37.4        | 3.55       |
| 240           | 1.6           | -37.6        | 3.51       |
| 270           | 0.7           | -37.7        | 3.51       |
| 300           | 0.2           | -37.8        | 3.57       |
| 330           | -0.1          | -37.8        | 3.58       |
| 360           | -0.4          | -37.9        | 3.49       |
| 390           | -0.5          | -38          | 3.5        |
| 420           | -0.7          | -38          | 3.5        |
| 450           | -0.6          | -38.1        | 3.61       |
| 480           | -0.7          | -38.2        | 3.53       |
| 510           | -1            | -38.3        | 3.5        |
| 540           | -1.9          | -38.2        | 3.55       |
| 570           | -3.1          | -38.3        | 3.6        |
| 600           | -4.1          | -38.4        | 3.59       |
| 630           | -5.2          | -38.4        | 3.5        |
| 660           | -6.5          | -38.4        | 3.57       |
| 690           | -7.6          | -38.8        | 3.47       |
| 720           | -8.5          | -39.1        | 3.45       |
| 750           | -9.2          | -39.2        | 3.35       |
| 780           | -10           | -39.2        | 3.37       |

| เวลา (วินาที) | อุณหภูมิอาหาร | อุณหภูมิถัง | กระแสไฟฟ้า |
|---------------|---------------|-------------|------------|
| 810           | -11           | -39.2       | 3.42       |
| 840           | -12           | -39.1       | 3.49       |
| 870           | -12.7         | -39         | 3.47       |
| 900           | -13.2         | -38.9       | 3.41       |
| 930           | -13.6         | -38.8       | 3.41       |
| 960           | -13.9         | -38.6       | 3.45       |
| 990           | -14.2         | -38.4       | 3.5        |
| 1020          | -14.5         | -38.2       | 3.39       |
| 1050          | -14.8         | -38         | 3.41       |
| 1080          | -15.1         | -37.7       | 3.44       |
| 1110          | -15.4         | -37.7       | 3.49       |
| 1140          | -15.6         | -37.5       | 3.44       |
| 1170          | -15.9         | -37.4       | 3.44       |
| 1200          | -16           | -37.3       | 3.43       |
| 1230          | -16.3         | -37.2       | 3.47       |
| 1260          | -16.5         | -37.1       | 3.47       |
| 1290          | -16.7         | -37.1       | 3.4        |
| 1320          | -17           | -37         | 3.45       |
| 1350          | -17.3         | -36.9       | 3.48       |
| 1380          | -17.7         | -36.9       | 3.51       |
| 1410          | -17.9         | -36.7       | 3.45       |
| 1440          | -18.4         | -36.7       | 3.27       |
| เฉลี่ย        |               | -37.8       | 3.49       |

ตารางที่ 4ข แสดงเวลา อุณหภูมิอาหาร และอุณหภูมิตั้งในการแช่เยือกแข็งแบบสุญญากาศของแตงกวาหนา 2.5 เซนติเมตร

| เวลา (วินาที) | อุณหภูมิอาหาร | อุณหภูมิตั้ง | กระแสไฟฟ้า |
|---------------|---------------|--------------|------------|
| 0             | 23.1          | -33.7        | 3.5        |
| 30            | 21.1          | -34          | 3.5        |
| 60            | 20            | -34.3        | 3.46       |
| 90            | 18.4          | -34.6        | 3.46       |
| 120           | 16.8          | -34.8        | 3.49       |
| 150           | 15.2          | -35          | 3.55       |
| 180           | 13.7          | -35.2        | 3.6        |
| 210           | 12.4          | -35.3        | 3.49       |
| 240           | 11            | -35.5        | 3.43       |
| 270           | 9.7           | -35.7        | 3.46       |
| 300           | 8.6           | -35.7        | 3.46       |
| 330           | 7.5           | -35.8        | 3.54       |
| 360           | 6.5           | -35.9        | 3.43       |
| 390           | 5.4           | -36          | 3.45       |
| 420           | 4.4           | -36          | 3.48       |
| 450           | 3.4           | -36.1        | 3.5        |
| 480           | 2.5           | -36.1        | 3.52       |
| 510           | 1.6           | -36.2        | 3.44       |
| 540           | 0.8           | -36.5        | 3.46       |
| 570           | 0             | -36.3        | 3.47       |
| 600           | -0.6          | -36.3        | 3.55       |
| 630           | -1.1          | -36.2        | 3.54       |
| 660           | -1.6          | -36.4        | 3.56       |
| 690           | -2            | -36.3        | 3.53       |
| 720           | -2.5          | -36.4        | 3.55       |
| 750           | -2.9          | -36.4        | 3.59       |
| 780           | -3.2          | -36.5        | 3.65       |

| เวลา (วินาที) | อุณหภูมิอาหาร | อุณหภูมิถัง | กระแสไฟฟ้า |
|---------------|---------------|-------------|------------|
| 810           | -3.3          | -36.4       | 3.52       |
| 840           | -3.6          | -36.4       | 3.55       |
| 870           | -3.7          | -36.5       | 3.58       |
| 900           | -3.8          | -36.6       | 3.63       |
| 930           | -3.9          | -36.5       | 3.68       |
| 960           | -4.2          | -36.5       | 3.57       |
| 990           | -4.3          | -36.5       | 3.57       |
| 1020          | -4.4          | -36.6       | 3.59       |
| 1050          | -4.7          | -36.7       | 3.64       |
| 1080          | -4.9          | -36.6       | 3.65       |
| 1110          | -5.1          | -36.7       | 3.55       |
| 1140          | -5.3          | -36.7       | 3.54       |
| 1170          | -5.6          | -36.7       | 3.59       |
| 1200          | -5.8          | -36.7       | 3.63       |
| 1230          | -6.1          | -36.9       | 3.67       |
| 1260          | -6.5          | -37         | 3.45       |
| 1290          | -7            | -37.2       | 3.42       |
| 1320          | -7.4          | -37.5       | 3.48       |
| 1350          | -7.6          | -37.5       | 3.5        |
| 1380          | -7.9          | -37.3       | 3.52       |
| 1410          | -8.1          | -37.3       | 3.44       |
| 1440          | -8.4          | -37.2       | 3.43       |
| 1470          | -8.6          | -37.1       | 3.46       |
| 1500          | -9            | -36.9       | 3.4        |
| 1530          | -9.2          | -36.8       | 3.47       |
| 1560          | -9.4          | -36.8       | 3.37       |
| 1590          | -9.5          | -36.8       | 3.34       |
| 1620          | -9.6          | -36.8       | 3.38       |
| 1650          | -9.8          | -36.8       | 3.4        |

| เวลา (วินาที) | อุณหภูมิอาหาร | อุณหภูมิดัง | กระแสไฟฟ้า |
|---------------|---------------|-------------|------------|
| 1680          | -10           | -36.9       | 3.46       |
| 1710          | -10.1         | -36.9       | 3.42       |
| 1740          | -10.3         | -36.9       | 3.32       |
| 1770          | -10.4         | -37         | 3.37       |
| 1800          | -10.5         | -37         | 3.39       |
| 1830          | -10.7         | -37         | 3.4        |
| 1860          | -10.8         | -37.1       | 3.41       |
| 1890          | -11           | -37.1       | 3.33       |
| 1920          | -11.2         | -37.1       | 3.37       |
| 1950          | -11.4         | -37.2       | 3.38       |
| 1980          | -11.6         | -37.2       | 3.34       |
| 2010          | -11.7         | -37.3       | 3.45       |
| 2040          | -12.1         | -37.3       | 3.34       |
| 2070          | -12.6         | -37.4       | 3.33       |
| 2100          | -13.4         | -37.4       | 3.39       |
| 2130          | -14.3         | -37.4       | 3.4        |
| 2160          | -15.2         | -37.4       | 3.45       |
| 2190          | -16.3         | -37.6       | 3.5        |
| 2220          | -17.2         | -37.5       | 3.48       |
| 2250          | -18.2         | -37.5       | 3.45       |
| เฉลี่ย        |               | -36.5       | 3.48       |