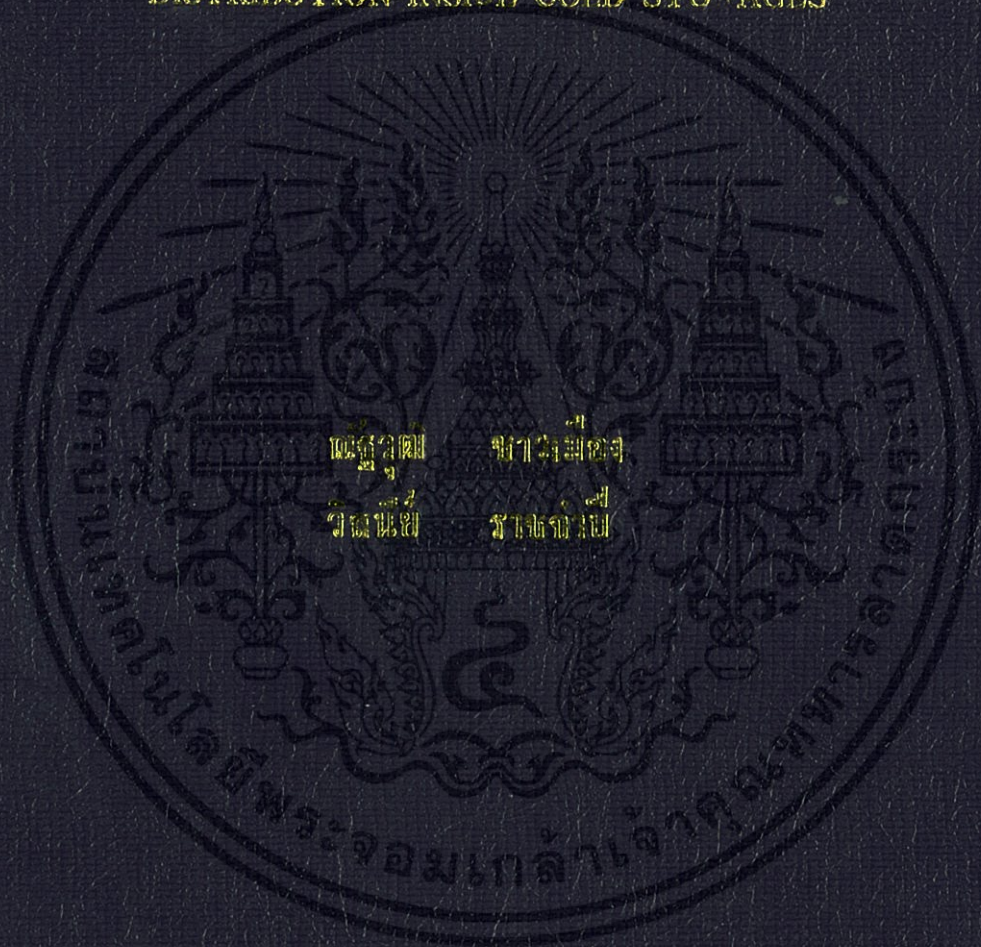


“โครงการพัฒนาประเทศไทยสู่ยุคไร้พรมแดน”
การวิจัยในรูปปริศนาคำถามวิทยาศาสตร์

STUDY OF HEAT TRANSFER AND TEMPERATURE
DISTRIBUTION INSIDE COLD STORAGE



ดร.สุวิทย์ งามพิชัย
วิวัฒน์ งามพิชัย

ปริญญาเอกที่พนมเปญเป็นส่วนตัวนี้มาจากการศึกษาหาหนทางต่อที่บุตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคานาครุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการกระจายอุณหภูมิ
ภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็น

STUDY OF HEAT TRANSFER AND TEMPERATURE
DISTRIBUTION INSIDE COLD STORAGE



ณัฐวุฒิ ชาวเมือง
วิสนีย์ ราชจำปี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2555

STUDY OF HEAT TRANSFER AND TEMPERATURE DISTRIBUTION INSIDE COLD STORAGE

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a circular emblem. It features a central five-tiered umbrella (parasol) with a sunburst above it. The emblem is flanked by two traditional Thai lamps (Lampang) on stands. The entire design is surrounded by a circular border containing the Thai text 'สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง'.

**NATTAWUT CHAOMUANG
WISANEE RATCHAMPEE**

**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF BECHELOR OF ENGINEERING IN
FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY
LADKRABANG**

ACADEMIC YESR 2012

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการกระจายอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็น

STUDY OF HEAT TRANSFER AND TEMPERATURE DISTRIBUTION INSIDE COLD
STORAGES

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐวุฒิ ชาวเมือง รหัสนักศึกษา 52010363
2. นางสาววิสนีย์ ราชจำปี รหัสนักศึกษา 52011142



(ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์)
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการกระจายอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็น
นักศึกษา	นายณัฐวุฒิ ชาวเมือง นางสาววิสนีย์ ราชจำปี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและทำนายอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นที่ใช้ในแผงค้ำอาหารทั่วไปซึ่งประกอบด้วยตู้เย็นและถังน้ำแข็ง สำหรับตู้เย็นเลือกใช้ตู้เย็นชนิดสองประตูที่มีช่องแช่แข็งด้านบนและถังน้ำแข็งใช้ถังน้ำแข็งพลาสติกโดยใช้น้ำแข็งบดเป็นแหล่งให้ความเย็น ในการศึกษาได้ทดลองวัดค่าอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ภายใต้สภาวะที่เป็นอุปกรณ์เปล่าและที่มีการบรรจุโหลดแล้วเปรียบเทียบกับผลการทำนายอุณหภูมิจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยตู้เย็นได้กำหนดลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเป็นแบบการนำความร้อนและการพาความร้อน ขณะที่ภายในถังน้ำแข็งกำหนดลักษณะการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ได้รวบรวมแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาอาหารประเภทเนื้อและผักบางชนิดโดยนำแบบจำลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา มาดัดแปลงให้อยู่ในรูปแบบง่าย เพื่อประโยชน์ในการทำนายอายุการเก็บรักษาอาหาร จากการศึกษาพบว่าค่าอุณหภูมิภายในตู้เย็นจากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ในขณะที่ถังน้ำแข็งค่าจากการทำนายมีค่าสูงกว่าค่าจากการทดลอง โดยจากการทดลองอุณหภูมิภายในตู้เย็นและถังน้ำแข็งเปล่าอยู่ในช่วง $0 - 5^{\circ}\text{C}$ และ $0 - 8^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ทั้งนี้ขึ้นกับตำแหน่งภายในอุปกรณ์ ดังนั้นการจัดวางอาหารแต่ละชนิดภายในอุปกรณ์ในตำแหน่งที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเก็บรักษาอาหารให้อยู่ภายใต้เกณฑ์ความปลอดภัยทางอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	Study of Heat Transfer and Temperature Distribution inside Cold Storages
Students	Mr. Nattawut CHAOMUANG Miss Wisanee RATCHAMPEE
Project Advisor	Asst.Prof.Dr.Maradee PHONGPIPATPONG
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Food Engineering
Academic Year	2012

ABSTRACT

This project was the study of heat transfer mechanisms and the prediction of air temperature profiles inside cold storages used in Thai food vendors. The cold storages, including domestic refrigerators and ice boxes, were chosen for analysis. For the refrigerator it was a two-door refrigerator with top freezer (a frost-free refrigerator) and for the ice box it was a plastic ice box containing crushed ice as cold medium. The experiments were carried out to determine the temperature distribution inside the storages for food safety. The studied conditions were divided into two conditions: empty and loaded storage conditions. The comparison between the experimental results and the prediction results from computer simulation with Computational Fluid Dynamics (CFD) software were conducted. The assumption of simulation was based on conduction and natural convection of heat transfer mechanisms for the refrigerator while the conductive heat transfer was assumed for the ice box. Moreover the shelf-life models of foods were gathered from previous studies and were simplified for ease to evaluate in this study. The results showed that temperature profiles from the experiment and the prediction were well correlated for the refrigeration unit, whereas the results of the prediction from simulation for the ice box provided over estimation results. The study also indicated that the temperature inside the refrigerator and the ice box were in range of 0 – 5°C and 0 – 8°C respectively depending on the location level inside the storage. The proper location to keep foods in the cold storages was considered as the important factor to control food safety standard.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอแสดงความขอบพระคุณอย่างสูงต่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ ซึ่งเป็นบุคคลที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่ให้คำปรึกษา แนะนำ ตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และให้ความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างมากต่อปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ตลอดจนความห่วงใยที่อาจารย์มอบให้ตลอดระยะเวลาการทำโครงการงาน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อใช้ประกอบในการทำโครงการงานเรื่องนี้

ขอขอบคุณ บริษัท โตชิบา คอนซูมเมอร์ โปรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด สวณอุตสาหกรรม บางกะดี อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี ที่ให้ความกรุณาในการเข้าเยี่ยมชมสายการผลิตตู้เย็นและเอื้อเพื่อข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างภายในตู้เย็นชนิดสองประตูที่มีช่องแช่แข็งด้านบน

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่าน เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนเพื่อนสมาชิกสาขาวิชาวิศวกรรมอาหารและเพื่อนร่วมสถาบันฯทุกคน ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความอนุเคราะห์ในด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำโครงการงานเล่มนี้

ขอขอบพระคุณบิดามารดาซึ่งเป็นผู้ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษา และเป็นกำลังใจในด้านต่างๆมาโดยตลอดระยะเวลาการศึกษาในสถาบันแห่งนี้

สุดท้ายนี้สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์เล่มนี้ คณะผู้ทำโครงการงานขอมอบให้แก่บิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์อันมีค่าเสมอมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	IX

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม	3
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับร้านอาหาร	3
2.2 การเก็บรักษาอาหารด้วยความเย็น	3
2.2.1 วิธีการเก็บรักษาอาหารสำหรับอาหารแต่ละประเภทด้วยความเย็น	4
2.3 อุปกรณ์การเก็บรักษาความเย็น (Cold Storage System)	5
2.3.1 ตู้เย็น (Domestic refrigerator)	6
2.3.2 ถังน้ำแข็ง (Ice boxes)	7
2.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	8
2.4.1 การนำความร้อน (Conduction)	8
2.4.2 การพาความร้อน (Convection)	9
2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)	14
2.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์	15
2.5.1 การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันของโครงการ (Present worth analysis)	15
2.5.2 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนระหว่าง 2 ทางเลือก (Breakeven analysis)	15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.6.1 การศึกษาเชิงสำรวจเกี่ยวกับอุณหภูมิการใช้งานของตู้เย็นระดับครัวเรือน	16
2.6.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในตู้เย็นชนิดหนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบน	16
2.6.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในตู้เย็นชนิดสองประตูที่มีช่องแช่แข็งด้านบน	18

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	19
---------------------------------	----

3.1 การสำรวจ	19
3.1.1 แบบสอบถาม	19
3.1.2 ขอบเขตการสำรวจ	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการสำรวจ	21
3.1.4 วิธีการสำรวจ	21
3.2 การทดลอง	21
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง	21
3.2.2 วิธีการทดลอง	22
3.3 การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CFD)	25
3.3.1 สมมติฐานการจำลอง	25
3.3.2 ขอบเขตการจำลอง	25
บทที่ 4 ผลการสำรวจ	27
4.1 การสำรวจ	27
4.1.1 ประเภทของแผงค้ำอาหาร	27
4.1.2 ประเภทอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นของแผงค้ำอาหาร	27
4.1.3 ตู้เย็น (Refrigerator)	28
4.1.4 ถังน้ำแข็ง (Ice box)	32
4.1.5 สรุปผลการสำรวจ	36
4.2 การรวบรวมและดัดแปลงแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาอาหาร	37
4.2.1 เนื้อวัว (Beef)	37
4.2.2 เนื้อหมู (Pork)	40
4.2.3 เนื้อไก่ (Poultry)	43
4.2.4 เนื้อปลา (Fresh fish)	46
4.2.5 ผักสด (Fresh vegetables)	49
4.2.6 ผักสลัด (Salad vegetables)	53
4.2.7 สรุปผลการรวบรวมและดัดแปลงแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาอาหาร	55
บทที่ 5 ผลการทดลอง	61
5.1 ตู้เย็น	61
5.1.1 การไหลของอากาศภายในตู้เย็น	61
5.1.2 การกระจายอุณหภูมิภายในตู้เย็นเปล่า (Empty refrigerator)	62
5.1.3 การกระจายอุณหภูมิภายในตู้เย็นบรรจุโหลด (Loaded refrigerator)	69
5.1.4 การจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในตู้เย็น	76
5.2 ถังน้ำแข็ง	81
5.2.1 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่า (Unload ice box)	81
5.2.2 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุโหลด (Loaded ice box)	84
5.2.3 การจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในถังน้ำแข็ง	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ที่นำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ความสามารถการเก็บรักษาอาหาร	93
5.3.1 อัตราการลดลงของอุณหภูมิเนื้อไก่	93
5.3.2 อายุการเก็บรักษาอาหาร	97
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	100
เอกสารอ้างอิง	101
ภาคผนวก	104
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	105
ก.1 อุปกรณ์เก็บรักษาความเย็น	105
ก.2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ	105
ก.3 โพลิบรจออุปกรณ์เก็บรักษาความเย็น	106
ก.3 แบบสอบถามการสำรวจ	106
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการสำรวจ	107
ข.1 ชนิดตู้เย็นจากการสำรวจ	107
ข.2 ตารางบันทึกผลการสำรวจ	108
ภาคผนวก ค การคำนวณอายุการเก็บรักษาอาหาร	114
ค.1 เนื้อวัว	114
ค.2 เนื้อหมู	115
ค.3 เนื้อไก่	117
ค.4 เนื้อปลา	119
ภาคผนวก ง การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายเกลือต่ออุณหภูมิของน้ำแข็ง	8
ตารางที่ 3.1 ขอบเขต (boundary conditions) ของการจำลองการถ่ายความร้อนภายในตู้เย็น	26
ตารางที่ 3.2 ขอบเขต (boundary conditions) ของการจำลองการถ่ายความร้อนภายในถังน้ำแข็ง	26
ตารางที่ 4.1 ระดับอุณหภูมิภายในตู้เย็นเฉลี่ย จำนวน 20 ตู้	29
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายในตู้เย็นจากงานสำรวจประสิทธิภาพการใช้งานตู้เย็นตามครัวเรือนในต่างประเทศ (ที่มา: James et al., 2008)	31
ตารางที่ 4.3 ระดับอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็ง จำนวน 23 ถัง	34
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ต่างๆในแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดสด a	38
ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดสดที่อุณหภูมิในช่วง 2 ถึง 19 องศาเซลเซียส	40
ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูที่อุณหภูมิต่างๆ โดยพิจารณาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์สูงสุด(TVC) ที่ทำให้เนื้อหมูเสื่อมเสียเท่ากับ 7 log CFU/g	42
ตารางที่ 4.7 อายุการเก็บรักษาเนื้ออกไก่คำนวณจากแบบจำลองทำนายอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อ Pseudomonas spp.เปรียบเทียบกับแบบจำลองอย่างง่ายในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 25 องศาเซลเซียส	45
ตารางที่ 4.8 อายุการเก็บรักษาเนื้อปลาสดคั่วที่อุณหภูมิเก็บรักษาในช่วง 0 – 15 องศาเซลเซียส	48
ตารางที่ 4.9 ข้อมูลเชื้อจุลินทรีย์ Psychrotrophic เบื้องต้นเพื่อใช้พิจารณาสร้างสมการความสัมพันธ์	50
ตารางที่ 4.10 อายุการเก็บรักษาผักสดภายใต้บรรจุภัณฑ์ EMA	52
ตารางที่ 4.11 อายุการเก็บรักษาผักสดภายใต้อุณหภูมิต่างๆ จากการประเมิน 3 วิธี	54
ตารางที่ 4.12 แบบจำลองความสัมพันธ์เพื่อทำนายอายุการเก็บรักษาอาหารอย่างง่าย	56
ตารางที่ 4.13 อายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์และผักชนิดต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 0 - 15 องศาเซลเซียส	60
ตารางที่ 5.1 การกระจายอุณหภูมิภายในช่องแช่เย็นแต่ละชั้น ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ	69
ตารางที่ 5.2 การกระจายอุณหภูมิภายในช่องแช่เย็นแต่ละชั้นของตู้เย็นบรรจุหลอดภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ	76
ตารางที่ 5.3 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่า	84
ตารางที่ 5.4 อุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งกรณีบรรจุหลอดและอุณหภูมิเนื้อไก่ที่ระดับความสูง 4 ระดับ	87
ตารางที่ 5.5 อุณหภูมิเฉลี่ยเนื้อไก่บดที่เก็บในแต่ละชั้นของช่องแช่เย็น ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ	95
ตารางที่ 5.6 อุณหภูมิเฉลี่ยเนื้อไก่บดที่เก็บในแต่ละชั้นภายในถังน้ำแข็ง	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 5.7 อายุการเก็บรักษาอาหารภายในตู้เย็นตำแหน่งต่างๆ โดยการประมาณจากแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างอายุการเก็บรักษาอาหารกับอุณหภูมิ	98
ตารางที่ 5.8 อายุการเก็บรักษาอาหารภายในถังก้ำน้ำแข็งตำแหน่งต่างๆ โดยการประมาณจากแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างอายุการเก็บรักษาอาหารกับอุณหภูมิ	99
ตารางที่ ข.1 อุณหภูมิภายในตู้เย็นชนิดหนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบน (One door top freezer: R01) จากการสำรวจ	108
ตารางที่ ข.2 อุณหภูมิภายในตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านล่าง (Two doors bottom freezer: R03) จากการสำรวจ	108
ตารางที่ ข.3 อุณหภูมิภายในตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านบน (Two doors top freezer: R02) จากการสำรวจ	109
ตารางที่ ข.4 อุณหภูมิภายในตู้เย็นชนิดsoหนึ่งประตูกระจก (One glass door: R04) จากการสำรวจ	109
ตารางที่ ข.5 อุณหภูมิภายในตู้เย็นชนิดอื่น (ช่องแช่แข็งด้านข้าง) (Others: R06) จากการสำรวจ	110
ตารางที่ ข.6 อุณหภูมิภายในถังก้ำน้ำแข็งพลาสติก จากการสำรวจ	110
ตารางที่ ข.7 ปริมาตรของถังก้ำน้ำแข็ง และสัดส่วนปริมาณน้ำแข็งภายในถังก้ำน้ำแข็ง	112
ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองอย่างง่าย	114
ตารางที่ ค.2 (1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของแบบจำลองอย่างง่าย (เนื้อวัว)	115
ตารางที่ ค.3 ตัวอย่างการคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูจากแบบจำลองเดิม ที่อุณหภูมิ 10°C	116
ตารางที่ ค.4 (1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของแบบจำลองอย่างง่าย (เนื้อหมู)	116
ตารางที่ ค.5 ตัวอย่างการคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่จากแบบจำลองเดิม อัตราการเจริญเติบโตที่อุณหภูมิ 10°C	117
ตารางที่ ค.6 (1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของแบบจำลองอย่างง่าย (เนื้อไก่)	118
ตารางที่ ค.7 (1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของแบบจำลองอย่างง่าย (เนื้อปลา)	119
ตารางที่ ง.1 สมมติฐานค่าใช้จ่ายในการลงทุนสำหรับตู้เย็นและถังก้ำน้ำแข็ง โดยอุปกรณ์ทั้งสองมีอัตราผลตอบแทน 6% ต่อปี	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ		หน้า
รูปที่ 2.1	ห่วงโซ่ความเย็นในผลิตภัณฑ์อาหาร (Food cold chain)	6
รูปที่ 2.2	วัฏจักรการทำความเย็นโดยทั่วไปของตู้เย็น (Refrigeration system)	7
รูปที่ 2.3	ชั้นขอบเขตสำหรับการพาความร้อนแบบธรรมชาติบนแผ่นเรียบแนวตั้ง	10
รูปที่ 2.4	ของไหลอยู่ระหว่างแผ่นแนวนอนขนาดใหญ่สองแผ่นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ที่มา: Incropera et al., 2007)	11
รูปที่ 2.5	การพาแบบธรรมชาติในช่องสี่เหลี่ยม (ที่มา: Incropera et al., 2007)	12
รูปที่ 3.1	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในตู้เย็น	20
รูปที่ 3.2	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็ง	20
รูปที่ 3.3	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในตู้เย็นเปล่า	22
รูปที่ 3.4	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในตู้เย็นบรรจุหลอด	23
รูปที่ 3.5	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่า	24
รูปที่ 3.6	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุหลอด	24
รูปที่ 4.1	ประเภทของแผงค้ำอาหารจากการสำรวจ จำนวน 80 แผงค้ำ	27
รูปที่ 4.2	ประเภทอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นที่แผงค้ำอาหารเลือกใช้ จำนวน 80 แผงค้ำ	28
รูปที่ 4.3	ชนิดตู้เย็นที่แผงค้ำอาหารเลือกใช้ จำนวน 46 ตู้	28
รูปที่ 4.4	ระดับอุณหภูมิภายในตู้เย็น จำนวน 20 ตู้	30
รูปที่ 4.5	ความแตกต่างของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งภายในตู้เย็นแต่ละชนิด	30
รูปที่ 4.6	ระดับอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งภายในตู้เย็น 3 ชนิด ได้แก่ R01: หนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบน (จำนวน 6 ตู้) R02: สองประตูช่องแช่แข็งด้านบน (จำนวน 10 ตู้) และ R03: สองประตูช่องแช่แข็งด้านล่าง (จำนวน 2 ตู้)	32
รูปที่ 4.7	ชนิดน้ำแข็งที่แผงค้ำอาหารเลือกใช้ในถังน้ำแข็ง จำนวน 41 ถัง	33
รูปที่ 4.8	ปริมาณน้ำแข็งที่ใช้ภายในถังน้ำแข็งจำนวน 41 ถัง คิดตามสัดส่วนปริมาตรของน้ำแข็งต่อปริมาตรของถังน้ำแข็ง (ลูกบาศก์เมตรของน้ำแข็งต่อลูกบาศก์เมตรของถังน้ำแข็ง)	33
รูปที่ 4.9	ระดับอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็ง จำนวน 23 ถัง	34
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิโดยรวมภายในถังน้ำแข็งกับสัดส่วนปริมาตรน้ำแข็งต่อปริมาตรถังน้ำแข็ง (cm ³ /cm ³) จำนวน 23 ถัง	35
รูปที่ 4.11	ระดับอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งภายในถังน้ำแข็ง จำนวน 23 ถัง	35
รูปที่ 4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อวุ้นบดสดกับอุณหภูมิคำนวณด้วยแบบจำลองเดิม (สมการที่ 4.1) ที่อุณหภูมิอ้างอิง 2 องศาเซลเซียส (อายุการเก็บรักษา 88 ชั่วโมง)	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดสดคำนวณจากแบบจำลองเดิม (Original model) และแบบจำลองอย่างง่าย (Simplified model) ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 2 ถึง 19 องศาเซลเซียส	39
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูสดกับอุณหภูมิจากการคำนวณด้วยแบบจำลองเดิม (สมการที่ 4.4) โดยอายุการเก็บรักษาพิจารณาจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์สูงสุด (TVC) ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย (7 log CFU/g)	41
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูคำนวณจากแบบจำลองเดิมกับแบบจำลองอย่างง่ายในช่วงอุณหภูมิ 4 – 15 องศาเซลเซียส	42
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่สดกับอุณหภูมิคำนวณจากแบบจำลองทำนายอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อ <i>Pseudomonas</i> spp.	44
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้ออกไก่คำนวณจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองอย่างง่ายในช่วงอุณหภูมิ 0 – 25 องศาเซลเซียส	44
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อปลาคอดกับอุณหภูมิจากการคำนวณด้วย สมการที่ 4.10 โดยอายุการเก็บรักษาพิจารณาจากปริมาณเชื้อ <i>Photobacterium phosphoreum</i> มากสุดที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย (7 log CFU/g)	47
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อปลาคอดคำนวณจากแบบจำลองเดิมกับแบบจำลองอย่างง่าย ในช่วงอุณหภูมิ 0 – 15 องศาเซลเซียส	48
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาทะเลำปลีกับอุณหภูมิ คำนวณจากแบบจำลองคุณภาพทางประสาทสัมผัส (สมการที่ 4.16) และแบบจำลองปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (สมการที่ 4.19)	50
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาแตงกวากับอุณหภูมิ คำนวณจากแบบจำลองคุณภาพทางประสาทสัมผัส (สมการที่ 4.17) และแบบจำลองปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (สมการที่ 4.20)	51
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาพริกหวานกับอุณหภูมิคำนวณจากแบบจำลองคุณภาพทางประสาทสัมผัส (สมการที่ 4.18)	51
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาผักสลัดและอุณหภูมิ	54
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์ชนิดต่างๆกับอุณหภูมิเก็บรักษา (ชั่วโมง) ในช่วง 4 -15 องศาเซลเซียส โดยอายุการเก็บรักษาคำนวณจากแบบจำลองอย่างง่าย	57
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์ชนิดต่างๆกับอุณหภูมิเก็บรักษา (ชั่วโมง) ในช่วง 4-15 องศาเซลเซียส โดยอายุการเก็บรักษาคำนวณจากแบบจำลองเดิม	57

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ		หน้า
รูปที่ 4.26	ความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์และผักชนิดต่างๆกับอุณหภูมิเก็บรักษาในช่วง 4 – 10 องศาเซลเซียส โดยอายุการเก็บรักษาคำนวณจากแบบจำลองอย่างง่าย	58
รูปที่ 4.27	ความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์และผักชนิดต่างๆกับอุณหภูมิเก็บรักษา ในช่วง 4 - 10 องศาเซลเซียส โดยอายุการเก็บรักษาคำนวณจากแบบจำลองดั้งเดิม	59
รูปที่ 5.1	ลักษณะการไหลเวียนอากาศภายในตู้เย็นสองประตูช่องแช่แข็งด้านบน	62
รูปที่ 5.2	การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นวางภายในช่องแช่เย็น ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ (I) High-High (II) Mid-High และ (III) Low-High	64
รูปที่ 5.3	การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็น (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: สูง-สูง)	65
รูปที่ 5.4	การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็น (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: กลาง-สูง)	66
รูปที่ 5.5	การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็น (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: ต่ำ-สูง)	67
รูปที่ 5.6	ตัวอย่างการกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของแต่ละชั้นวาง ประกอบด้วย (I) ชั้นวางบน (II) ชั้นวางกลาง และ (III) ชั้นวางล่าง ภายใต้การตั้งค่าระดับอุณหภูมิ High-High	68
รูปที่ 5.7	การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นวางภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นบรรจุไหลต ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ (I) High-High (II) Mid-High และ (III) Low-High	71
รูปที่ 5.8	การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็นกรณีมีไหลต (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: สูง-สูง)	72
รูปที่ 5.9	การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็นกรณีมีไหลต (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: กลาง-สูง)	73
รูปที่ 5.10	การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็นกรณีมีไหลต (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: ต่ำ-สูง)	74
รูปที่ 5.11	การกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของชั้นวางกลางที่ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ 3 สภาวะ	75
รูปที่ 5.12	a) การกระจายอุณหภูมิ และ (b) ความเร็วในแนวแกน z ภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็น บนระนาบสมมาตร ($y = 23.5 \text{ cm}$)	77
รูปที่ 5.13	ผลการเปรียบเทียบการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองของอุณหภูมิภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็น บนระนาบสมมาตร ($x = 12 \text{ cm}$. และ $y = 23.5 \text{ cm}$.)	78
รูปที่ 5.14	(a) การกระจายอุณหภูมิ และ (b) ความเร็วในแนวแกน z ภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นกรณีบรรจุไหลตบนระนาบสมมาตร ($y = 23.5 \text{ cm}$)	79
รูปที่ 5.15	ผลการเปรียบเทียบการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองของอุณหภูมิภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นกรณีบรรจุไหลตบนระนาบสมมาตร ($x = 12 \text{ cm}$. และ $y = 23.5 \text{ cm}$.)	79

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 5.16 ระดับอุณหภูมิจากผลการจำลองบริเวณด้านหน้าและด้านหลัง ($x = 33$ cm.; $y = 23.5$ cm.) ภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นเปล้าและตู้เย็นบรรจุไหลด	80
รูปที่ 5.17 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ภายในถังน้ำแข็งเปล้า	82
รูปที่ 5.18 การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในถังน้ำแข็งเปล้า	83
รูปที่ 5.19 อุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิไหลดแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็งบรรจุไหลด	85
รูปที่ 5.20 การกระจายอุณหภูมิแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็งบรรจุไหลด	86
รูปที่ 5.21 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล้าตามระนาบ $y-z$ จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ระนาบด้านซ้าย ($x = 10$ cm) (b) ระนาบกึ่งกลาง ($x = 40$ cm) และ (c) ระนาบด้านขวา ($x = 70$ cm)	88
รูปที่ 5.22 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล้าตามระนาบ $x-z$ จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ระนาบด้านหน้า ($y = 9$ cm) (b) ระนาบกึ่งกลาง ($y = 24$ cm) และ (c) ระนาบด้านหลัง ($y = 39$ cm)	88
รูปที่ 5.23 การกระจายอุณหภูมิแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็งเปล้าจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 8 เซนติเมตร (b) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 16 เซนติเมตร (c) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 24 เซนติเมตรและ (d) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 32 เซนติเมตร	89
รูปที่ 5.24 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลองวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล้าโดยอุณหภูมิการจำลองอ้างอิงที่ $x = 40$ cm และ $y = 24$ cm และอุณหภูมิการทดลองอ้างอิงจากอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็ง	89
รูปที่ 5.25 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุไหลดตามระนาบ $y-z$ จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ระนาบด้านซ้าย ($x = 10$ cm) (b) ระนาบกึ่งกลาง ($x = 40$ cm) และ (c) ระนาบด้านขวา ($x = 70$ cm)	91
รูปที่ 5.26 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุไหลดตามระนาบ $x-z$ จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ระนาบด้านหน้า ($y = 9$ cm) (b) ระนาบกึ่งกลาง ($y = 24$ cm) และ (c) ระนาบด้านหลัง ($y = 39$ cm)	91
รูปที่ 5.27 การกระจายอุณหภูมิแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็งบรรจุไหลดจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 8 เซนติเมตร (b) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 16 เซนติเมตร (c) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 24 เซนติเมตรและ (d) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 32 เซนติเมตร	92
รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลองวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุไหลด โดยอุณหภูมิการจำลองอ้างอิงที่ $x = 33$ cm และ $y = 24$ cm และอุณหภูมิการทดลองอ้างอิงจากอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็ง	92

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 5.29 อัตราการลดอุณหภูมิของเนื้อไก่บดที่ชั้นต่างๆ ภายในช่องแช่เย็น (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: สูง – สูง)	94
รูปที่ 5.30 อัตราการลดอุณหภูมิของเนื้อไก่บดที่ชั้นต่างๆ ภายในช่องแช่เย็น (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: กลาง– สูง)	94
รูปที่ 5.31 อัตราการลดอุณหภูมิของเนื้อไก่บดที่ชั้นต่างๆ ภายในช่องแช่เย็น (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: ต่ำ– สูง)	95
รูปที่ 5.32 อัตราการลดอุณหภูมิของเนื้อไก่บดที่ระดับความสูงต่างๆ ภายในถังน้ำแข็ง	96
รูปที่ ก.1 อุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นที่ใช้ศึกษา (A) ตู้เย็นสองประตูที่มีช่องแช่แข็งด้านบน และ (B) ถังน้ำแข็งพลาสติก	105
รูปที่ ก.2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ iBotton DS1921G	105
รูปที่ ก.3 โพลีบรอร์จอุปกรณ์ (A) เนื้อไก่บดและ (B) น้ำบริสุทธิ์บรรจุด้วยพลาสติก ขนาด 425 มิลลิลิตร	106
รูปที่ ก.4 ตัวอย่างแบบสอบถามการสำรวจการใช้งานอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นของแผงค้าอาหาร	106
รูปที่ ข.1 ลักษณะตู้เย็นชนิดต่างๆ จากการสำรวจ	107
รูปที่ ง.1 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของต้นทุนตู้เย็นและถังน้ำแข็ง	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันวิถีการดำเนินชีวิตของคนไทยได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมโดยเฉพาะในเรื่องการบริโภคอาหาร คนส่วนใหญ่มักพึ่งพาอาหารจากร้านอาหารหรือแผงค้าอาหารกันมากขึ้น ความปลอดภัยทางอาหารของผู้บริโภคจึงขึ้นอยู่กับการจัดการทางสุขลักษณะของแผงค้าอาหารเหล่านั้น โดยหนึ่งในปัจจัยสำคัญของคุณภาพและความปลอดภัยของอาหารคือการเก็บรักษาอาหารสดหรือวัตถุดิบในอุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนนำมาปรุงเป็นอาหารพร้อมรับประทาน การเลือกใช้อุปกรณ์เก็บรักษาจึงเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็น โดยทั่วไปอุปกรณ์การเก็บรักษาอาหารของแผงค้าอาหารมักใช้ตู้เย็นและถังน้ำแข็ง หากการนำมาใช้งานไม่ถูกต้อง ใช้อุณหภูมิการเก็บรักษาไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้มีการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมเสียของอาหารและเกิดปัญหาการปนเปื้อน จากข้อมูลเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทยได้กำหนดให้ผู้ประกอบการร้านค้าอาหารต้องเก็บวัตถุดิบและอาหารภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 7.2 องศาเซลเซียสในขณะที่ต่างประเทศกำหนดให้ต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส (MOPH, 2006; Laguerre et al., 2002; ANZFA, 2002) และจากการสำรวจงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ตู้เย็นพบว่า มีจำนวนตู้เย็นมากกว่า 80% ที่งานที่ระดับอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิมาตรฐาน (James et al., 2008) นอกจากนี้ยังพบว่าเชื้อจุลินทรีย์ชนิดเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิต่ำ (Psychrotrophic) เช่น *Listeria monocytogenes* เป็นต้น สามารถเจริญได้ หากการใช้งานไม่ถูกสุขลักษณะและระดับอุณหภูมิที่ใช้งานไม่เหมาะสม (Sergelidis et al., 1997; Jackson et al., 2007)

สำหรับอุปกรณ์เก็บรักษาอาหารสำหรับแผงค้าอาหารในประเทศไทยส่วนใหญ่ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือตู้เย็นกับถังน้ำแข็ง โดยตู้เย็นที่ใช้มักเป็นแบบสองประตู มีช่องแช่แข็งอยู่ด้านบน จากงานวิจัยของ Gupta et al. (2007) พบว่าการถ่ายเทความร้อนภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นประเภทนี้เป็นการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ส่วนข้อมูลสำหรับการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของถังน้ำแข็งแทบไม่มีปรากฏ แต่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในประเทศไทย

ยิ่งกว่านั้นสำหรับประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อน มีสภาพภูมิอากาศที่มีแสงแดดจัดและอุณหภูมิสูง เป็นผลให้บรรดาอาหารสดที่ใช้เป็นวัตถุดิบรวมทั้งอาหารที่ปรุงสำเร็จสามารถเสื่อมเสียได้ง่าย ก่อให้เกิดปัญหาความปลอดภัยทางอาหาร อีกทั้งเกณฑ์มาตรฐานด้านสุขลักษณะที่ใช้ควบคุมแผงค้าอาหารในประเทศไทยยังไม่สามารถนำมาปฏิบัติหรือบังคับใช้ได้อย่างเข้มงวด มักมีการผ่อนผันให้กับผู้ประกอบการอาหาร จึงสร้างปัญหาสุขอนามัยแก่ผู้บริโภคทั่วไปนับเป็นสถานการณ์ที่น่าเป็นห่วง ดังนั้นความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการเก็บรักษาอาหารและอุณหภูมิภายในอุปกรณ์ที่ใช้เก็บรักษาอาหารของแผงค้าอาหารเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถเก็บอาหารได้อย่างเหมาะสม

โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการกระจายของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้งสองประเภท (ตู้เย็นและถังน้ำแข็ง) ด้วยวิธีการทดลองและการทำนายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Comsol Multiphysics พร้อมกับการทำนายอายุการเก็บรักษาอาหารภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้งสอง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษากลไกการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นของแผงคำอาหาร
- 2) เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่ออายุการเก็บรักษาของอาหารประเภทต่างๆ โดยการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 3) เพื่อเปรียบเทียบความสามารถการถนอมอาหารและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้งสองประเภท

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ประเภทกลุ่มแผงคำตัวอย่างเพื่อสำรวจชนิดอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นได้แก่ แผงคำอาหารพร้อมปรุง (order) แผงคำอาหารปรุงสำเร็จ (ready to eat) และแผงคำเครื่องดื่มและของชำ (beverage and grocery)
- 2) อุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นที่ใช้ศึกษาได้แก่ ตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านบน โดยพิจารณาเฉพาะช่องแช่เย็นและถังน้ำแข็งพลาสติกโดยขนาดของอุปกรณ์ทั้งสองอยู่ในช่วง 180 – 200 ลิตร และถังน้ำแข็งใช้น้ำแข็งบดปริมาณบรรจุ 30% ของถังเป็นแหล่งให้ความเย็นภายในถังน้ำแข็ง
- 3) รูปแบบโครงสร้าง (configurations) อุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย อุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นเปล่า (empty storage) และบรรจุภาระ (loaded storage) โดยปริมาณบรรจุไหลตประมาณร้อยละ 10 – 20 ของปริมาตรอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นแต่ละชนิด และการทำงานของอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นแต่ละชนิดอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิบรรยากาศได้รับแสงแดด

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจการถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้งสองชนิดของแผงคำอาหาร
- 2) เข้าใจลักษณะการไหลของอากาศและการกระจายอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นแต่ละชนิด ทำให้สามารถระบุบริเวณที่เหมาะสมสำหรับเก็บรักษาอาหารแต่ละชนิดได้อย่างเหมาะสม
- 3) สามารถทำนายอายุการเก็บรักษาของอาหารภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นได้ โดยประยุกต์ร่วมกับแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาอาหารชนิดต่างๆ
- 4) ผลการศึกษาสามารถช่วยเป็นเครื่องมือในการตัดสินใจเลือกใช้ประเภทอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นภายในแผงคำอาหารได้ โดยพิจารณาจากความปลอดภัยของอาหารและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับร้านอาหาร

จากการสำรวจธุรกิจร้านอาหารหรือภัตตาคาร ปี 2552 ในประเทศไทย พบว่า ร้านอาหารหรือภัตตาคารมีอัตราการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น โดยในปี 2551 มีร้านอาหาร จำนวน 64,113 ร้าน ซึ่งเป็นจำนวนร้านอาหารในกรุงเทพฯประมาณ 12,000 ร้าน และในต่างจังหวัดประมาณ 52,113 ร้าน เพิ่มขึ้นจากเมื่อปี 2545 ประมาณ 9,000 ร้าน (สำนักส่งเสริมและพัฒนาธุรกิจ, 2552) โดยกระทรวงพาณิชย์ แบ่งประเภทร้านอาหารออกเป็น 4 แบบ โดยจำแนกตามการออกแบบตกแต่งเป็นหลัก ได้แก่

1. ร้านอาหารระดับหรู (Fine dining) เป็นร้านที่มีการออกแบบตกแต่งอย่างประณีต สวยงาม ใช้วัสดุและอุปกรณ์ราคาแพง จัดอาหารอย่างหรู มีการบริการระดับ 5 ดาว
2. ร้านอาหารระดับกลาง (Casual dining) เป็นร้านที่มีการออกแบบตกแต่งแบบพอเหมาะสมควร เน้นบรรยากาศแบบสบายๆ เป็นกันเอง ราคาอาหารระดับปานกลาง พนักงานบริการแบบเป็นกันเอง ไม่มีพิธีรีตอง
3. ร้านอาหารทั่วไป (Fast dining) เป็นร้านที่มีการออกแบบตกแต่งแบบเรียบง่าย สะดวก รวดเร็ว มีความทันสมัย เน้นบริการอาหารจานด่วน มีรายการอาหารจำกัดและสามารถหมุนเวียนลูกค้าได้ในปริมาณมาก
4. ร้านริมบาทวิถี (Kiosk) เป็นร้านที่มีการออกแบบตกแต่งแบบง่ายๆ เน้นอาหารจานเดียว สามารถปรุงได้ง่ายและรวดเร็ว โดยเป็นธุรกิจขนาดย่อมที่มีเจ้าของร้านเป็นพ่อครัวเอง

2.2 การเก็บรักษาอาหารด้วยความเย็น (บุหลัน พิทักษ์ผล, 2555)

อาหารเป็นหนึ่งในปัจจัยสี่ที่มีความจำเป็นต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ การเก็บรักษาอาหารหรือการถนอมอาหารได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อมนุษย์เป็นอย่างมาก เนื่องจากพฤติกรรมกรบริโภคอาหารมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เนื่องจากคนส่วนใหญ่ต้องการความสะดวก รวดเร็ว และต้องการเก็บรักษาอาหารไว้บริโภคได้นานๆ จึงอาจกล่าวได้ว่า การถนอมอาหารเป็นการเก็บรักษาอาหารไว้ให้นาน โดยไม่ทำให้อาหารนั้นเกิดการเสื่อมเสียและยังคงอยู่ในสภาพที่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยการเสื่อมเสียของอาหารที่สำคัญคือการเสื่อมเสียอันเนื่องมาจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ (Microbial spoilage) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญต่อการเกิดโรคอาหารเป็นพิษ ดังนั้น การเก็บรักษาอาหารจึงควรเก็บรักษาไว้ในสภาวะที่เหมาะสมเพื่อป้องกัน หรือยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมาในอาหาร

การแช่เย็น (Chilling) หมายถึง การทำให้อุณหภูมิของอาหารลดต่ำลงแต่เหนือกว่าจุดเยือกแข็งของอาหาร กล่าวคืออาหารนั้นยังคงสภาพเดิม น้ำหรือองค์ประกอบในอาหารนั้นไม่แปรสภาพเป็นน้ำแข็ง การใช้ความเย็นในการเก็บรักษาอาหาร ไม่ได้มีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะทำลายเชื้อจุลินทรีย์ แต่เพียงเพื่อช่วยยับยั้งหรือชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่จะทำให้อาหารเน่าเสีย พร้อมทั้งช่วยลดปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่มีส่วนทำให้คุณภาพของอาหารเปลี่ยนไป ดังนั้นการเก็บรักษาอาหารด้วยความเย็นจึงเป็นเพียงการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารในระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น สำหรับการควบคุม

อุณหภูมิในการแช่เย็นและวิธีการเก็บรักษาขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอาหารแต่ละประเภท ซึ่งวิธีการทำความเย็นมีกรรมวิธีดังนี้

1. การทำความเย็นโดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง (Air cooling)

เป็นวิธีการทำความเย็นที่ใช้กันในชีวิตประจำวัน ได้แก่ ตู้เย็น สิ่งของที่เก็บในตู้เย็นถูกทำให้อุณหภูมิลดลง โดยการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง คือ อากาศ ซึ่งในตู้เย็นจะมีการหมุนเวียนอากาศทั้งแบบการพาโดยธรรมชาติ และการพาแบบบังคับขึ้นอยู่กับชนิดตู้เย็น

2. การทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง (Ice cooling)

วิธีการนี้คือการใช้น้ำแข็งไม่ว่าจะเป็น น้ำแข็งก้อน น้ำแข็งหลอดหรือน้ำแข็งบดสัมผัสโดยตรงกับอาหาร แต่เนื่องจากน้ำแข็งไม่สามารถสัมผัสกับอาหารได้อย่างทั่วถึง ทำให้อุณหภูมิลดลงได้ช้า

3. การทำความเย็นโดยใช้ไนโตรเจนเหลว

ไนโตรเจนเหลวที่ความดันปกติ จะระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำกว่า -196 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่จะสามารถทำให้อาหารเย็นลงได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากไนโตรเจนเหลวเป็นก๊าซเฉื่อยซึ่งไม่เป็นอันตรายกับอาหารและผู้บริโภค จึงนิยมนำมาใช้กับอาหารแช่เยือกแข็ง (Frozen food) ในระดับอุตสาหกรรม แต่ไม่นิยมนำมาใช้กับอาหารระดับครัวเรือน

4. การทำความเย็นโดยการใช้น้ำแข็งแห้ง (Dry ice)

น้ำแข็งแห้ง คือคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะของแข็ง หรืออาจเรียกว่าคาร์บอนไดออกไซด์แข็ง น้ำแข็งแห้งที่ความดันบรรยากาศ มีอุณหภูมิต่ำกว่า -78.5 องศาเซลเซียส ซึ่งถือว่าอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำแข็งธรรมดาอย่างมาก และที่อุณหภูมิต่ำกว่าน้ำแข็งแห้งจะระเหิดกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่ไม่มีการหลอมละลายเป็นของเหลวซึ่งเปียกและเหมือนน้ำแข็งทั่วไป ส่วนใหญ่จะนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งมาแล้ว เช่นนำมาใช้ในระบบการขนส่งที่มีระยะเวลา 2 – 3 วัน แต่ด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิจากผิวของผลิตภัณฑ์อาหารกับน้ำแข็ง จึงไม่นิยมลดอุณหภูมิของอาหารโดยการสัมผัสกับน้ำแข็งแห้งโดยตรง เพราะอาจทำให้ผิวสัมผัสของอาหารเสียหายได้

2.2.1 วิธีการเก็บรักษาอาหารสำหรับอาหารแต่ละประเภทด้วยความเย็น

1) เนื้อสัตว์ (Meat)

เนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์เป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่เน่าเสียได้ง่ายที่สุด เนื่องจากประกอบด้วยสารอาหารต่างๆ ที่เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ที่พบมากได้แก่ *Pseudomonas* spp., *Alcaligenes*, และ *Aeromonas* เนื้อสัตว์แต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีน ไขมันและน้ำ การเก็บรักษาจึงควรเก็บไว้ในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิ $0 - 5$ องศาเซลเซียสและควรหั่นเนื้อเป็นก้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 เซนติเมตร เพื่อให้ความเย็นกระจายได้อย่างทั่วถึง โดยเนื้อสัตว์สามารถเก็บรักษาได้เป็นเวลาโดยเฉลี่ยประมาณ 3 วัน หากนานเกิน 3 วัน พื้นที่ผิวของเนื้อสัตว์จะมีลักษณะเมือกสีน (Sliminess) เนื่องจากเกิดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ขึ้น ซึ่งการเกิดเมือกสีนบนผิวเนื้อสัตว์จัดว่าเป็นปัญหาที่พบในการเก็บเนื้อสัตว์ไว้ในอุปกรณ์รักษาความเย็นมากที่สุด และเนื่องจากเนื้อสัตว์สดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วจึงพบว่ามีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์อยู่มาก ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์เหล่านั้นสามารถเจริญได้ที่

อุณหภูมิต่ำต้งนั้นจึงควรเก็บผลิตภัณฑ์เหล่านี้ในส่วนที่เย็นที่สุดของอุปกรณ์รักษาความเย็น (บัญญัติ บุญญา, 2546; สุมณฑา วัฒนสินธุ์, 2549)

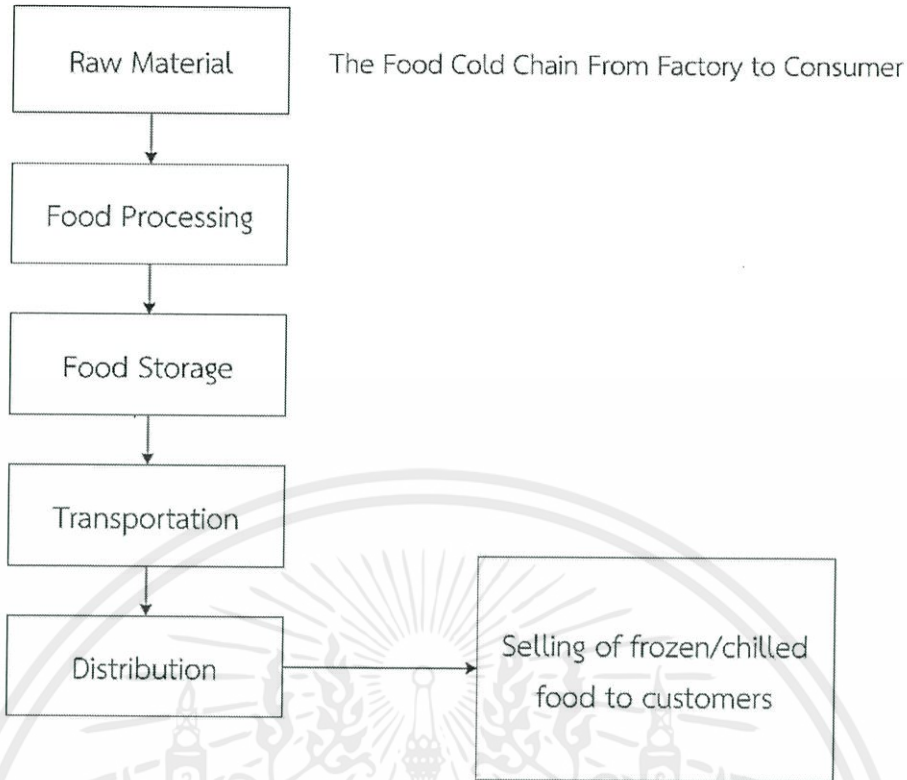
2) ผักและผลไม้

ผักส่วนใหญ่มีน้ำและคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ ผักจึงเป็นแหล่งอาหารที่ดีสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและรา และเนื่องจากผักมีความเป็นกลางมากกว่าผลไม้จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมของการเจริญเติบโตของแบคทีเรียหลายชนิด โดยเฉพาะ *Erwiniacarotovora* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคเน่าละ (Bacterial soft-rot) ซึ่งจะติดมากับผักหลังการเก็บเกี่ยว ดังนั้นการเก็บผักแช่เย็นควรเก็บในสภาวะที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เหมาะสม โดยอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 7 – 10 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 90 – 95 ทั้งนี้หากเก็บผักในที่ที่มีความชื้นในบรรยากาศสูงเกินไปจะทำให้เกิดหยดน้ำเกาะบนผิวผัก ซึ่งจะทำให้ผักเน่าเสีย ในทางกลับกันหากความชื้นในบรรยากาศต่ำเกินไปผักก็จะสูญเสียน้ำ เกิดรอยชำหรือเปลี่ยนสีไป ซึ่งเรียกว่าอาการสะท้านหนาว (Chilling injury) ทำให้ไม่น่ารับประทานและเก็บไว้ไม่ได้นาน ส่วนผลไม้โดยธรรมชาติแล้วสามารถป้องกันการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ได้ โดยมีเปลือกหุ้มอยู่ภายนอก ทำให้ผลไม้สามารถเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องได้ แต่เมื่อสุกเต็มที่ จะเกิดการเน่าเสียและมีเชื้อราเกิดขึ้น ดังนั้นการเก็บผลไม้สุกจึงควรเก็บไว้ในอุปกรณ์รักษาความเย็นเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษา (บัญญัติ บุญญา, 2546; สุมณฑา วัฒนสินธุ์, 2549)

2.3 อุปกรณ์การเก็บรักษาความเย็น (Cold Storage System)

สิ่งสำคัญของคุณภาพอาหารที่ดีคือ การควบคุมอุณหภูมิในตัวผลิตภัณฑ์อาหารให้มีความสดยาวนาน ตั้งแต่ต้นการเก็บเกี่ยวจนถึงมือของผู้บริโภค โดยการควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อาหารนี้ จึงเป็นลักษณะห่วงโซ่ความเย็น (Cold chain) ดังรูปที่ 2.1 แสดงเส้นทางการไหลของห่วงโซ่ความเย็น ดังนั้นเพื่อรักษาคุณภาพและคงความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อาหาร จึงจำเป็นต้องมีการจัดการห่วงโซ่ความเย็นให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมและดีที่สุด ตั้งแต่วัตถุดิบไปจนถึงการบริโภค และจากการศึกษาและการสำรวจจากหลายๆงานวิจัย (Sergelidis et al., 1997; Laguerre et al., 2002; Jackson et al., 2007; James et al., 2008) พบว่าช่วงในห่วงโซ่ความเย็นที่มีการจัดการและเสี่ยงต่อการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหารมากที่สุดคือ การจัดการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารโดยผู้บริโภครอง โดยอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นสำหรับเก็บรักษาอาหารที่ผู้บริโภครองส่วนใหญ่เลือกใช้ในประเทศไทย ได้แก่ ตู้เย็น (Domestic refrigerators) และถังน้ำแข็ง (Ice boxes)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ห่วงโซ่ความเย็นในผลิตภัณฑ์อาหาร (Food cold chain)

2.3.1 ตู้เย็น (Domestic refrigerator)

ตู้เย็นเป็นระบบที่ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากภายในตู้ออกไปสู่ภายนอกตู้เย็น โดยความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตู้เย็นเกิดจากการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของตู้เข้ามา โดยการนำความร้อนและการพาความร้อนจากอากาศที่ไหลเข้าสู่ตู้เย็นขณะเปิดประตู และแหล่งความร้อนที่สำคัญก็คือความร้อนจากอาหารหรือสิ่งของที่นำเข้ามาแช่ภายในตู้เย็น (Cooling load) (สุธิกานต์, 2548)

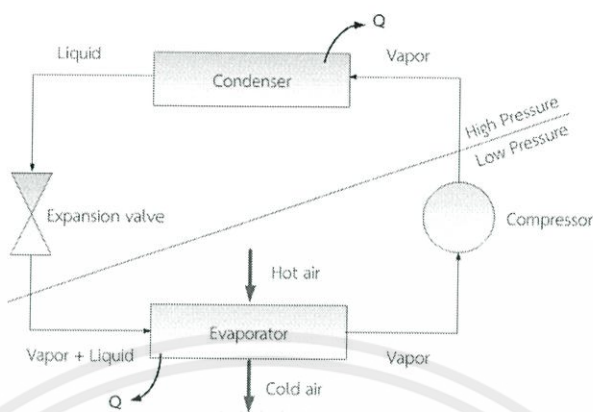
ส่วนประกอบหลักของตู้เย็น ประกอบด้วย

1. เครื่องอัดไอ (Compressor)
2. คอยล์ร้อน (Condenser)
3. เอ็กแพนชันวาล์ว (Expansion valve)
4. คอยล์เย็น (evaporator)

กลไกการทำงานพื้นฐานของตู้เย็น

เริ่มจากเครื่องอัดไออัดสารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะแก๊ส ทำให้อุณหภูมิและความดันสูงขึ้นเข้าสู่คอยล์ร้อนที่อยู่ด้านหลังหรือด้านข้างของตู้เย็น ความร้อนจะถูกระบายออกบริเวณนี้ด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติหรือการพาความร้อนแบบบังคับจากนั้นสารทำความเย็นจะเปลี่ยนสถานะจากแก๊สเป็นของเหลวไหลผ่านไปยังเอ็กแพนชันวาล์ว เมื่อผ่านเอ็กแพนชันวาล์วความดันจะลดลงอย่างรวดเร็ว สารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะของเหลวเปลี่ยนเป็นสถานะผสมระหว่างของเหลวและแก๊ส จากนั้นสารทำความเย็นจะไหลผ่านเข้าไปในคอยล์เย็นและดูดความร้อนภายใน

ตู้เย็นออกมา และระเหยกลายเป็นก๊าซทั้งหมด จากนั้นจะไหลเข้าสู่เครื่องอัดไอและถูกอัดเป็นก๊าซ ความดันสูงต่อไปเป็นวัฏจักรตลอดกระบวนการทำความเย็น



รูปที่ 2.2 วัฏจักรการทำความเย็นโดยทั่วไปของตู้เย็น (Refrigeration system)

2.3.2 ถังน้ำแข็ง (Ice boxes)

ถังน้ำแข็งจัดว่าเป็นอุปกรณ์รักษาความเย็นในการเก็บรักษาอาหารที่ได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยเฉพาะแผงค้าอาหารขนาดกลางและเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากถังน้ำแข็งไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำความเย็น เพียงแต่ใช้น้ำแข็งมาให้ความเย็นแทนทำให้ค่าใช้จ่ายในการทำงานน้อยกว่า โดยวัสดุที่นำมาใช้ทำถังน้ำแข็งได้แก่ พลาสติก โลหะและโฟม สำหรับถังน้ำแข็งสองชนิดแรกจะได้รับการหุ้มฉนวนไว้โดยรอบตัวถัง โดยฉนวนที่นิยมนำมาใช้คือโพลียูรีเทนโฟมหรือฟิยูโฟม (Polyurethane foam or PU foam)

โพลียูรีเทนโฟม (Polyurethane Foam)

โพลียูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) เป็นสารเคมีกลุ่มหนึ่งที่น่าไปประยุกต์เป็นวัสดุใช้งานในรูปแบบต่างๆ รวมถึงฉนวนกันความร้อนจึงเรียกสารเคมีนี้ว่า "ฉนวนกันความร้อนโพลียูรีเทน-โฟม" หรือเรียกว่า "ฉนวนกันความร้อนฟิยูโฟม" ด้วยคุณสมบัติเด่นๆ ของฉนวนกันความร้อนฟิยูโฟม จึงนิยมนำมาใช้ในการทำฉนวนกันความร้อน หรือฉนวนเก็บความเย็นในปัจจุบัน

การเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง

น้ำแข็งปกติมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -1 ถึง 0 องศาเซลเซียสซึ่งสามารถลดอุณหภูมิผลิตภัณฑ์อาหารจากอุณหภูมิห้องเป็นอุณหภูมิประมาณ 5 ถึง 6 องศาเซลเซียสได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของอาหารก็จะเริ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำแข็งบางส่วนมีการละลายซึ่งจะไม่เป็นผลดีต่อคุณภาพของอาหารดังนั้นจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง (คันธรัตน์, จิตตราพร และธีรพล, 2554) โดยการผสมเกลือความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำแข็ง ผลปรากฏว่าน้ำแข็งผสมเกลือที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 โดยมวลสามารถทำให้อุณหภูมิของน้ำแข็งลดลงต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งสามารถลดอุณหภูมิของอาหารลงได้ด้วย ดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายเกลือต่ออุณหภูมิของน้ำแข็ง

ความเข้มข้นของสารละลายเกลือ (ร้อยละโดยมวล)	อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ (องศาเซลเซียส)*			
	น้ำแข็ง	น้ำ	ไส้กรอก	แตงกวา
0	0 – 1	5	3	3
10	-7 – -5	0	1	1
20	-12 – -6	0	-3	0

* อุณหภูมิของอาหารภายในถังน้ำแข็งพลาสติก

2.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

กระบวนการรักษาความเย็นในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็น มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการถ่ายเทความร้อน โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนมีทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) โดยลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบสภาวะคงที่ (Steady state) จะเกิดขึ้นเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองวัตถุ 2 ชนิดมีค่าคงที่ ปริมาณการถ่ายเทความร้อนเข้าจะเท่ากับปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่สูญเสียและอุณหภูมิของวัตถุจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น เมื่อมีการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังห้องเย็นอุณหภูมิผนังจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าอุณหภูมิภายในห้องเย็นและอุณหภูมิภายนอกคงที่ กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องหลังจากสภาวะภายในทำงานคงที่แล้ว อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของอาหารหรือตัวกลางในการให้ความร้อนภายในอุปกรณ์รักษาความเย็นส่วนใหญ่แล้วจะเป็นกระบวนการแบบสภาวะไม่คงที่ (Unsteady state)

2.4.1 การนำความร้อน (Conduction) (Incropera et al., 2007)

การนำความร้อนเป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยการเคลื่อนที่แบบจลน์ (Kinetic motion) หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลหยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน จากกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's Law) กล่าวว่าอัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้น เขียนได้ดังสมการ (2.1)

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

เมื่อ q_x คือปริมาณการถ่ายเทความร้อนในทิศทาง x (Watt; W) k คือสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity, W/m K) A คือพื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน (m^2) และ $\frac{dT}{dx}$ คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (temperature gradient, K/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปปริมาณการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนจะอยู่ในรูปเวกเตอร์สามมิติ และสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการฟุ้งกระจายความร้อน (Heat diffusion equation) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad ; k = \text{constant} \quad (2.2)$$

เมื่อ T คืออุณหภูมิ (K) t คือเวลา (s) \dot{q} คืออัตราพลังงานที่ผลิตขึ้นในตัวกลาง (W/m^3) α คือปริมาณการฟุ้งกระจายของความร้อน (Thermal diffusivity) คำนวณจาก $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ โดย ρ คือความหนาแน่นของวัตถุ (kg/m^3) และ c_p คือค่าความจุความร้อน (J/kg K)

2.4.2 การพาความร้อน (Convection) (Incropera et al., 2007)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยอุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้น เมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง สมการการถ่ายเทความร้อนเป็นดังนี้

$$q_{conv} = hA\Delta T \quad (2.3)$$

เมื่อ h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (Heat transfer coefficient) ($\text{W/m}^2 \text{K}$) A คือพื้นที่ที่สัมผัสของไหล (m^2) ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิ (K)

ลักษณะการพาความร้อน (Convection heat transfer) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

1. การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)

การเคลื่อนที่ของของไหลที่เกิดขึ้นโดยการกระทำขึ้น โดยใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำทำให้ของไหลไหลผ่านวัตถุ

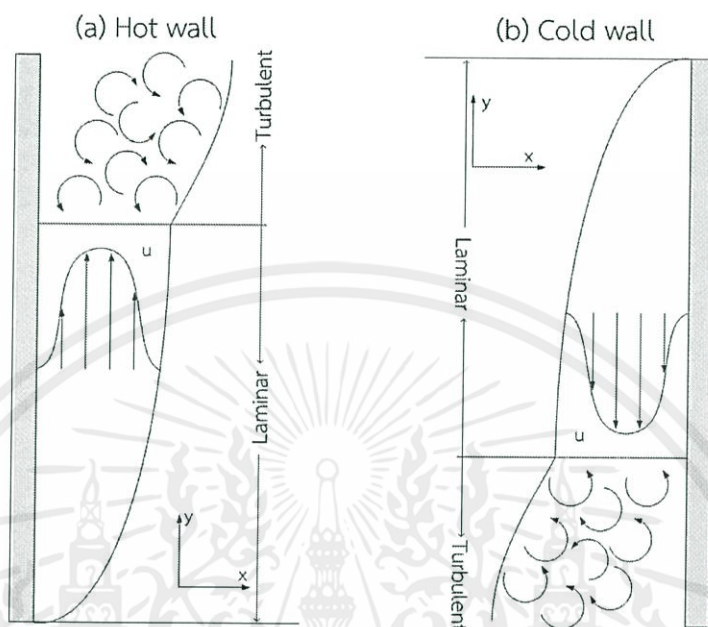
2. การพาความร้อนแบบธรรมชาติหรือแบบอิสระ (Free or Natural convection)

การเคลื่อนที่ของของไหลโดยแรงลอยตัว (Buoyancy force) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหล ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นภายในสนามโน้มถ่วงของโลก ผลคือของไหลที่มีอุณหภูมิสูง (ความหนาแน่นต่ำ) จะลอยตัวสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (ความหนาแน่นสูง) จะเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่

ชั้นขอบเขตความเร็วสำหรับการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

ความเร็วการไหลในการพาความร้อนแบบธรรมชาติจะน้อยกว่าความเร็วของการพาความร้อนแบบบังคับ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติจึงมีค่าน้อยกว่าการพาความร้อนแบบบังคับด้วย รูปที่ 2.3 (a) แสดงการก่อตัวของสนามความเร็วบริเวณด้านหน้าของแผ่นร้อนแนวตั้งซึ่งเกิดจากแรงลอยตัวกล่าวคือ ของไหลที่ร้อนมากขึ้นหน้าแผ่นร้อนจะลอยสูงขึ้น ส่งผลให้ของไหลจากบริเวณข้างนอกที่อยู่เบื้องหลังไหลเข้ามาแทนที่ ส่วนรูปที่ 2.3 (b) แสดงแผ่นเย็นวางในแนวตั้งในของไหลร้อน กรณีนี้ทิศทางการเคลื่อนที่จะตรงข้ามกับกรณีแรก กล่าวคือ ของไหลบริเวณด้านหน้าแผ่นเย็นจะเคลื่อนที่ลง ทั้งสองกรณีชั้นขอบเขตความเร็วจะก่อตัวขึ้น โดยมีความเร็วสูงสุดเกิดขึ้นที่ใดที่หนึ่งในชั้นขอบเขตและความเร็วของของไหลจะเป็นศูนย์ที่ผิวของแผ่นทั้งสอง นอกจากนี้ในบริเวณ

ใกล้กับขอบหน้าของแผ่น การก่อตัวของชั้นขอบเขตมีการไหลแบบราบเรียบ ถัดมาที่ระยะหนึ่งจากขอบหน้าของแผ่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ชั้นขอบเขตที่มีการไหลแบบปั่นป่วน และในที่สุดก็จะกลายเป็นการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่

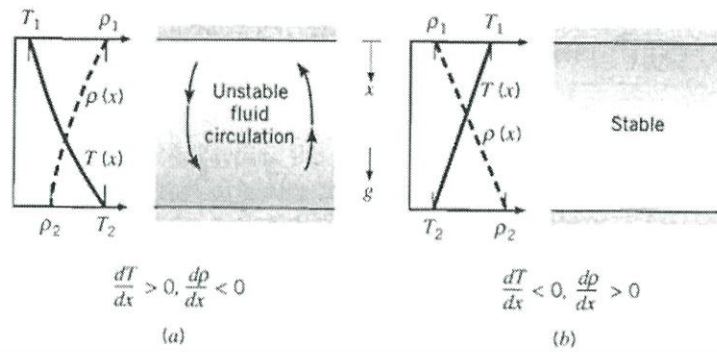


รูปที่ 2.3 ชั้นขอบเขตสำหรับการพาความร้อนแบบธรรมชาติบนแผ่นเรียบแนวตั้ง

(a) $T_w > T_\infty$ (b) $T_w < T_\infty$

ข้อสังเกต การมีเกร็ดียนความหนาแน่นของของไหลในสนามแรงโน้มถ่วงของโลก ไม่แน่นอนเสมอไปว่าจะทำให้เกิดกระแสการพาความร้อนแบบธรรมชาติขึ้นเสมอไป พิจารณาตามรูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของของไหลที่อยู่ระหว่างแผ่นแนวนอนขนาดใหญ่สองแผ่นที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน กรณี (a) อุณหภูมิแผ่นล่างมากกว่าแผ่นบน และความหนาแน่นของของไหลจะลดลงตามทิศทางของแรงดึงดูดโลก พบว่าเกิดความไม่เสถียรขึ้น (Unstable fluid) จึงเกิดกระแสการพาแบบธรรมชาติขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของของไหลด้านบนมากกว่า แรงดึงดูดของโลกจึงกระทำต่อของไหลด้านบนมากกว่าของไหลด้านล่าง กล่าวคือ ของไหลด้านบนจะเคลื่อนที่ลงต่ำและค่อยๆอุ่นขึ้น ในขณะที่ของไหลด้านล่างก็จะเคลื่อนตัวสูงขึ้นและค่อยๆเย็นตัวลงหมุนวนเป็นวัฏจักรไปเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามลักษณะแบบนี้จะไม่เกิดกับกรณี (b) ที่อุณหภูมิด้านล่างเย็นกว่าด้านบน ทำให้ความหนาแน่นด้านล่างมากกว่าด้านบน จึงไม่มีการเคลื่อนที่ของของไหลลงตามแรงดึงดูดของโลก กรณีนี้ ถือว่ามีความเสถียร (Stable) และเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนเท่านั้น (บนลงล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ของไหลอยู่ระหว่างแผ่นแนวนอนขนาดใหญ่สองแผ่นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
(ที่มา: Incropera et al., 2007)

การพิจารณาการลักษณะการไหลของการพาความร้อนโดยธรรมชาติ

ลักษณะการไหล (Flow regime) ของการพาความร้อนโดยธรรมชาติพิจารณาจากค่าเรย์ลี (Rayleigh number: Ra) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 โดยทั่วไปการไหลจะเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วนเมื่อค่าเรย์ลีมีค่าเท่ากับค่าวิกฤติ ($Ra = 10^9$) (Incropera et al., 2007)

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\alpha\nu} \quad (2.4)$$

โดย g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2 β คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน ($1/\text{K}$) ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิ (K) L คือความยาวของผนัง (m) α คือค่าการแพร่เชิงความร้อน (Thermal diffusivity: m^2/s) และ ν คือค่าความหนืดจลน์ของของไหล (m^2/s)

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

การพาความร้อนโดยธรรมชาติสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จากสมการที่ 2.5

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} = \frac{4}{3} \left(\frac{Gr_L}{4} \right)^{1/4} g(\text{Pr}) \quad (2.5)$$

โดย \bar{h} คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดความยาว L ของพื้นผิว ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$) L คือความยาวของพื้นผิว k คือสภาพการนำความร้อนของของไหล ($\text{W}/\text{m K}$) Gr_L คือเกรซอฟนัมเบอร์ (Grashof number) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 และ Pr คือพลาตล์นัมเบอร์ (Prandtl number) คำนวณจากสมการที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (2.6)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.7)$$

โดยสมบัติทางความร้อนของของไหลทั้งหมดอ้างอิงที่อุณหภูมิฟิล์ม $T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม(Overall heat transfer coefficient: U)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมคือ สัมประสิทธิ์ที่เกิดจากผลรวมของสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k_w)และการพาความร้อน (h_a)เข้าด้วยกัน รวมถึงสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเทียบเท่าจากผลการแผ่รังสีความร้อน (h_r) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

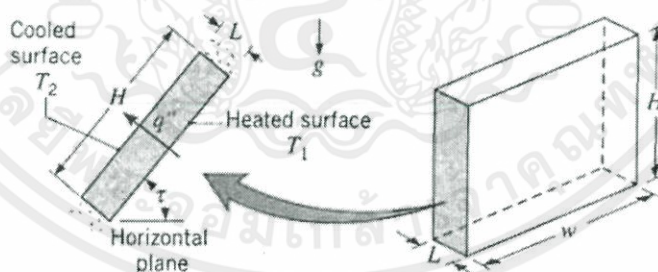
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_a + h_r} + \frac{t_w}{k_w} \quad (2.8)$$

โดย t_w คือความหนาของผนัง (m)

การไหลภายในวัตถุ (Internal free convection flows)

การไหลภายในช่องสี่เหลี่ยมพื้นผ้า (Rectangular cavities)

ช่องสี่เหลี่ยมที่ศึกษาอาจเป็นวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งมีอุณหภูมิของด้านตรงข้ามคู่หนึ่งไม่เท่ากัน ในขณะที่ด้านตรงข้ามคู่ที่เหลือหุ้มฉนวนไว้หรือไม่นำมาคิด และวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมนี้วางอยู่ในแนวตั้ง แนวนอนหรือแนวเอียงก็ได้ โดยมีมุมเอียง τ ระหว่างผิวที่ร้อนหรือผิวที่เย็นของช่องกับแนวระนาบ ซึ่งค่ามุมเอียงนี้จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ระหว่างช่อง



รูปที่ 2.5 การพาแบบธรรมชาติในช่องสี่เหลี่ยม (ที่มา: Incropera et al., 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีพื้นผิวร้อนอยู่ด้านล่าง $\tau = 0^\circ$

กำหนดช่องสี่เหลี่ยมซึ่งมีอุณหภูมิผิวร้อนเป็น T_1 และอุณหภูมิผิวเย็นเป็น T_2 ถ้า $T_1 - T_2$ มีค่าน้อยๆแล้ว การถ่ายเทผ่านชั้นของไหลจะเป็นการนำความร้อนเท่านั้น เพราะว่าแรงเนื่องจากความหนืดมากกว่าแรงลอยตัว เป็นผลให้ของไหลหยุดนิ่ง

$$Nu_L = \frac{hL}{k} = 1 \quad (Ra_L < 1708)$$

แต่ถ้า $T_1 - T_2$ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งแรงลอยตัวชนะแรงเนื่องจากความหนืดแล้ว การเคลื่อนที่แบบการพาจะเกิดขึ้นบางที่ในของไหล และเมื่อเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งทำให้เกิดค่าเรย์เลย์นัมเบอร์วิกฤติ นั่นคือมีการพาแบบธรรมชาติเกิดขึ้น $Ra_c = Gr_L Pr \geq 1708$ สมการที่ใช้ในกรณีนี้จึงได้ว่า

$$Nu_L \frac{hL}{k} = 0.069 Ra_L^{1/3} Pr^{0.074} \quad (3 \times 10^5 < Ra_L < 7 \times 10^9) \quad (2.9)$$

กรณีพื้นผิวร้อนอยู่ด้านบน $\tau = 180^\circ$

การถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวทั้งสองเกิดขึ้นเฉพาะการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนเท่านั้นและ $Nu_L = 1$

กรณีพื้นผิวร้อนอยู่ในแนวตั้ง $\tau = 90^\circ$

หมายความว่าช่องสี่เหลี่ยมอยู่ในแนวตั้งหรือพื้นผิวร้อนและพื้นผิวเย็นอยู่ในแนวตั้ง ในขณะที่ผิวตามแนวนอนเป็นอะเดียบาติก (ไม่มีการถ่ายเทความร้อน) ให้ใช้สมการสำหรับช่วงอัตราส่วนของด้าน (Aspect ratio) ดังนี้

$$Nu = 0.22 \left(\frac{Pr}{0.2 + Pr} Ra_L \right)^{0.28} \left(\frac{H}{L} \right)^{-1/4} \quad (2.10)$$

$$\left[\begin{array}{l} 2 < H/L < 10 \\ Pr < 10^5 \\ Ra < 10^{10} \end{array} \right]$$

$$Nu = 0.18 \left(\frac{Pr}{0.2 + Pr} Ra_L \right)^{0.29} \quad (2.11)$$

$$\left[\begin{array}{l} 1 < H/L < 2 \\ 10^{-3} < Pr < 10^5 \\ \frac{Pr}{0.2 + Pr} Ra_L > 10^3 \end{array} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Nu = 0.42 Ra_L^{1/4} Pr^{0.012} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.3}$$

$$\left[\begin{array}{l} 10 < H/L < 40 \\ 1 < Pr < 2 \times 10^4 \\ 10^4 < Ra_L < 10^7 \end{array} \right] \quad (2.12)$$

$$Nu = 0.046 Ra_L^{1/3}$$

$$\left[\begin{array}{l} 1 < H/L < 40 \\ 1 < Pr < 20 \\ 10^6 < Ra_L < 10^9 \end{array} \right] \quad (2.13)$$

2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) (Incropera et al., 2007)

การแผ่รังสีความร้อน คือพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากสารในสถานะใดๆ ที่มีอุณหภูมิพื้นผิวมากกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (0 K) โดยไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางในการถ่ายเท และจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสุญญากาศ

สำหรับวัตถุดำหรือวัตถุดำดำ (Black body)

$$q = A_s \sigma T_s^4 \quad (2.14)$$

สำหรับวัตถุทั่วไป

$$q = \varepsilon A_s \sigma T_s^4 \quad (2.15)$$

อัตราการสุทธิของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิวกับสิ่งแวดล้อม คือ

$$q = \varepsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.16)$$

เมื่อ A_s คือพื้นที่ผิวของวัตถุ (m^2) σ คือค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann เท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ T_s คืออุณหภูมิผิวสัมบูรณ์ (K) T_{sur} คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K) ε คือสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity)

สามารถเขียนในรูปการพาความร้อนได้เป็น

$$q = h_r A_s (T_s - T_{sur}) \quad (2.17)$$

โดย $h_r = \varepsilon \sigma (T_s - T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2)$ คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเทียบเท่าเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อน (Equivalent radiative heat transfer coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ (กรกฎ, วัชระ และคมกฤต, 2549; Blank and Tarquin, 2012)

2.5.1 การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันของโครงการ (Present worth analysis)

วิธีการเลือกโครงการสำหรับโครงการที่มีอายุโครงการเท่ากัน โดยวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบัน เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันของโครงการ (Present worth, PW) ที่อัตราผลตอบแทนต่ำสุด (Minimum attractive rate of return, MARR) สำหรับแต่ละโครงการ จากนั้นเมื่อทราบค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value, NPV) ของแต่ละโครงการแล้ว เราจะเลือกโครงการที่มีค่า NPV สูงที่สุด (ค่าติดลบน้อยสุด)

วิธีการเลือกโครงการสำหรับโครงการที่มีอายุโครงการไม่เท่ากัน โดยวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบัน เริ่มต้นด้วยการทำให้อายุของแต่ละโครงการเท่ากันก่อน ด้วยวิธีหาตัวคูณร่วมน้อยของอายุโครงการที่ต้องการเปรียบเทียบ (Least common multiple, LCM) คือการเขียนผังกระแสเงินสด (cash flow) ของแต่ละโครงการซ้ำกันเป็นจำนวนรอบที่ทำให้อายุโครงการรวมเท่ากับค่าคูณร่วมน้อยนั้น จากนั้นก็ทำเช่นเดียวกับวิธีการเลือกโครงการที่มีอายุเท่ากัน

มูลค่าปัจจุบัน (Present worth, PW)

$$PW = F(P/F, i, n) = A(P/A, i, n) \quad (2.18)$$

เมื่อ F, A คือมูลค่าอนาคต และมูลค่าเทียบเท่ารายปี

$(P/A, i, n)$ $(P/F, i, n)$ คือค่าที่สามารถเปิดได้จากตารางตามสัญลักษณ์ (Standard Notation) โดย i และ n คือ อัตราดอกเบี้ยและจำนวนเวลาของโครงการ (ปี)

2.5.2 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนระหว่าง 2 ทางเลือก (Breakeven analysis)

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเป็นการแสดงค่าของตัวแปร หรือพารามิเตอร์ของโครงการ หรือทางเลือกที่ทำให้ค่าของรายรับ รายจ่ายมีค่าเท่ากัน และยังคงหมายถึง การวิเคราะห์ระยะเวลาการคืนทุน (Payback period) และการวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนด้วยมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดตัวแปรสามัญ
2. เลือกการวิเคราะห์แบบ AW หรือ PW ในการแสดงต้นทุนในแต่ละทางเลือก ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสามัญ
3. กำหนดความสัมพันธ์ทั้งสองเท่ากันและหาค่าคุ้มทุน
4. ถ้าระดับกำลังการผลิตต่ำกว่าจุดคุ้มทุน เลือกทางเลือกที่มีค่าต้นทุนแปรผันสูงกว่า ในทางกลับกัน ถ้าระดับกำลังการผลิตสูงกว่าจุดคุ้มทุน เลือกทางเลือกที่มีค่าต้นทุนแปรผันที่ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การศึกษาเชิงสำรวจเกี่ยวกับอุณหภูมิการใช้งานของตู้เย็นระดับครัวเรือน

Sergelidis et al. (1997) ได้ทำการประเมินปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *Listeria* spp. ในตู้เย็นภายในครัวเรือน ร้านค้าและโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศกรีซ พบว่าตู้เย็นภายในครัวเรือนมีเพียง 2 ตู้เท่านั้น (จากจำนวนทั้งหมด 136 ตู้) ที่ไม่พบเชื้อ *Listeria monocytogenes* สำหรับตู้เย็นภายในร้านค้าพบ *L. spp.* และ *L. monocytogenes* เท่ากับ 3.1% และ 1.7% จากตัวอย่างทั้งหมด (335 ตัวอย่างในตู้เย็น 228 ตู้) และมีตู้เย็น 9 ตู้ในโรงงานแปรรูปนม (diary product) ที่พบเชื้อ *L. spp.* และในโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์พบเชื้อ *L. innocua* และ *L. monocytogenes* ปริมาณ 36.4% และ 4.5% ตามลำดับ ภายในตู้เย็น 22 ตู้ และมีเพียงหนึ่งตู้ที่ตามจับตู้เย็นติดเชื้อ *L. monocytogenes* นอกจากนี้ยังทำการสำรวจอุณหภูมิภายในตู้เย็นด้วย พบว่า 55% ของตู้เย็นในครัวเรือน 136 ตู้ และ 32% ของตู้เย็นในร้านค้า 228 ตู้มีอุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ 9 องศาเซลเซียสและภายในโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์มีช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 – 2 องศาเซลเซียส และโรงงานแปรรูปนมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 2- 7 องศาเซลเซียส

Jackson et al. (2007) ได้ทำการประเมินจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษและระดับสุขลักษณะทั่วไปบนพื้นผิวภายในตู้เย็นครัวเรือนจำนวน 342 ตู้ พบว่ามี *Staphylococcus aureus* 6.4%, *Listeria monocytogenes* และ *E. coli* 1.2% และ *Yersinia enterocolitica* 0.6% ของตู้เย็นทั้งหมด ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถอยู่รอดและเจริญเติบโตได้ในตู้เย็นหรือมีสภาวะอุณหภูมิเบาบาง (mild temperature abuse) ซึ่งเชื้อเหล่านี้มีโอกาสที่จะถ่ายเทไปสู่อาหารในตู้เย็น จากการทดลองพบว่าการดูแลตู้เย็นของผู้บริโภคมีมาตรฐานและสุขลักษณะต่ำมาก ดังนั้นงานวิจัยชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมระดับอุณหภูมิอย่างเพียงพอในตู้เย็น ตลอดจนการทำ ความสะอาดตู้เย็นและการประกอบอาหารซึ่งเป็นจุดสุดท้ายของห่วงโซ่การบริการอาหาร

2.6.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในตู้เย็นชนิดหนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบน

Laguerre et al. (2002) ได้ทำการสำรวจอุณหภูมิการใช้งานของตู้เย็นในประเทศฝรั่งเศสระหว่างเดือนเมษายนถึงมิถุนายน ปีค.ศ.1999 โดยทำการวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ 3 ระดับคือ ด้านบน กึ่งกลาง และด้านล่างของตู้เย็นในบริเวณช่องแช่อาหารทั่วไป (Refrigerating compartment) ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) พร้อมทั้งเก็บข้อมูลอื่นๆ ได้แก่ ลักษณะของครอบครัวอาสาสมัคร ลักษณะของตู้เย็นและสภาวะการใช้งานจริง โดยจำนวนตู้เย็นที่ได้รับการสำรวจเท่ากับ 143 ตู้ แต่เนื่องจากปัญหาทางเทคนิคต่างๆ ทำให้สามารถเก็บข้อมูลอุณหภูมิของตู้เย็นได้เพียง 119 ตู้ และผลการสำรวจพบว่า อุณหภูมิใช้งานมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.6 องศาเซลเซียสโดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.9 องศาเซลเซียสและค่าสูงสุดเท่ากับ 11.4 องศาเซลเซียส และได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลแบบกลุ่ม (Clustering) และการแบ่งกลุ่ม (Segmentation) พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในตู้เย็นขึ้นอยู่กับชนิดของตู้เย็น ในส่วนท้ายของบทความได้แสดงผลกระทบจากสภาวะการใช้งานต่ออุณหภูมิภายในตู้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Laguerre et al. (2004) ได้ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติภายในตู้เย็นแบบไม่มีพัดลม โดยศึกษาการพาความร้อนแบบธรรมชาติภายในห้องเย็นเปล่า (Empty cavity) ระหว่างแผ่นราบแนวตั้งกับอากาศ และระหว่างทรงกระบอกกับอากาศเพื่อเข้าใจลักษณะกลไกการถ่ายเทความร้อน และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายปริมาณการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน การนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนในตู้เย็นตัวอย่าง ซึ่งค่าอุณหภูมิอากาศและปริมาณการทำความร้อนโดยเฉลี่ยจากการทำนายพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง นอกจากนี้งานวิจัยได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิอาหารเมื่อถูกนำมาแช่ในตู้เย็นพบว่าอาหารตัวอย่างต้องใช้เวลอย่างน้อย 2 ชั่วโมงเพื่อลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิบรรยากาศ (25 องศาเซลเซียส) เป็น 5 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิแนะนำสำหรับการเก็บรักษาอาหารประเภทเนื้อสัตว์ เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกัน

Amara et al. (2004) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อบอกปริมาณการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน การนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ในช่วงการลดอุณหภูมิด้วยอากาศความเร็วต่ำ ($u \leq 0.2 \text{ m/s}^2$) ภายในกองผลิตภัณฑ์อาหาร การทดลองใช้ตัวอย่างทรงกลมแทนผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งถูกจัดวางในลักษณะกองเรียงต่อกันเป็นแถว (in-line spherical arrangement) ผลการทดลองพบว่า การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน และการนำความร้อนมีความสำคัญเท่ากัน ไม่สามารถละเลยใดเดอมหนึ่งได้ นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นฟังก์ชันกับความเร็วของอากาศและตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ภายในกองผลิตภัณฑ์อาหาร

Laguerre et al. (2005) ได้ทำการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน โดยการพาแบบธรรมชาติ ระหว่างอากาศกับผนังแนวตั้งด้านอุณหภูมิต่ำและด้านอื่นๆที่มีอุณหภูมิสูงกว่าของตู้เย็นตัวอย่าง โดยทำการตรวจสอบโปรไฟล์ของอุณหภูมิอากาศภายในชั้นขอบเขต (Boundary layer) และภายในบริเวณกึ่งกลางของตู้เย็นตัวอย่างเปล่า และสังเกตการแบ่งชั้นของอุณหภูมิ (Temperature stratification) ในทิศทางแนวตั้งบริเวณอุณหภูมิต่ำด้านล่างและบริเวณอุณหภูมิสูงด้านบนภายในตู้เย็น พร้อมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิและพื้นที่ผิวของผนังอุณหภูมิต่ำต่ออุณหภูมิอากาศภายในตู้เย็น นอกจากนี้มีการใส่กล่องวัตถุทรงกลมกลางจำนวน 4 กองในตู้เย็นตัวอย่างเพื่อศึกษาผลของสิ่งกีดขวางต่อโปรไฟล์ของอุณหภูมิอากาศ และนำโปรไฟล์ของอุณหภูมิแบบไม่มีและมีส่วนกีดขวางมาเปรียบเทียบกัน พบว่าตู้เย็นที่ใส่สิ่งกีดขวางมีอุณหภูมิของอากาศต่ำกว่าในทุกๆจุด และดูเหมือนว่ากลุ่มวัตถุตัวอย่างจะทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณใกล้กับผนังอุณหภูมิต่ำดีขึ้นกล่าวคือไม่เสมอว่าตู้เย็นที่ใส่ผลิตภัณฑ์จะมีอุณหภูมิสูงกว่าตู้เย็นเปล่า

Laguerre et al. (2007) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนภายในตู้เย็นแบบไม่มีพัดลม และโครงสร้างตู้เย็นที่ศึกษามีทั้งหมด 3 แบบได้แก่ ตู้เย็นเปล่าตู้เย็นมีชั้นวางทำจากกระจกและตู้เย็นที่มีผลิตภัณฑ์บรรจุอยู่ภายใน ด้วยวิธีการทดลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข การถ่ายเทความร้อนทั้งแบบคิดและไม่คิดค่าการแผ่รังสีความร้อนจำลองด้วย CFD (Computational Fluid Dynamic) โดยตั้งสมมติฐานว่าอุณหภูมิของเครื่องระเหยคงที่และการไหลของอากาศเป็นแบบราบเรียบสามทิศทาง ผลการทดลองเชิงตัวเลขแสดงการแบ่งชั้นของอุณหภูมิในส่วนแช่ผลิตภัณฑ์ทั่วไปว่าบริเวณอุณหภูมิที่ต่ำจะอยู่ด้านล่างและบริเวณอุณหภูมิที่สูงกว่าจะอยู่ด้านบนของตู้เย็นทั้งสาม

โครงสร้าง เมื่อเปรียบเทียบผลจากการคำนวณกับผลการทดลองพบว่าแบบจำลองสามารถยอมรับได้ เมื่อคิดปริมาณการแผ่รังสีความร้อนร่วมด้วย

Laguerre et al. (2009) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของความชื้นในตู้เย็นจากกล่องเก็บผักและผลไม้ในตู้เย็น การทดลองได้ใช้ตู้สี่เหลี่ยมแนวตั้งที่เต็มไปด้วยท่อทรงกระบอก โดยผนังด้านหนึ่งทำจากอลูมิเนียมคงอุณหภูมิไว้ที่ 1 องศาเซลเซียสผนังตรงข้ามทำจากกระจกซ้อนที่ซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนกับบรรยากาศ (21 องศาเซลเซียส) และผนังอื่นๆหุ้มฉนวนไว้ การวัดความเร็วอากาศใช้ PIV อุณหภูมิอากาศใช้เทอร์โมคอปเปอร์และความชื้นในอากาศใช้ ไฮโกรมิทรี (Hygrometry) พบว่า การระเหยของน้ำส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในอากาศภายในตู้ โดยเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วเพิ่มขึ้น และบริเวณด้านล่างของตู้การเพิ่มขึ้นของความชื้นมีผลชัดเจนที่สุดต่ออุณหภูมิอากาศและท่อทรงกระบอก มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นเล็กน้อยในกล่องเก็บผักและผลไม้ของตู้เย็น

Laguerre et al. (2010) ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายสำหรับการเกิดการถ่ายเทความร้อนภายในตู้เย็นแบบไม่มีพัดลม โดยแบบจำลองพิจารณาถึงการไหลเวียนของอากาศ การเปลี่ยนแปลงความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศกับผนังด้านต่างๆ และระหว่างอากาศกับไหลภายในตู้ รวมไปถึงการแผ่รังสีของผนังและไหลด้วย และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กับความสูง (บน ล่าง) และตำแหน่ง (ใกล้ผนังอุณหภูมิต่ำหรือสูง) ของตู้เย็น โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ 2 ค่าได้แก่อุณหภูมิห้องและเทอร์โมสแตท (thermostat) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าอุณหภูมิอากาศและไหลได้ และนำค่าที่ได้จากคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองปรากฏว่าสามารถยอมรับได้ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินความเสี่ยงได้

2.6.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในตู้เย็นชนิดสองประตูที่มีช่องแช่แข็งด้านบน

Yang et al. (2010) ได้ทำการตรวจสอบและศึกษาการถ่ายเทอุณหภูมิภายในตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านบน เพื่อออกแบบช่องปล่อยลมเข้าสู่ช่องแช่เย็นให้อากาศภายในตู้เย็นมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น โดยการศึกษาได้เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของตู้เย็นก่อนการออกแบบช่องปล่อยลมกับตู้เย็นหลังการติดตั้งช่องปล่อยลม ผลปรากฏว่าอากาศภายในตู้เย็นที่มีการออกแบบช่องปล่อยลมแบบใหม่ อากาศภายในช่องแช่เย็นมีความสม่ำเสมอเพิ่มขึ้นและผลการทดลองกับผลการจำลองมีความสอดคล้องกัน

Gupta et al. (2007) ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทความร้อนและการไหลเวียนของอากาศภายในตู้เย็นสองประตูช่องแช่แข็งด้านบนแล้วจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยในการศึกษาพิจารณาทั้งช่องแช่แข็งและช่องแช่เย็นของตู้เย็น ผลการศึกษาด้วยการจำลองและการทดลองพบว่าสอดคล้องกัน ด้วยแบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของตู้เย็นต่อไปได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 การสำรวจ

การสำรวจและการศึกษาข้อมูลลักษณะการเลือกใช้อุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นเพื่อเก็บรักษาวัตถุดิบอาหารของแผงค้าอาหารในเขตลาดกระบัง ได้แก่ ตู้เย็นและถังน้ำแข็ง มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ที่เลือกประเภทและขนาดของอุปกรณ์รักษาความเย็นตัวอย่างในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์แต่ละชนิด นอกจากนี้การสำรวจได้เก็บข้อมูลอุณหภูมิการใช้งานของอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นแต่ละชนิด เพื่อวิเคราะห์ระดับอุณหภูมิการใช้งานจริงของแผงค้าอาหาร ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมากต่อความปลอดภัยของอาหาร

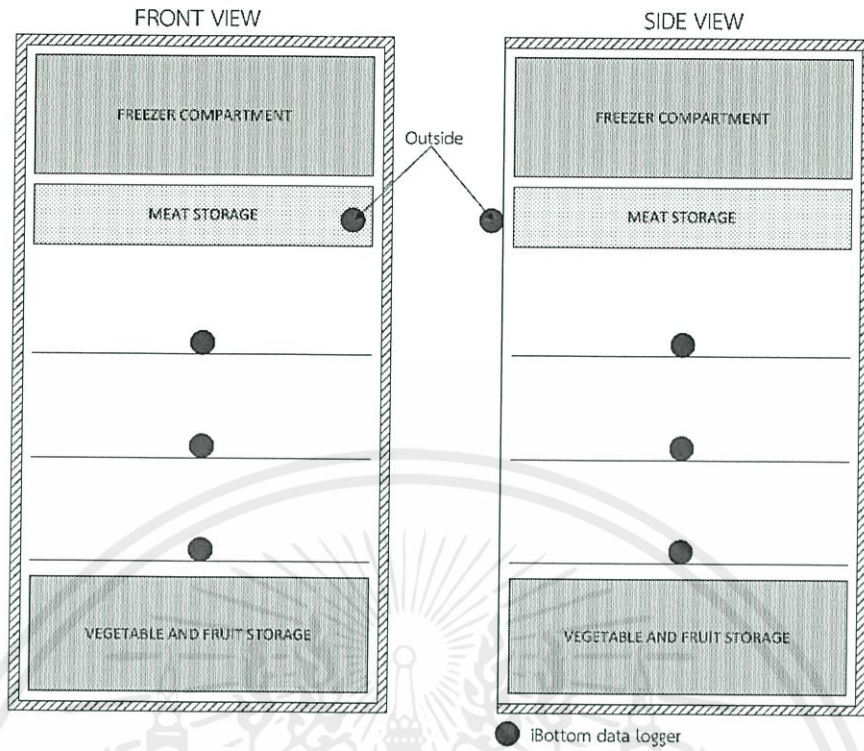
3.1.1 แบบสอบถาม

การจัดทำแบบสอบถามการสำรวจ ได้กำหนดหัวข้อเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลต่างๆของอุปกรณ์รักษาความเย็นที่ใช้งานจริงโดยผู้ประกอบการแผงค้าอาหาร ดังนี้

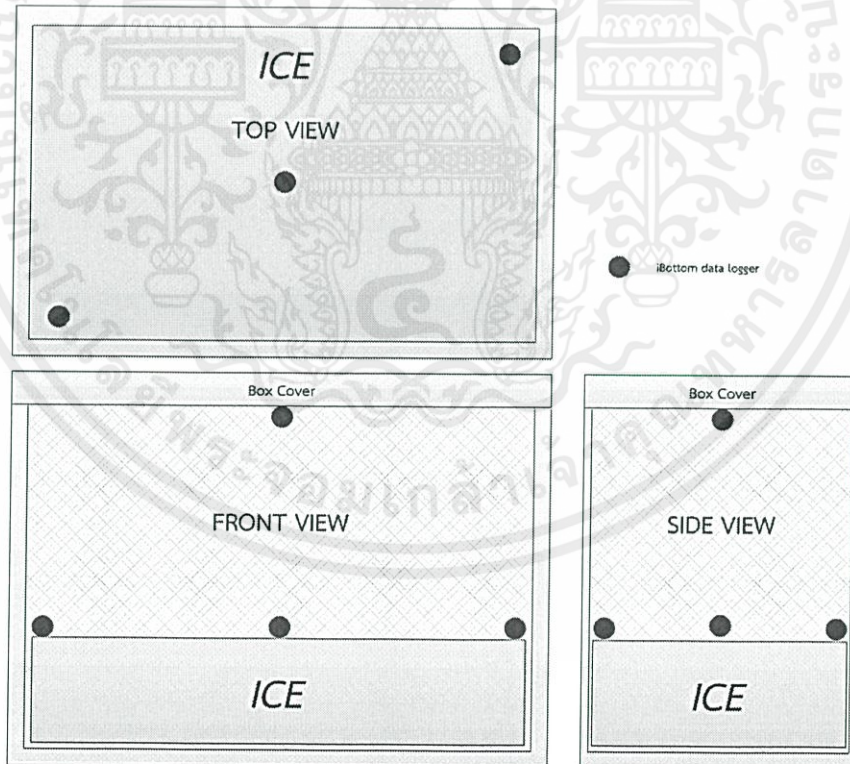
ประเภทของแผงค้าอาหาร ได้แก่

- ร้านอาหารพร้อมปรุง (order) เช่น ร้านอาหารตามสั่งร้านก๋วยเตี๋ยว และร้านส้มตำ ฯลฯ
- ร้านอาหารปรุงสำเร็จ (ready to eat) เช่นร้านข้าวแกง ร้านข้าวมันไก่ ฯลฯ
- ร้านขายของชำ (Grocery) เช่น ร้านขายเครื่องดื่ม ร้านขายเนื้อสด ร้านขายผักสด ฯลฯ
- ประเภทของตู้เย็น (Refrigerators) ได้แก่ หนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบน (Single door top freezer) สองประตูช่องแช่แข็งด้านบน (Double door top freezer) สองประตูช่องแช่แข็งด้านล่าง (Double door bottom freezer) หนึ่งประตูกระจก (One glass door) สองประตูกระจก (Double glass door)และอื่นๆ
- ประเภทถังน้ำแข็ง (Ice boxes) ได้แก่ พลาสติก โลหะและโฟม
- ข้อมูลสถานะการใช้อุปกรณ์รักษาความเย็น ได้แก่ ยี่ห้อ ขนาดช่องทำความเย็น ลักษณะพื้นที่ใช้งาน (ในร่ม กลางแจ้งหรือบางส่วน) อุณหภูมิบรรยากาศลักษณะการละลายน้ำแข็งของตู้เย็น ปริมาณและชนิดน้ำแข็งที่ใช้กับถังน้ำแข็งและอุณหภูมิการใช้งานของอุปกรณ์รักษาความเย็นเหล่านั้น โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 และตัวอย่างแบบสำรวจแสดงอยู่ในภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในตู้เย็น



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ซึ่งในเมื่อมีการเผยแพร่ข้อมูลนี้ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ จะถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ขอบเขตการสำรวจ

ขอบเขตการสำรวจอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นของแผงค้าอาหาร อยู่ภายในพื้นที่เขตลาดกระบังได้แก่ โรงอาหารภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ซอยเกี๊ยะงาม 1 ถึง 3 โครงการหอพักอาร์เอ็นพีเพลส เนื่องจากพื้นที่เหล่านี้เป็นแหล่งชุมชนที่มีแผงค้าอาหารหลากหลายรูปแบบจำนวนมาก

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการสำรวจ

1. Data Logger ชนิด iBotton รุ่น DS1921G	จำนวน	6	เครื่อง
2. คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Compaq CQ40	จำนวน	1	เครื่อง
3. ตลับเมตร	จำนวน	2	อัน
4. ไม้บรรทัดเหล็กยาว 1 เมตร	จำนวน	1	ด้าม
5. ถ้วยพลาสติกขนาด 425 มิลลิลิตร	จำนวน	4	ถ้วย
6. เชือก	จำนวน	1	ม้วน
7. เทปกาว PVC	จำนวน	2	ม้วน
8. นาฬิกาจับเวลา	จำนวน	1	เครื่อง
9. กล้องถ่ายรูป Samsung 5X	จำนวน	1	เครื่อง
10. แบบฟอร์มสำรวจ	จำนวน	60	ชุด

3.1.4 วิธีการสำรวจ

สำรวจรูปแบบแผงค้าและอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นตามหัวข้อในแบบสอบถามและวัดอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นเพื่อสำรวจอุณหภูมิใช้งานของแผงค้าอาหารโดยใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ (Data logger iButton DS1921G) ช่วงการวัดอุณหภูมิเท่ากับ -30 ถึง +70 องศาเซลเซียสความแม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที บันทึกค่าทุกๆ 1 นาที รวบรวม วิเคราะห์และสรุปผลการสำรวจ

3.2 การทดลอง

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการกระจายอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็น มีวิธีการทดลอง โดยอาศัยเครื่องมือและอุปกรณ์ ดังนี้

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

1. ตู้เย็น ยี่ห้อ MITSUBISHI ELECTRIC รุ่น MR-F26D-SL ประเทศไทย
2. ถังน้ำแข็งพลาสติก KSP.N. ขนาด 200 ลิตร
3. Data Logger ชนิด iBotton รุ่น DS1921G
4. คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Compaq CQ40
5. น้ำแข็งบด
6. เนื้อไก่บด 8 กิโลกรัม

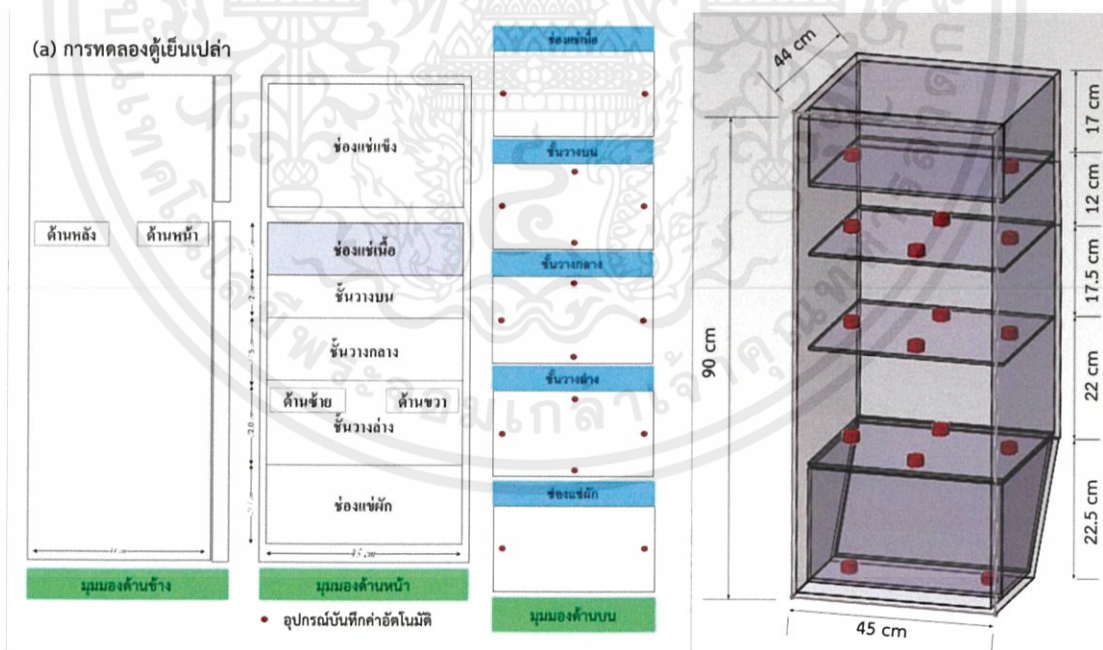
เอกสารนี้เป็นเอกสาร (เนื้อไก่บด 100 กรัมประกอบด้วยไขมัน 24% และคอเลสเตอรอล 35%) ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองประกอบด้วย การทดลองวัดอุณหภูมิภายในตู้เย็นและถังน้ำแข็งและการทดลองดำเนินการภายใต้ 2 สภาวะได้แก่ สภาวะอุปกรณ์เปล่าและสภาวะอุปกรณ์บรรจุไหลด โดยมีรายละเอียดดังนี้

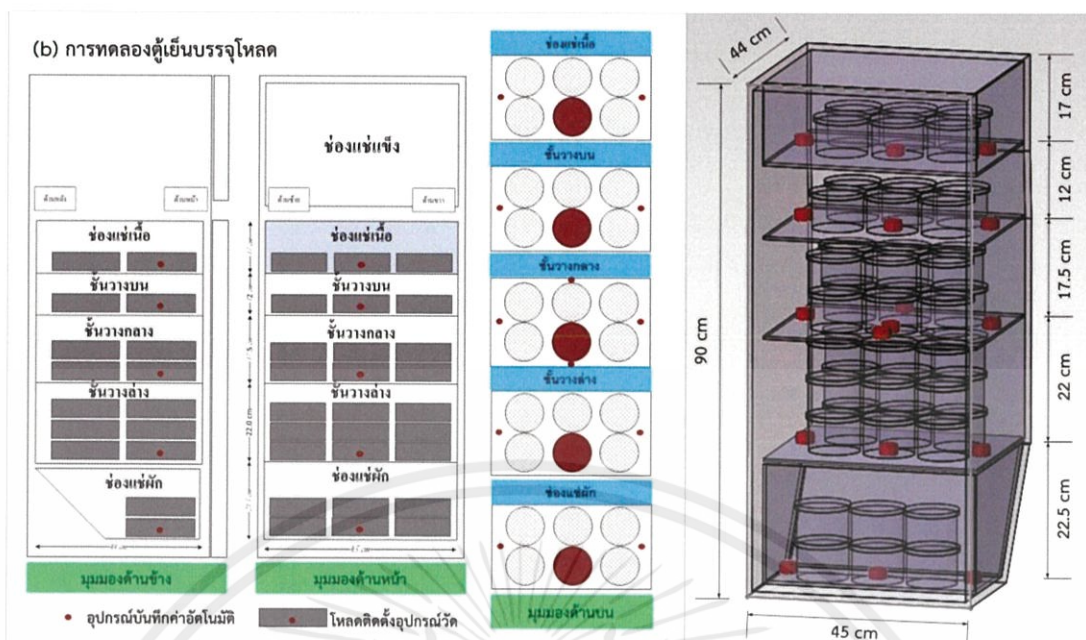
1) ตู้เย็น

การทดลองใช้ตู้เย็นชนิดสองประตูที่มีช่องแช่แข็งด้านบน ยี่ห้อ Mitsubishi Electric: รุ่น MR-F26D ขนาด 8 คิว โดยมีขนาดของช่องแช่เย็นเท่ากับ 178.2 ลิตร (0.45 x 0.44 x 0.90 เมตร) การวัดอุณหภูมิภายในใช้อุปกรณ์บันทึกค่าอัตโนมัติ (Data logger iButton DS1921G) เป็นเวลา 22 ชั่วโมง บันทึกค่าทุกๆ 1 นาที โดยติดตั้งอุปกรณ์วัด 16 จุดโดยพิจารณาเฉพาะภายในช่องแช่เย็นสำหรับตู้เย็นเปล่าและ 12 จุดสำหรับตู้เย็นบรรจุไหลดหรือตัวอย่างอาหารในการทดลองได้ปรับค่าระดับอุณหภูมิภายในช่องแช่แข็งของตู้เย็น 3 สภาวะคือ ระดับสูง (High), ระดับกลาง (Medium) และระดับต่ำ (Low) ตามลำดับ โดยความหมายของระดับสูงคือ อุณหภูมิภายในตู้เย็นมีค่าต่ำ ในขณะที่ระดับต่ำหมายถึงอุณหภูมิภายในตู้เย็นมีค่าสูง สำหรับไหลดที่ใช้บรรจุภายในตู้เย็นมี 2 ชนิด คือ 1) เนื้อไก่บดและ 2) น้ำสะอาดบรรจุภายในถ้วยพลาสติกขนาด 425 มิลลิลิตรพร้อมฝาครอบ โดยแบ่งเป็นบรรจุเนื้อไก่บดจำนวน 5 ถ้วยซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิไว้ภายในและอีก 43 ถ้วยบรรจุน้ำสะอาดวางกระจายภายในตู้เย็น คิดเป็นปริมาตรการบรรจุไหลดเท่ากับ 12% ของปริมาตรการบรรจุทั้งหมดของช่องแช่เย็นโดยรูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในตู้เย็นเปล่า และรูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในตู้เย็นบรรจุไหลด



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในตู้เย็นเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



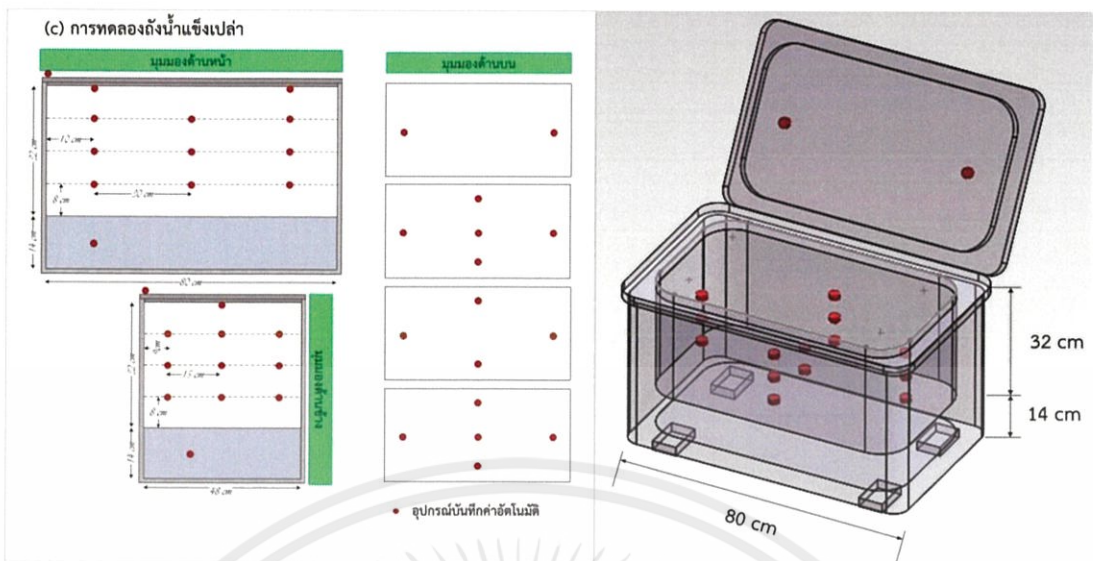
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในตู้เย็นบรรจุโพลด

2) ถังน้ำแข็ง

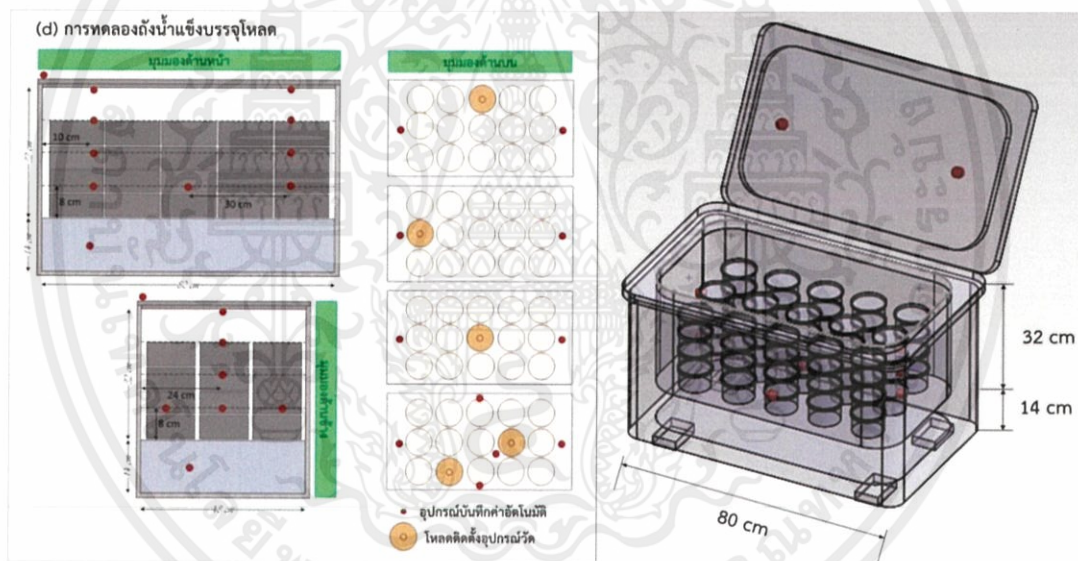
การทดลองใช้ถังน้ำแข็งพลาสติกขนาด 176.6 ลิตร ($0.80 \times 0.48 \times 0.46$ เมตร) และใช้น้ำแข็งบดเป็นแหล่งให้ความเย็น บรรจุน้ำแข็งจำนวน 50 กิโลกรัม คิดเป็นปริมาตร 53.8 ลิตร (30% ของปริมาตรถังน้ำแข็ง)¹ การวัดอุณหภูมิใช้อุปกรณ์และวิธีการเช่นเดียวกับการวัดอุณหภูมิภายในตู้เย็นคือใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ (Data logger iButton DS1921G) ช่วงการวัดอุณหภูมิเท่ากับ -30 องศาเซลเซียส ถึง $+70$ องศาเซลเซียสความแม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชั่วโมง บันทึกค่าทุก ๆ 1 นาที โดยวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่าจำนวน 16 จุดและภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลดจำนวน 11 จุด สำหรับโพลดที่ใช้บรรจุเหมือนกับการทดลองตู้เย็นซึ่งประกอบด้วยเนื้อไก่บดจำนวน 5 ถ้วย (ติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ) และน้ำสะอาดจำนวน 55 ถ้วย คิดเป็น 14% ของปริมาตรบรรจุทั้งหมดรูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่าและรูปที่ 3.6 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

¹ ข้อพิจารณาการใช้ปริมาณน้ำแข็งคือ 1) ค่าเฉลี่ยปริมาณการใช้น้ำแข็งจริงของแผงอาหาร และ 2) ปริมาตรบรรจุหลังบรรจุน้ำแข็งภายในถังน้ำแข็งต้องใกล้เคียงกับปริมาตรบรรจุภายในตู้เย็น



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่า



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุหลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CFD)

CFD หรือ Computational Fluid Dynamics เป็นวิธีการหนึ่งสำหรับการศึกษากิจกรรมของของไหลโดยคำนวณจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับการศึกษากาโรไหลอากาศและการกระจายอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็น CFD เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง (Smale et al., 2006) และในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จให้นำไปประยุกต์ใช้มากมาย เช่น Fluent Kameleon หรือ Comsol เป็นต้น แต่สำหรับโครงการนี้ได้ใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 4.1® เป็นโปรแกรมสำหรับการศึกษาลองการถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้งสองประเภทโดยการกำหนดขอบเขตมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 สมมติฐานการจำลอง

การถ่ายเทความร้อนภายในตู้เย็น โดยพิจารณาเฉพาะบริเวณช่องแช่เย็น (Refrigerating Compartment) มีสมมติฐานการจำลอง ดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนภายในช่องแช่เย็นเป็นการพาความร้อนโดยธรรมชาติซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอากาศอันเกิดจากเกรเดียนอุณหภูมิและเกรเดียนความชื้นในลักษณะ 3 มิติ (Three dimensional heat transfer)
2. การไหลภายในเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) โดยพิจารณาจากเรย์ลีนัมเบอร์ (Rayleigh number) โดยเรย์ลีนัมเบอร์วิกฤติที่เปลี่ยนการไหลจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเท่ากับ 10^9
3. การคำนวณการถ่ายเทความร้อนอยู่ภายใต้สภาวะคงที่ (steady state)
4. ไม่พิจารณาการรั่วไหลของอากาศ การเกิดผลึกน้ำแข็งและการถ่ายเทมวลภายในระบบ
5. ไม่พิจารณาการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผนังและชั้นวางภายในช่องแช่เย็น
6. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างช่องแช่แข็งลงสู่ช่องแช่เย็น
7. อุณหภูมิและความเร็วของอากาศกำหนดที่ช่องปล่อยอากาศเข้า

สำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในถังน้ำแข็ง มีสมมติฐานดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนเป็นการนำความร้อนภายในของไหล เนื่องจากอากาศภายในถังน้ำแข็งหยุดนิ่ง (stagnant) ในลักษณะ 3 มิติ
2. ไม่มีการไหลของอากาศภายในถังน้ำแข็ง
3. การคำนวณการถ่ายเทความร้อนอยู่ภายใต้สภาวะคงที่ (steady state)
4. กำหนดพื้นผิวน้ำแข็งเป็นพื้นผิวเรียบสมมาตรสมออุณหภูมิคงที่ที่ -0.5 องศาเซลเซียส

3.3.2 ขอบเขตการจำลอง

การจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในตู้เย็นและถังน้ำแข็ง ทั้งสภาวะอุปกรณ์เปล่าและบรรจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ขอบเขต (boundary conditions) ของการจำลองการถ่ายความร้อนภายในตู้เย็น

Physics Module	Conjugate Heat Transfer	
Boundary conditions	Temperature profile	Velocity profile
สภาวะเริ่มต้น	$T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$u = 0(\hat{i} + \hat{j} + \hat{z})\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
ช่องทางเข้าอากาศ (inlet)	อุณหภูมิของไหลเท่ากับ $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$	Laminar inflow $U_{av} = 1.20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
ช่องทางอากาศออก (outlet)	-	Pressure, no viscous stress
ผนัง		
ผนังด้านบน	ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (ฉนวน)	ไม่มีการไถล (No slip)
ผนังด้านล่าง	ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (ฉนวน)	ไม่มีการไถล (No slip)
ผนังด้านขวา	การถ่ายเทแบบการพาความร้อน	ไม่มีการไถล (No slip)
ผนังด้านซ้าย	อุณหภูมิของไหลด้านนอก	
ผนังด้านหน้า	$T_{ext} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$	
ผนังด้านหลัง	$U = 0.52\text{ W}/\text{m}^2\text{K}^{-1}$	
วัสดุภายในตู้เย็น กำหนดให้อากาศเป็นสารทำงานภายในระบบ แก้วเป็นชั้นวางภายในตู้เย็น น้ำเป็นไหล โดยคุณสมบัติทางความร้อนเป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรม COMSOL Multiphysics 4.1 ®		

ตารางที่ 3.2 ขอบเขต (boundary conditions) ของการจำลองการถ่ายความร้อนภายในถังน้ำแข็ง

Physics Module	Heat Transfer in Fluids	
Boundary conditions	Temperature profile	
สภาวะเริ่มต้น	$T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	
ผนังด้านบน	การถ่ายเทแบบการพาความร้อน อุณหภูมิของไหลด้านนอก $T_{ext} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ $U = 0.325\text{ W}/\text{m}^2\text{K}^{-1}$	
ผนังด้านล่าง	กำหนดเป็นผิวน้ำแข็งอุณหภูมิคงที่ $Temperature = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$	
ผนังด้านขวา	การถ่ายเทแบบการพาความร้อน	
ผนังด้านซ้าย	อุณหภูมิของไหลด้านนอก $T_{ext} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ $U = 0.52\text{ W}/\text{m}^2\text{K}^{-1}$	
ผนังด้านหน้า		
ผนังด้านหลัง		
กำหนดให้อากาศเป็นสารทำงานภายในระบบ น้ำเป็นไหล โดยคุณสมบัติทางความร้อนเป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรม COMSOL Multiphysics 4.1 ®		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการสำรวจ

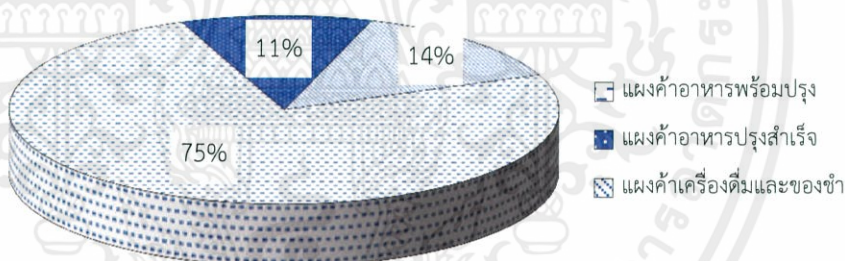
ผลการสำรวจประกอบด้วย ผลการสำรวจการใช้งานอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นของแผงค้าอาหารและผลการรวบรวมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอายุการเก็บรักษาอาหารประเภทต่างๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมา

4.1 การสำรวจ

จากการสำรวจอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นที่แผงค้าอาหารเลือกใช้ ภายในโรงอาหารสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและบริเวณโดยรอบจำนวน 80 แผงค้า มีผลการสำรวจดังนี้

4.1.1 ประเภทของแผงค้าอาหาร

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการสำรวจประเภทของแผงค้าอาหารจำนวน 80 แผงค้า พบว่ามีแผงค้าอาหารทั้งหมด 3 ประเภท ประกอบด้วย แผงค้าอาหารพร้อมปรุง (Order) จำนวน 60 แผงค้า แผงค้าอาหารปรุงสำเร็จ (Ready to eat) จำนวน 9 แผงค้า และแผงค้าเครื่องดื่มและของชำ (Beverage or Grocery) จำนวน 11 แผงค้า (โดยลักษณะของแผงค้าแต่ละประเภทรายละเอียดแสดงอยู่ในภาคผนวก)

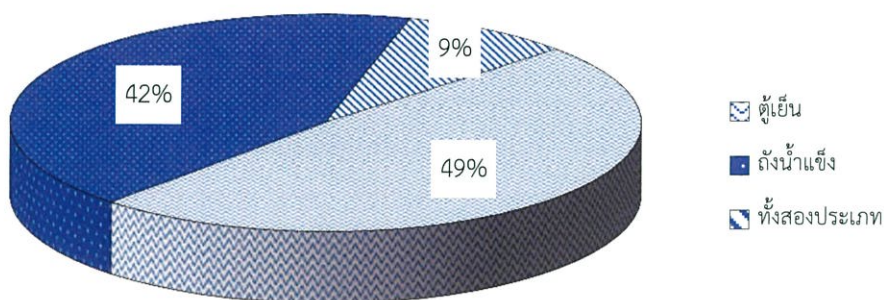


รูปที่ 4.1 ประเภทของแผงค้าอาหารจากการสำรวจ จำนวน 80 แผงค้า

4.1.2 ประเภทอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นของแผงค้าอาหาร

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการสำรวจของประเภทอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นที่แผงค้าอาหารจำนวน 80 แผงค้าเลือกใช้พบว่า มีอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้งหมด 2 ประเภทที่แผงค้าอาหารเลือกใช้ ได้แก่ ตู้เย็น (Refrigerators) จำนวน 39 แผงค้า ถังน้ำแข็ง (Ice box) จำนวน 34 แผงค้า และเลือกใช้ทั้งตู้เย็นและถังน้ำแข็ง จำนวน 7 แผงค้า เมื่อพิจารณาจำนวนอุปกรณ์รักษาความเย็นจะมีการใช้ตู้เย็นทั้งหมดจำนวน 46 ตู้และมีจำนวนถังน้ำแข็งทั้งหมด 41 ถัง ดังนั้นพบว่าแผงค้าอาหารส่วนใหญ่เลือกใช้ตู้เย็นเพื่อเป็นอุปกรณ์เก็บรักษาอาหารมากกว่าถังน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ประเภทอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นที่แผงค้าอาหารเลือกใช้ จำนวน 80 แผงค้า

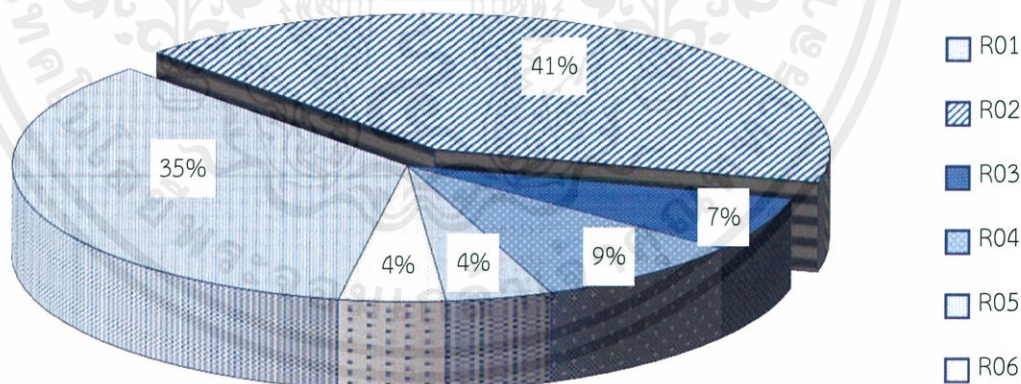
4.1.3 ตู้เย็น (Refrigerator)

1) ชนิดตู้เย็น

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการสำรวจชนิดตู้เย็นที่แผงค้าอาหารเลือกใช้ จำนวน 46 ตู้ พบว่ามีตู้เย็นทั้งหมด 6 ชนิด ประกอบด้วย

1. ตู้เย็นหนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบน (R01) จำนวน 16 ตู้
2. ตู้เย็นสองประตูช่องแช่แข็งด้านบน (R02) จำนวน 19 ตู้
3. ตู้เย็นสองประตูช่องแช่แข็งด้านล่าง (R03) จำนวน 3 ตู้
4. ตู้เย็นหนึ่งประตูกระจก (R04) จำนวน 4 ตู้
5. ตู้เย็นสองประตูกระจก (R05) จำนวน 2 ตู้ และ
6. ตู้เย็นชนิดอื่นๆ (R06) จำนวน 2 ตู้ ได้แก่ ตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านข้าง

จากผลการสำรวจนี้สรุปได้ว่าตู้เย็นที่แผงค้าอาหารส่วนใหญ่เลือกใช้คือ ตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านบน (Frost-free refrigerator with top freezer)



รูปที่ 4.3 ชนิดตู้เย็นที่แผงค้าอาหารเลือกใช้ จำนวน 46 ตู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) อุณหภูมิใช้งานของตู้เย็น

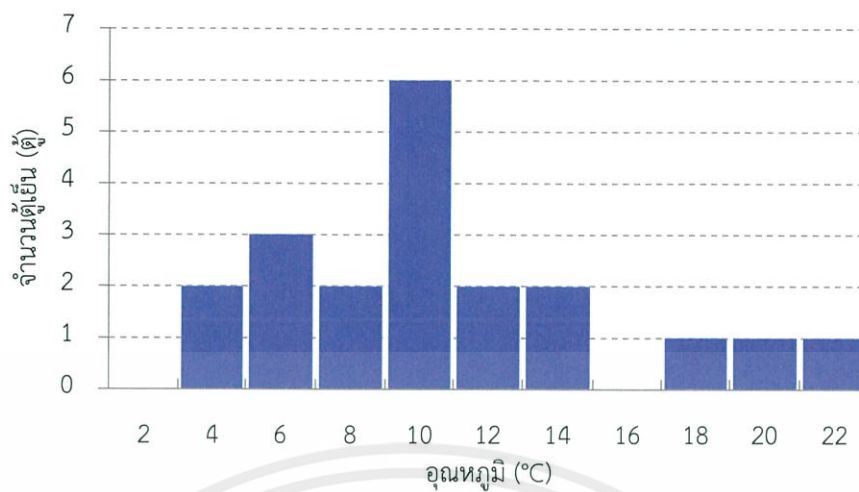
จากการสำรวจได้สุ่มเลือกตู้เย็นของแผงค้าอาหารจากทั้งหมด 46 ตู้จำนวน 20 ตู้ เพื่อเฝ้าสังเกตระดับอุณหภูมิใช้งานภายในตู้เย็น โดยการวัดด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ (Data logger iButton รุ่นDS1921G) ช่วงการวัดอุณหภูมิเท่ากับ -30 ถึง +70 องศาเซลเซียส ความแม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที บันทึกค่าทุกๆ 1 นาที ได้ผลการสำรวจแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิภายในตู้เย็นโดยรวม (Overall temperature) เฉลี่ยเท่ากับ 11.56 องศาเซลเซียส ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.91 องศาเซลเซียสมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.65 องศาเซลเซียสและค่าสูงสุดเท่ากับ 22.24 องศาเซลเซียส และจากรูปที่ 4.4 แสดงจำนวนและระดับอุณหภูมิภายในของตู้เย็นพบว่า อุณหภูมิภายในตู้เย็นส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 9 – 11 องศาเซลเซียสและ 90 เปอร์เซ็นต์ของตู้เย็นทั้งหมดทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 5 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิภายในตู้เย็นมาตรฐาน (FSANZ, 2001) เมื่อเปรียบเทียบผลการสำรวจกับงานวิจัยในต่างประเทศ (James et al., 2008) พบว่าระดับอุณหภูมิใช้งานภายในตู้เย็นของแผงค้าอาหารมีมาตรฐานต่ำมาก เนื่องจากอุณหภูมิใช้งานภายในตู้เย็นเฉลี่ยของในต่างประเทศอยู่ในช่วง 5 – 7 องศาเซลเซียส และมีตู้เย็นเพียง 80% เท่านั้นที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยเกินอุณหภูมิมาตรฐาน ดังตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิภายในตู้เย็นจากการสำรวจในต่างประเทศ

นอกจากนี้จากตารางที่ 4.1 พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างด้านบน กึ่งกลาง และด้านล่างของตู้เย็นไม่แตกต่างกันมาก ในขณะที่เมื่อพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งภายในตู้เย็นแต่ละชนิด ตามรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งภายในตู้เย็นกับชนิดของตู้เย็นพบว่า มีความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งภายในตู้เย็นค่อนข้างมากกล่าวคือ ตู้เย็นชนิดหนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบน อุณหภูมิบริเวณด้านบนจะมีค่าต่ำสุดและอุณหภูมิบริเวณด้านล่างจะมีค่าสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการสำรวจของ Laguerre et al. (2002) ในขณะที่ตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านบนจะมีอุณหภูมิด้านล่างต่ำสุด และอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางสูงสุด และตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านล่าง จะมีอุณหภูมิด้านบนต่ำสุดและอุณหภูมิด้านล่างสูง ส่วนตู้เย็นชนิดหนึ่งประตูกระจกและสองประตูช่องแช่แข็งด้านข้างไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากสุ่มตัวอย่างตู้เย็นมาเพียงชนิดละ 1 ตัวอย่างเท่านั้น จากความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งนี้พบว่า ตำแหน่งในการเก็บผลิตภัณฑ์อาหารภายในตู้เย็นมีความสำคัญมากต่อการถนอมหรือรักษาผลิตภัณฑ์อาหารภายใต้ความเย็นจากรูปที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้เย็น 3 ชนิดได้แก่ ชนิดหนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบน (R01) ชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านบน (R02) และชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านล่าง (R03)

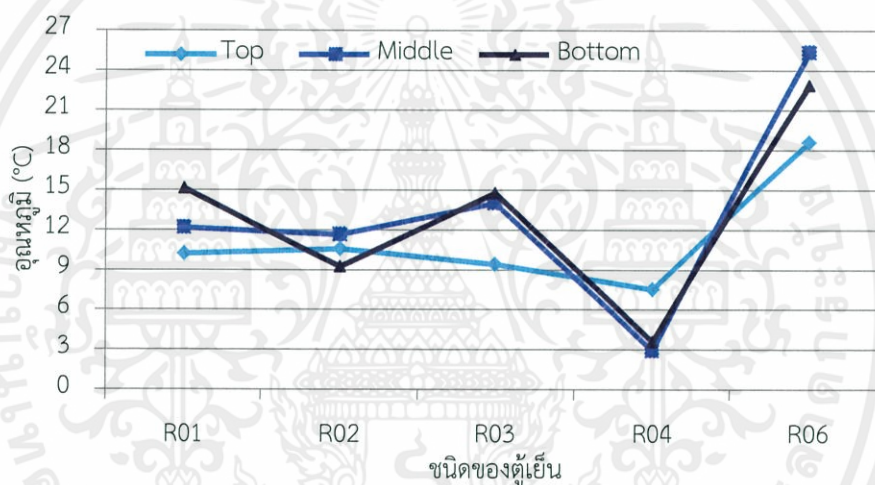
ตารางที่ 4.1 ระดับอุณหภูมิภายในตู้เย็นเฉลี่ย จำนวน 20 ตู้

ตำแหน่ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	จำนวน (number)	ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)	ค่าต่ำสุด (min)	ค่าสูงสุด (max)
บรรยากาศ	20	32.19	1.76	28.70	35.80
ชั้นวางบน	20	10.56	4.20	3.03	18.83
ชั้นวางกลาง	16*	12.26	6.31	2.87	25.33
ชั้นวางล่าง	20	11.94	6.13	0.13	22.87
ค่าเฉลี่ยรวม	20	11.56	4.91	4.65	22.24

* เนื่องจากสภาวะการใช้งานอุปกรณ์ไม่เหมาะสมจึงไม่สามารถวัดค่าอุณหภูมิในตำแหน่งนั้นได้



รูปที่ 4.4 ระดับอุณหภูมิภายในตู้เย็น จำนวน 20 ตู้



รูปที่ 4.5 ความแตกต่างของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งภายในตู้เย็นแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายในตู้เย็นจากงานสำรวจประสิทธิภาพการใช้งานตู้เย็นตามครัวเรือนในต่างประเทศ (ที่มา: James et al., 2008)

Reference	Country	n	Measurement	T_{min}	T_{mean}	T_{max}	% in temperature range
Van Garde and Woodburne (1987)	USA	-	Not known				21% ≥ 10 °C
Rose et al. (1990)	UK	75	Not known		< 5	15	6% > 5 °C
Evans et al. (1991)	UK	252	Data logger (3 levels: T, M, B)	0.9	6.0	11.4	70% > 5 °C
Flynn et al. (1992)	Northern Ireland	150	Thermometer (3 levels: T, M, B)	0.8	6.5	12.6	71% > 5 °C
Victoria (1993) ^a	France	102	Thermometer (3 levels: T, M, B)			14	70% > 6 °C
LezenneCoulander de (1994) ^b	The Netherlands	125	Thermometer				30% < 5 °C 42% 5 – 7 °C 26% 7 – 9 °C 2% > 9 °C
O'Brien (1997)	New Zealand	50	Thermometer (2 levels: T, B)	0	4.9	11	60% > 4 °C
Sergelidis et al. (1997)	Greece	136	Thermometer				50% > 9 °C
Worsfold and Griffith (1997)	UK	108	Data logger (1 position)	2	5.9	12	50% > 5 °C
Daniels (1998)	USA	106	Not known				69% > 5 °C
Johnson et al. (1998)	UK	645	Thermometer	-2	7	13	70% > 5 °C
Laguerre et al. (2002)	France	119	Data logger (3 levels: T, M, B)	0.9	6.6	11.4	80% > 5 °C
Ghebrehewet and Stevenson (2003)	UK	901	Not known				69.3% 0 – 4 °C 27.9% 5 – 9 °C 2.8% > 10 °C 84.2% ^d 0 – 4 °C 14.8% ^d 5 – 9 °C 1.0% ^d > 10 °C
ARS (2004) ^c	New Zealand	53	Not known				33% > 5 °C 26% < 4 °C
Bakalis et al. (2003)	Greece	110	Data logger (3 levels: T, M, B)				28% 4 – 6 °C 23% 6 – 8 °C 15% 8 – 10 °C 8% 10 – 12 °C
Kennedy et al. (2005)	Ireland	100	Data logger (1 level M)	-7.9	5.4	20.7	59% > 5 °C
Azevedo et al. (2005)	Portugal	86	Digital thermometer				70% > 6 °C
Taoukis et al. (2005)	Greece	250	Data logger	-2	6.3		50% > 6 °C 10% > 10 °C
Terpstra et al. (2005)	The Netherlands	31	Glass thermometer	3.8		11.5	68% > 7 °C
Breen et al. (2006)	UK	24	Glass thermometer in gel		5.0 (mode)		33% > 5 °C

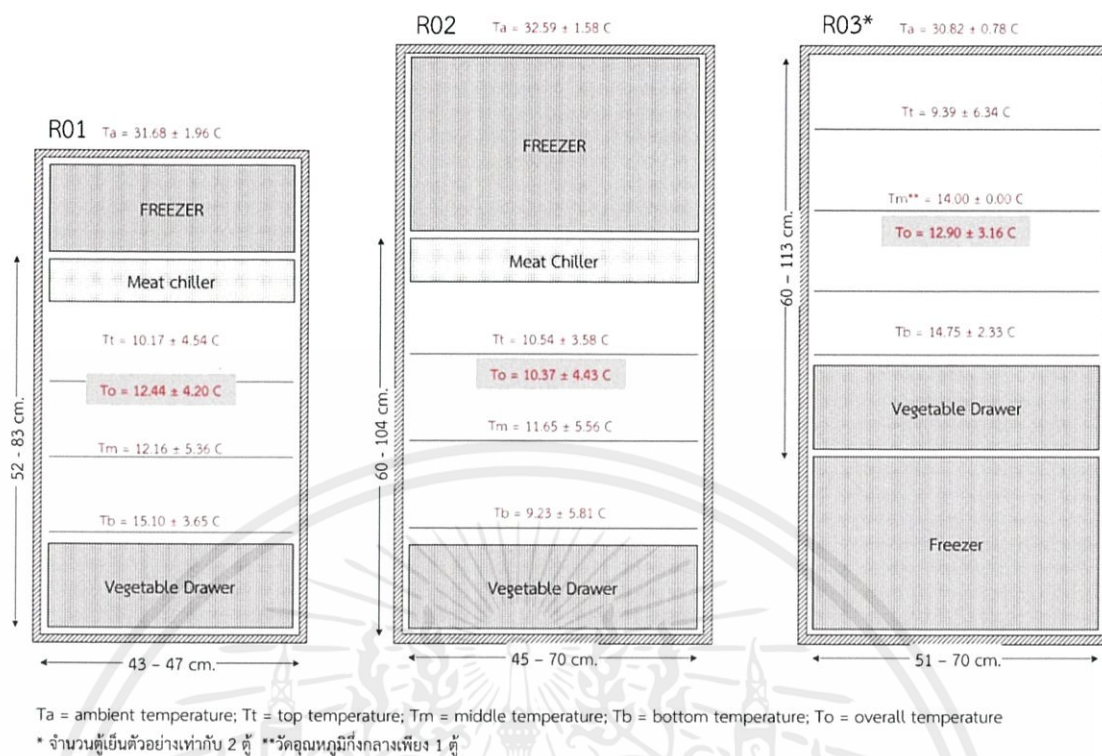
^a Cited by Laguerre et al. (2002)

^b Cited by Notermans et al. (1997)

^c Cited by Anon (2007)

^d Second visit.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ระดับอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งภายในตู้เย็น 3 ชนิด ได้แก่ R01: หนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบน (จำนวน 6 ตู้) R02: สองประตูช่องแช่แข็งด้านบน (จำนวน 10 ตู้) และ R03: สองประตูช่องแช่แข็งด้านล่าง (จำนวน 2 ตู้)

3) สภาวะการใช้งาน

จากการสำรวจตู้เย็นทั้งหมด 46 ตู้พบว่า ตู้เย็นทั้งหมดติดตั้งอยู่ในแผงค้าอาหาร (Indoor) และจากตารางที่ 4.1 พบว่า ตู้เย็นทำงานที่ภายใต้อุณหภูมิบรรยากาศเฉลี่ย เท่ากับ 32.19 (SD=1.76)

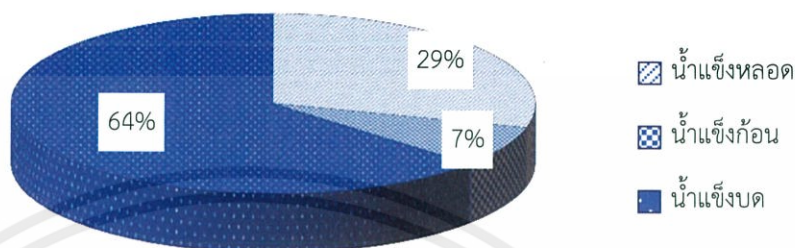
4.1.4 ถังน้ำแข็ง (Ice box)

จากรูปที่ 4.2 พบว่า แผงค้าอาหารในประเทศไทยเลือกใช้ถังน้ำแข็งเป็นอุปกรณ์รักษาความเย็นในแผงค้า ร้อยละ 42 คิดเป็นจำนวนแผงค้า 34 แผงค้าจากแผงค้าทั้งหมด 80 แผงค้า และร้อยละ 9 เลือกใช้อุปกรณ์รักษาความเย็นทั้งสองแบบคิดเป็นจำนวนแผงค้า 7 แผงค้า ดังนั้นแม้ว่าแผงค้าอาหารเลือกใช้ตู้เย็นเป็นอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นมากกว่าถังน้ำแข็ง แต่เมื่อสังเกตจำนวนแผงค้าอาหารที่เลือกใช้ถังน้ำแข็งพบว่า มีการเลือกใช้เกือบครึ่งหนึ่งจากแผงค้าทั้งหมด ทั้งนี้เมื่อสอบถามเหตุผลการเลือกใช้ถังน้ำแข็งเป็นอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็น เจ้าของแผงค้าอาหารทั้งหมดให้เหตุผลว่า ถังน้ำแข็งให้ความเย็นดีกว่าตู้เย็นและประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของคุณค่าไฟฟ้ามากกว่า อีกทั้งถังน้ำแข็งไม่จำเป็นต้องซื้อโซ่ เนื่องจากผู้จำหน่ายน้ำแข็งให้ใช้ถังน้ำแข็งฟรี ภายใต้ข้อตกลงการซื้อน้ำแข็งดังนั้นชนิดของถังน้ำแข็งที่เลือกใช้โดยแผงค้าอาหารทั้งหมดจึงเป็น ถังน้ำแข็งพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ชนิดน้ำแข็ง

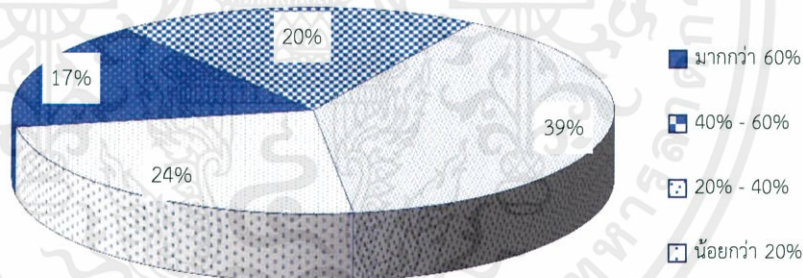
จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการสำรวจชนิดน้ำแข็งที่แผงค้าอาหารเลือกใช้ในถังน้ำแข็ง จำนวน 41 ถังพบว่า แผงค้าอาหารจำนวน 26 แผงค้าเลือกใช้น้ำแข็งบด (Crushed ice) จำนวน 21 แผงค้าเลือกใช้น้ำแข็งหลอด (Tube ice) และจำนวน 3 แผงค้าเลือกใช้น้ำแข็งก้อน (Block ice) หรือน้ำแข็งก็กตามภาษาชื่อทางการค้า



รูปที่ 4.7 ชนิดน้ำแข็งที่แผงค้าอาหารเลือกใช้ในถังน้ำแข็ง จำนวน 41 ถัง

2) ปริมาณน้ำแข็ง

จากรูปที่ 4.8 แสดงปริมาณน้ำแข็งภายในถังน้ำแข็ง โดยเปรียบเทียบตามสัดส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำแข็งต่อปริมาตรของถังน้ำแข็งพบว่า ถังน้ำแข็งจำนวน 26 ถัง (63%) ใช้น้ำแข็งในปริมาณที่น้อยกว่า 40% ของปริมาตรถังน้ำแข็ง โดยปริมาณน้ำแข็งที่ใช้น้อยที่สุดเท่ากับ 10% ของปริมาตรถังน้ำแข็งและปริมาณน้ำแข็งที่ใช้มากที่สุดเท่ากับ 89% ของปริมาตรถังน้ำแข็ง



รูปที่ 4.8 ปริมาณน้ำแข็งที่ใช้ภายในถังน้ำแข็งจำนวน 41 ถัง คิดตามสัดส่วนปริมาตรของน้ำแข็งต่อปริมาตรของถังน้ำแข็ง (ลูกบาศก์เมตรของน้ำแข็งต่อลูกบาศก์เมตรของถังน้ำแข็ง)

3) อุณหภูมิใช้งานของถังน้ำแข็ง

จากการสำรวจและสุ่มวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งตัวอย่างจากทั้งหมด 41 ถังจำนวน 23 ถัง โดยใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ (Data logger iButton DS1921G) ช่วงการวัดอุณหภูมิเท่ากับ -30 ถึง +70 องศาเซลเซียส ความแม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที บันทึกค่าทุกๆ 1 นาที (ผลการสำรวจวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งแต่ละถังแสดงใน ภาคผนวก ก) ได้ผลดังตารางที่ 4.3 แสดงระดับอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งพบว่า อุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งโดยรวม (Overall temperature) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.30 องศาเซลเซียส ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.6 องศาเซลเซียสค่าต่ำสุดเท่ากับ 6.08 องศาเซลเซียสและค่าสูงสุดเท่ากับ 14.44 องศาเซลเซียส และจากรูปที่ 4.9 แสดงจำนวนและระดับอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งพบว่า ระดับอุณหภูมิส่วนใหญ่อยู่

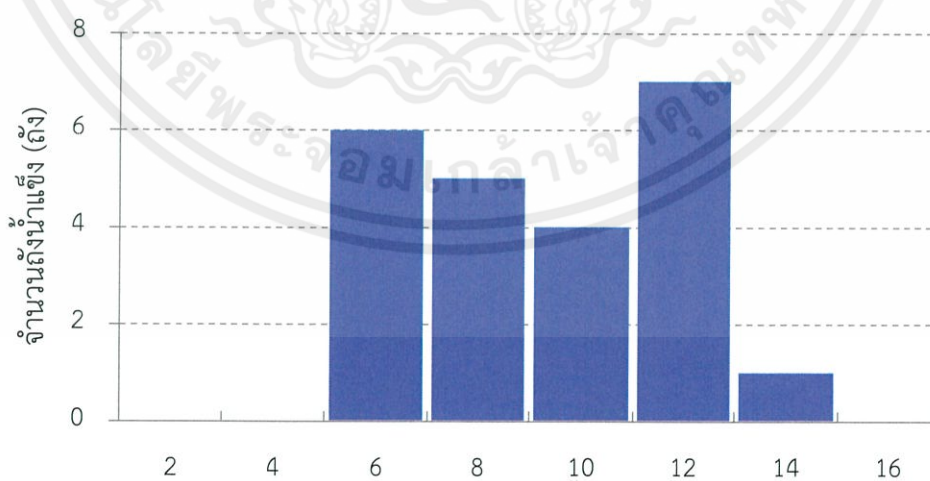
ในช่วง 11 – 13 องศาเซลเซียสและถึงน้ำแข็งทั้งหมด (100 %) ทำงานที่อุณหภูมิมากกว่า 5 องศาเซลเซียสแต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอุณหภูมิบริเวณติดกับน้ำแข็งกล่าวคือ บริเวณกึ่งกลางด้านซ้ายและด้านขวาพบว่า อุณหภูมิบริเวณนี้จะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 5 – 7 องศาเซลเซียสส่วนอุณหภูมิบริเวณติดกับฝาลังน้ำแข็งจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 21.70 องศาเซลเซียส (SD = 3.81 องศาเซลเซียส) พบว่า การเก็บผลิตภัณฑ์อาหารยิ่งห่างจากผิวน้ำแข็งมากเท่าไรยิ่งทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีโอกาสเสื่อมเสียเร็วมากขึ้น เนื่องจากมีอุณหภูมิการเก็บรักษาไม่เหมาะสม นอกจากนี้พบว่าสัดส่วนปริมาณน้ำแข็งไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิภายในถึงน้ำแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.10

4) สภาพะการใช้งาน

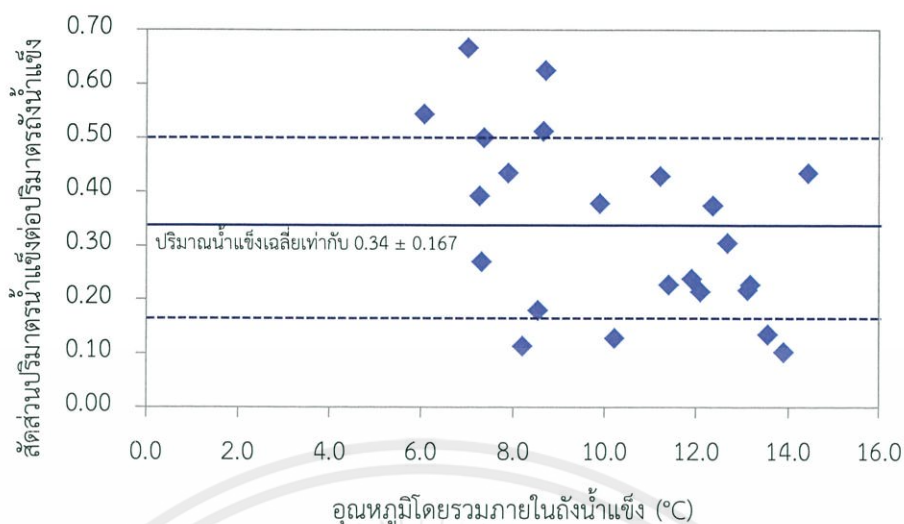
ถึงน้ำแข็งส่วนใหญ่ (43.9%) จากทั้งหมด 41 ถังได้รับการติดตั้งอยู่ภายในแผงค้ำอาหาร (Indoor) สำหรับในส่วนที่เหลือได้รับการติดตั้งภายในอาคารเช่นกัน แต่ได้รับแสงแดดซึ่งส่องมาจากภายนอกบางส่วน (Partial indoor) แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งการติดตั้งมีผลน้อยมากต่ออุณหภูมิบรรยากาศรอบตัวถึงน้ำแข็ง จากตารางที่ 4.2 พบว่า ถึงน้ำแข็งทำงานอยู่ภายใต้อุณหภูมิบรรยากาศเฉลี่ยเท่ากับ 31.83 (SD = 2.26)

ตารางที่ 4.3 ระดับอุณหภูมิภายในถึงน้ำแข็ง จำนวน 23 ถัง

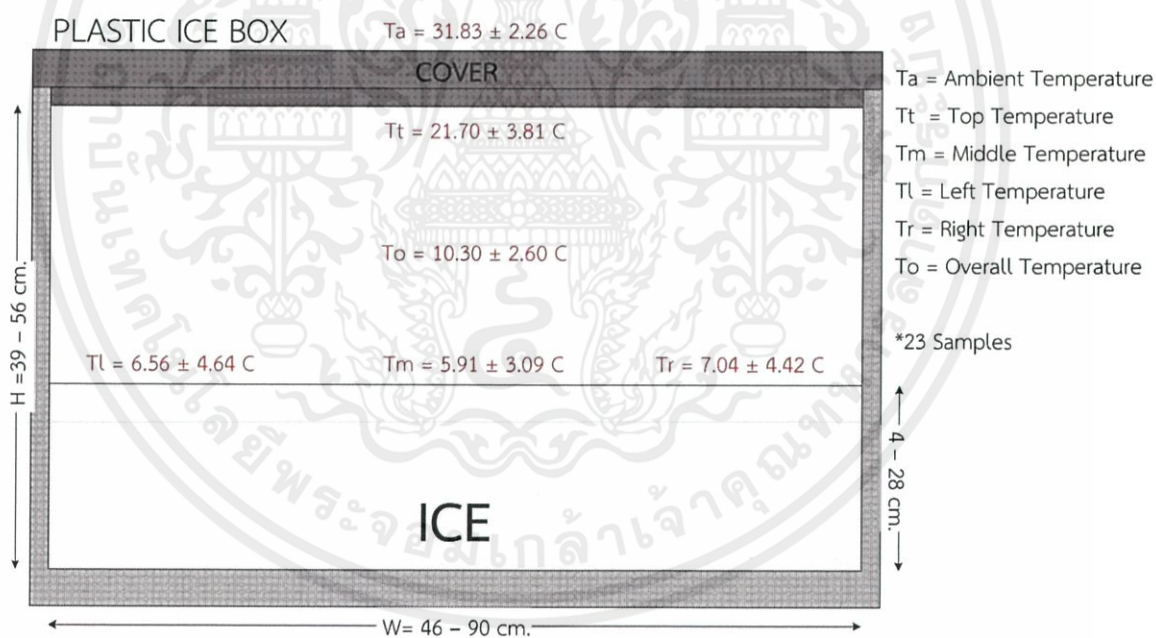
ตำแหน่ง	จำนวน (number)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		ค่าเฉลี่ย (mean)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)	ค่าต่ำสุด (min)	ค่าสูงสุด (max)
บรรยากาศ	23	31.83	2.26	28.00	36.77
ด้านบน	23	21.70	3.81	16.03	30.33
กึ่งกลาง	23	5.91	3.09	0.90	13.90
ด้านซ้าย	23	6.56	4.64	1.07	17.67
ด้านขวา	23	7.04	4.42	1.30	19.50
ค่าเฉลี่ยรวม	23	10.30	2.60	6.08	14.44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการอุณหภูมิต่ำ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำข้อมูลไปเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 4.9 ระดับอุณหภูมิภายในถึงน้ำแข็ง จำนวน 23 ถัง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิโดยรวมภายในถังน้ำแข็งกับสัดส่วนปริมาณน้ำแข็งต่อปริมาณถังน้ำแข็ง (cm^3/cm^3) จำนวน 23 ถัง



รูปที่ 4.11 ระดับอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งภายในถังน้ำแข็ง จำนวน 23 ถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 สรุปผลการสำรวจ

จากการสำรวจอุปกรณ์รักษาความเย็นของแผงค้ำอาหาร ในเขตลาดกระบังจำนวน 80 แผง ค้ำประกอบด้วย แผงค้ำอาหารพร้อมปรุง แผงค้ำอาหารปรุงสำเร็จและแผงค้ำเครื่องต้มและของชำ พบว่า แผงค้ำส่วนใหญ่ (49%) เลือกใช้ตู้เย็นเป็นอุปกรณ์รักษาความเย็นเพื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารภายในแผงค้ำ โดยตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านบนเป็นตู้เย็นชนิดที่มีการเลือกใช้มากที่สุด และสำหรับสัดส่วนการเลือกใช้ถังน้ำแข็งคิดเป็น 42% ของแผงค้ำอาหารทั้งหมด โดยชนิดของ ถังน้ำแข็งที่แผงค้ำอาหารเลือกใช้ทั้งหมดเป็นถังน้ำแข็งชนิดพลาสติก

เมื่อสำรวจระดับอุณหภูมิภายในอุปกรณ์รักษาความเย็นทั้งสองประเภทพบว่า อุปกรณ์รักษาความเย็นทั้งสองประเภททำงานที่อุณหภูมิมากกว่า 5 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิภายในตู้เย็นขั้นต่ำที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารปลอดภัยจากการเสื่อมเสียเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค (FSANZ, 2001) และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยเกี่ยวกับระดับอุณหภูมิใช้งานภายในตู้เย็นของต่างประเทศ (James et al., 2008) พบว่า อุณหภูมิการใช้งานอุปกรณ์รักษาความเย็นของแผงค้ำอาหารในประเทศไทยห่างจากมาตรฐานการใช้งานมาก กล่าวคือตู้เย็นร้อยละ 90 และถังน้ำแข็งร้อยละ 100 ทำงานที่ระดับอุณหภูมิเกินอุณหภูมิมาตรฐาน ในขณะที่ต่างประเทศตู้เย็นเพียงร้อยละ 80 ที่ทำงานสูงกว่าอุณหภูมิมาตรฐาน

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิโดยรวมระหว่างอุปกรณ์รักษาความเย็นทั้งสองชนิดพบว่า ตู้เย็นมีอุณหภูมิโดยรวมสูงกว่าถังน้ำแข็ง จากข้อมูลนี้อาจสรุปได้ว่า การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารใน ถังน้ำแข็งจะดีกว่าการเก็บรักษาอาหารภายในตู้เย็น แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งการเก็บรักษาอาหารมีความสำคัญกล่าวคือ สำหรับถังน้ำแข็งเมื่อระยะห่างระหว่างผลิตภัณฑ์อาหารกับผิวน้ำแข็งมากขึ้น อุณหภูมิของถังน้ำแข็งในตำแหน่งนั้นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเช่นกัน พบว่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิใน ถังน้ำแข็งค่อนข้างต่ำกว่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในตู้เย็น นอกจากนี้ตัวแปรที่สำคัญอีกตัว หนึ่งที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งคือ ปริมาณน้ำแข็ง กล่าวคือเมื่อถังน้ำแข็งบรรจุน้ำแข็งปริมาณ มากอุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวมภายในถังจะลดลง ดังนั้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถภาพการทำงานของ อุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้งสองประเภทนี้ การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและระดับอุณหภูมิ ภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นจึงมีความสำคัญ

จากผลการสำรวจนี้จึงนำไปสู่การเลือกอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นตัวอย่างสำหรับในการ ศึกษาวิจัยในโครงการฉบับนี้ กล่าวคือ อุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นประเภทตู้เย็นเลือกใช้ ตู้เย็นชนิด สองประตูช่องแช่แข็งด้านบน และอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นประเภทถังน้ำแข็งเลือกใช้ถังน้ำแข็ง พลาสติก โดยใช้น้ำแข็งบดเป็นแหล่งให้ความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การรวบรวมและดัดแปลงแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาอาหาร

คุณภาพและความปลอดภัยของอาหารได้รับผลกระทบโดยตรงจากอุณหภูมิการเก็บรักษาตลอดห่วงโซ่ความเย็น (Cold chain) ตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษ 1980 หลายๆ ประเทศทั่วโลกได้หันมาให้ความสำคัญและพิจารณาออกกฎหมายหรือกฎระเบียบข้อบังคับต่างๆ เกี่ยวกับอุณหภูมิสูงสุดของอาหารแช่เย็นตั้งแต่กระบวนการผลิต กระบวนการกระจายหรือขนส่งสินค้า กระบวนการเก็บรักษาตลอดจนกระบวนการจัดจำหน่าย อย่างไรก็ตามกฎหมายและข้อบังคับเหล่านั้นไม่ได้รวมถึงอาหารที่ผู้บริโภคได้ซื้อไปแล้วทั้งๆ ที่การเก็บรักษาอาหารด้วยอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นตามครัวเรือน (Domestic cold storage) ถือว่าเป็นส่วนหนึ่งในห่วงโซ่ความเย็นเช่นกัน ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิของอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นรวมถึงการจัดการทางสุขลักษณะของผู้บริโภคจึงเป็นสิ่งที่น่าเป็นห่วงเนื่องจากอุณหภูมิและการจัดการทางสุขลักษณะที่ไม่เพียงพอจะเป็นสาเหตุสำคัญต่อการเกิดโรคอาหารเป็นพิษ (Food poisoning incidents) (Laguette et al., 2002; James et al., 2008)

สาเหตุที่อาหารเสื่อมเสียเนื่องจากผลของอุณหภูมิคือ อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ โดยเฉพาะเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค (Pathogens) และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์จะเป็นสิ่งบ่งชี้ว่าอาหารเริ่มเสื่อมเสียแล้ว โดยสังเกตจากการสูญเสียคุณภาพทางประสาทสัมผัส เช่น สี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส ดังนั้นจึงมีงานวิจัยหลายฉบับ (Dalgaard et al., 1997; Garcia-Gimeno et al., 1997; Jacxsens et al., 2002; Hough et al., 2006; Dominguez and Schaffner, 2007; Tang et al., 2013) ได้ศึกษาพฤติกรรมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ แล้วอธิบายผลออกมาในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอายุการเก็บรักษาของอาหารชนิดต่างๆ โดยประเมินอายุจากการตรวจนับปริมาณเชื้อที่มากที่สุดที่สามารถยอมรับได้ (Microorganism base) และ/หรือการประเมินจากคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยผู้บริโภค (Sensory base)

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอายุการเก็บรักษาอาหารซึ่งถูกเสนอไว้จากงานวิจัยเหล่านั้น บางแบบจำลองมีความซับซ้อนและยากแก่การนำไปประยุกต์ใช้ ดังนั้นโครงงานนี้จึงได้รวบรวมและดัดแปลงให้แบบจำลองเหล่านั้นมีความง่ายขึ้นต่อการนำไปใช้งาน โดยจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษา (ชั่วโมง) กับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ทั้งนี้เพื่อนำมาพิจารณาแนวโน้มการเสื่อมเสียของอาหารจากสภาวะอุณหภูมิการเก็บรักษาอาหารด้วยอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นที่ศึกษา (ตู้เย็นและถ้ำน้ำแข็ง) โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 เนื้อวัว (Beef)

Hough et al. (2006) ได้เสนอแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาอาหารเนื่องจากผลของอุณหภูมิเก็บรักษาเนื้อวัวบด (Raw minced beef) โดยแบบจำลองพัฒนามาจากแบบจำลอง Arrhenius และอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดของแบบจำลองนี้ประเมินจากสีของผลิตภัณฑ์ที่ปรากฏออกมาโดยผู้บริโภค 60 คน (Sensory base) ดังสมการที่ 4.4

$$t_s(T) = AF \cdot t_s(T_{ref}) \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดย $t_s(T)$ คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิใดๆ อ้างอิงจากคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ชั่วโมง) และ $t_s(T_{ref})$ คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิอ้างอิง (แสดงดังตารางที่ 4.4) และ AF คือตัวเร่งปฏิกิริยา (Acceleration factor) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$AF = \frac{k(T_{ref})}{k(T)} = \exp\left(E_R\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (4.2)$$

โดย $k(T)$ และ $k(T_{ref})$ คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาของที่อุณหภูมิใดๆ และอุณหภูมิอ้างอิงตามลำดับ $E_R = \frac{E_a}{R}$ คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานกระตุ้น (Activation energy: cal/mol) กับค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 1.98 cal/ (mol K) และ T คืออุณหภูมิองศาสมบูรณ์ (K) โดยขอบเขตของสมการ 4.1 อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 2–19 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ต่างๆในแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดสด^a

อายุเก็บรักษาที่อุณหภูมิอ้างอิง			
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อายุการเก็บรักษา (ชั่วโมง)	ขีดจำกัดความชื้นบน (ชั่วโมง)	ขีดจำกัดความชื้นล่าง (ชั่วโมง)
2	88	73	105
9	44	39	49
19	17	14	21
อัตราส่วนพลังงานกระตุ้นต่อค่าคงที่ของแก๊ส (E_R , K)			7720 ± 1351

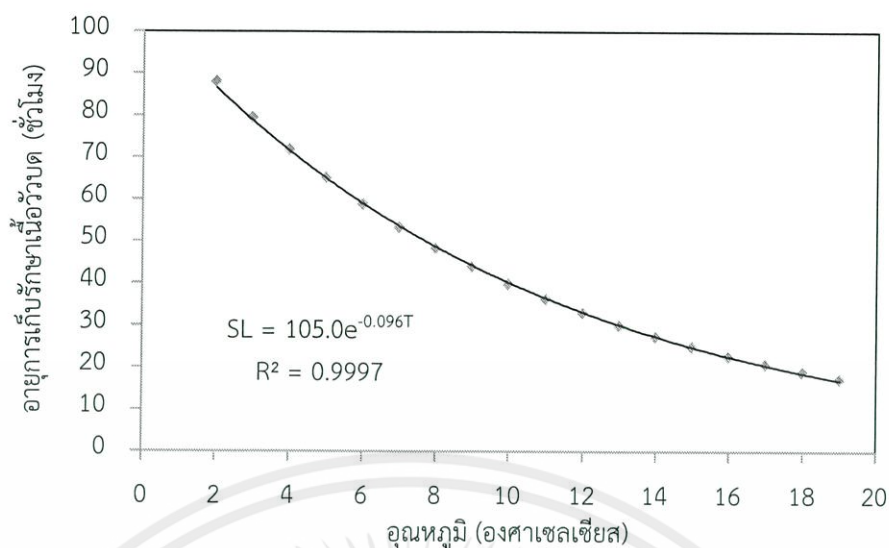
^a ดัดแปลงมาจากตารางที่ 1 ในงานวิจัยของ Hough et al. (2006)

จากสมการที่ 4.1 พบว่าอายุการเก็บรักษาของเนื้อวัวบดสดมีความสัมพันธ์แบบฟังก์ชันชี้กำลัง (Exponential function) กับอุณหภูมิ โดย $R^2 = 0.9997$ ดังรูปที่ 4.12 แสดงแผนภาพการกระจายความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดกับอุณหภูมิ โดยใช้อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 2 องศาเซลเซียสซึ่งมีอายุการเก็บรักษาเท่ากับ 88 ชั่วโมง จากแผนภาพนี้จึงสร้างสมการความสัมพันธ์ขึ้นมาใหม่เพื่อให้แบบจำลองง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ดังสมการที่ 4.3

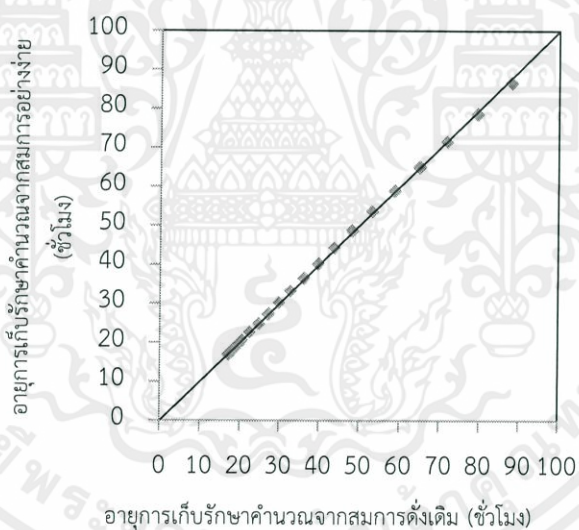
$$SL_s = 105.0 \exp(-0.096T) \quad (4.3)$$

เมื่อ SL_s คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิใดๆ (ชั่วโมง) อ้างอิงจากคุณภาพทางประสาทสัมผัส (สำหรับแบบจำลองนี้คุณภาพทางประสาทสัมผัสที่พิจารณาคือ สีของเนื้อวัวเท่านั้น) และ T คืออุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) โดยมีช่วงอุณหภูมิใช้งานเท่ากับ 2 ถึง 19 องศาเซลเซียส โดยผลการคำนวณด้วยสมการที่ 3.3 พบว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจพหุคูณ (R^2) เท่ากับ 0.9997 และความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า (Standard error of estimation) เท่ากับ 0.0086 องศาเซลเซียส และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองอย่างง่ายพบว่าสอดคล้องกัน (Good fitting) ดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาของเนื้อวัวบดสดที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 2 ถึง 19 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดสดกับอุณหภูมิคำนวณด้วยแบบจำลองเดิม (สมการที่ 4.1) ที่อุณหภูมิอ้างอิง 2 องศาเซลเซียส (อายุการเก็บรักษา 88 ชั่วโมง)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดสดคำนวณจากแบบจำลองเดิม (Original model) และแบบจำลองอย่างง่าย (Simplified model) ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 2 ถึง 19 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดสดที่อุณหภูมิในช่วง 2 ถึง 19 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	อายุการเก็บรักษา (ชั่วโมง (วัน))		
	Sensory test ^a	สมการเดิม ^b	สมการอย่างง่าย
2	88	88.0	86.6 (3.6)
3		79.5	78.7 (3.3)
4		71.9	71.5 (3.0)
5		65.0	65.0 (2.7)
6		58.9	59.0 (2.5)
7		53.3	53.6 (2.2)
8		48.4	48.7 (2.0)
9	44	43.9	44.2 (1.8)
10		39.8	40.2 (1.7)
11		36.2	36.5 (1.5)
12		32.9	33.2 (1.4)
13		29.9	30.1 (1.3)
14		27.2	27.4 (1.1)
15		24.8	24.9 (1.0)
16		22.6	22.6 (0.9)
17		20.6	20.5 (0.9)
18		18.8	18.6 (0.8)
19	17	17.2	16.9 (0.7)

^a ผลการประเมินด้วยคุณภาพทางประสาทสัมผัส ^b อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 2°C (อายุการเก็บรักษา 88 ชั่วโมง)

4.2.2 เนื้อหมู (Pork)

Tang et al. (2013) ได้ศึกษาวิธีการทำนายอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูสด ประกอบด้วย การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส การตรวจสอบทางอิเล็กทรอนิกส์ของสารระเหยซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเสื่อมเสีย และการใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโตทั้งหมด (Total Aerobic Viable Microorganisms) ภายใต้ อุณหภูมิคงที่ระดับต่างๆ โดยแบบจำลองอ้างอิงปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (Total Aerobic Viable Count: TVC) เริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 4.8 log CFU/g และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากที่สุดที่ทำให้เนื้อหมูเสื่อมเสีย (End of shelf life) เท่ากับ 7.0 log CFU/g

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ Tang et al. (2013) เลือกใช้เพื่ออธิบายการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์คือ linear growth model ของ Zwietering et al. (1994) ดังสมการที่ 4.4

$$y = A \exp \left\{ -\exp \left[\frac{\mu_{\max} e}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} ; R^2 = 0.95 \quad (4.4)$$

เมื่อ y คือปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาใดๆ (log CFU/g) A คือปริมาณเชื้อจุลินทรีย์คงที่ที่มากที่สุด (log CFU/g) μ_{\max} คืออัตราการเจริญเติบโตเชื้อจุลินทรีย์จำเพาะ (1/h) e คือค่าคงที่เท่ากับ 2.718 λ คือช่วงเวลาหน่วง (Lag phase: h) และ t คือเวลา (h) สำหรับพารามิเตอร์ μ_{\max} λ และ A ได้ถูกจัดในรูปสมการความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T , องศาเซลเซียส) ดังนี้

$$\mu_{\max} = 0.0057T - 0.0026 \quad (4.5)$$

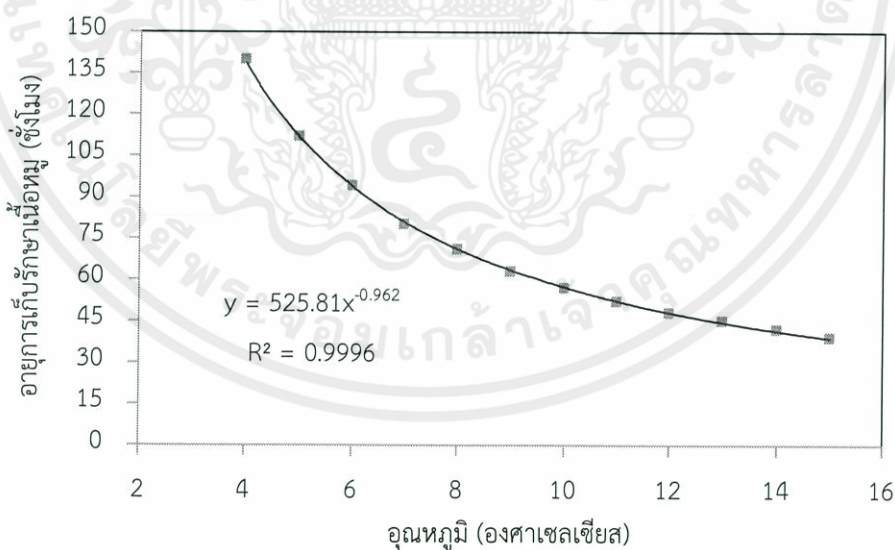
$$\lambda = 84T^{-0.7} \quad (4.6)$$

$$A = 0.03T + 8.5 \quad (4.7)$$

จากการคำนวณปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสมการที่ 4.4 ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถประมาณอายุการเก็บรักษาของเนื้อหมูได้ดังตารางที่ 4.6 และเมื่อเขียนแผนภาพการกระจายของอายุการเก็บรักษาของเนื้อหมูกับอุณหภูมิ (รูปที่ 4.14) ภายใต้วงอุณหภูมิ 4 – 15 องศาเซลเซียสพบว่าอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูมีความสัมพันธ์แบบฟังก์ชันกำลัง (Power function) กับอุณหภูมิ โดย $R^2 = 0.9996$ ดังนั้นจึงเขียนแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อทำนายอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูใหม่ได้ดังสมการที่ 4.8

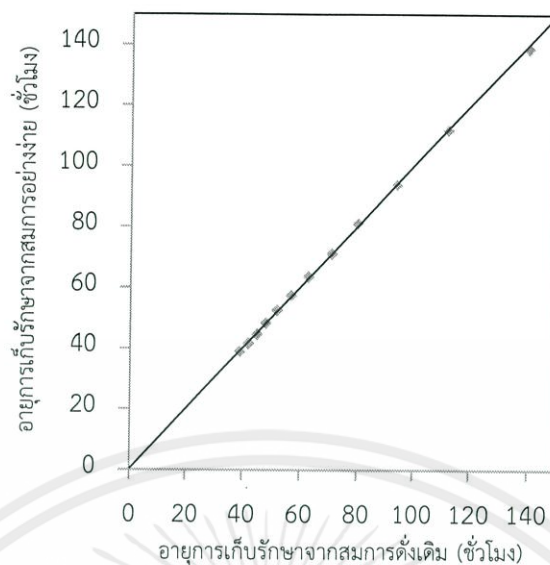
$$SL_m = 525.81T^{-0.962} \quad (4.8)$$

เมื่อ SL_m คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิใดๆ (ชั่วโมง) อ้างอิงจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากที่สุดที่ทำให้อาหารเริ่มเสื่อมเสีย และ T คืออุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) โดยมีช่วงอุณหภูมิใช้งานเท่ากับ 4 ถึง 15 องศาเซลเซียส โดยสมการที่ 4.8 มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจพหุคูณ (R^2) เท่ากับ 0.9996 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า (Standard Error of Estimation) เท่ากับ 0.008 องศาเซลเซียส และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองอย่างง่ายพบว่าสอดคล้องกัน (Good fitting) ดังรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.6 แสดงผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาของเนื้อหมูสดที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 4 ถึง 15 °C



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูสดกับอุณหภูมิจากการคำนวณด้วยแบบจำลองเดิม (สมการที่ 4.4) โดยอายุการเก็บรักษาพิจารณาจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์สูงสุด (TVC) ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย (7 log CFU/g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้องค์ความรู้ที่ปรากฏในเอกสารนี้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูกำหนดจากแบบจำลองเดิม กับแบบจำลองอย่างง่ายในช่วงอุณหภูมิ 4 – 15 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูที่อุณหภูมิต่างๆ โดยพิจารณาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์สูงสุด(TVC) ที่ทำให้เนื้อหมูเสื่อมเสียเท่ากับ 7 log CFU/g

อุณหภูมิ (°C)	อายุการเก็บรักษา			
	สมการเดิม ^a		สมการอย่างง่าย	
	ชั่วโมง	วัน	ชั่วโมง	วัน
4	140	5.8 (4.8) ^b	139	5.8
5	112	4.7	112	4.7
6	94	3.9	94	3.9
7	80	3.3 (4.1)	81	3.4
8	71	3.0	71	3.0
9	63	2.6	64	2.6
10	57	2.4 (3.1)	57	2.4
11	52	2.2	52	2.2
12	48	2.0	48	2.0
13	45	1.9	45	1.9
14	42	1.8	42	1.7
15	39	1.6 (1.0)	39	1.6

^a อ้างอิงที่ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 4.8 log CFU/g ^b อายุการเก็บรักษาประเมินโดยคุณภาพทางประสาทสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 เนื้อไก่ (Poultry)

Dominguez and Schaffner (2007) ได้เสนอแบบจำลองทำนายอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ *Pseudomonas* spp. ซึ่งเป็นเชื้อจุลินทรีย์สำคัญที่ส่งผลให้เนื้อไก่เสื่อมเสีย โดยแบบจำลองได้พัฒนามาจากแบบจำลองของ Ratkowsky หรือแบบจำลองรากที่สอง (Square root equation) โดยพิจารณาในช่วงอุณหภูมิ -2 ถึง 25 องศาเซลเซียส แสดงสมการที่ 4.9

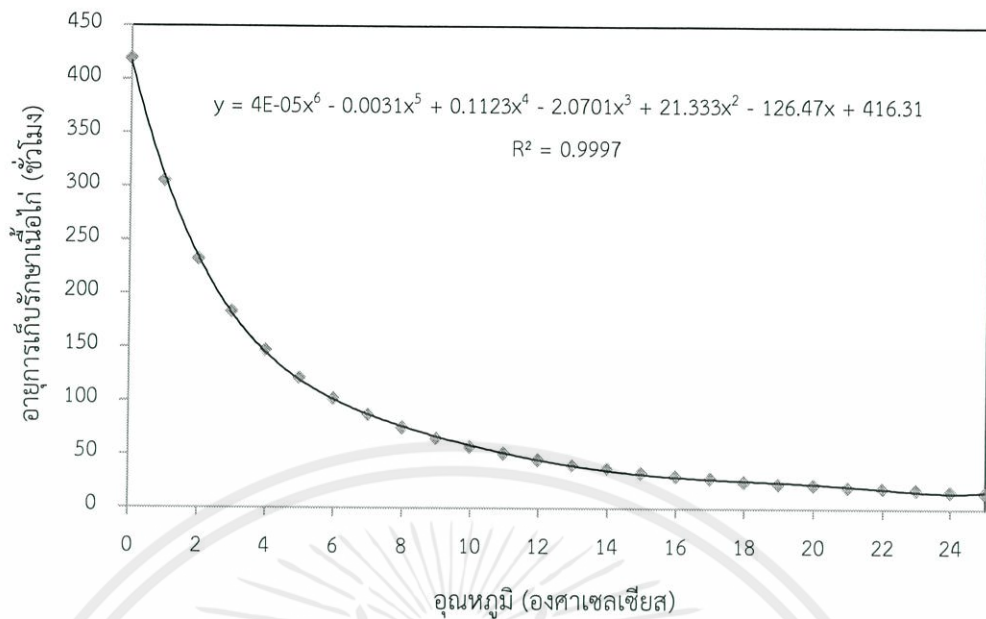
$$GR = (0.0188T + 0.1093)^2 \quad ; \quad R^2 = 0.9081 \quad (4.9)$$

โดย GR คืออัตราการเจริญเติบโตของเชื้อ *Pseudomonas* spp. (\log CFU/h) T คืออุณหภูมิใดๆ (องศาเซลเซียส) รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่สดกับอุณหภูมิคำนวณจากแบบจำลองทำนายอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อ *Pseudomonas* spp. อ้างอิงปริมาณเชื้อ *Pseudomonas* spp. เริ่มต้นเท่ากับ $2 \log$ CFU/cm² และปริมาณเชื้อมากที่สุดที่ทำให้เนื้อไก่เริ่มเสื่อมเสียเท่ากับ $7 \log$ CFU/cm² และเมื่อเขียนสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายจะได้สมการความสัมพันธ์แบบฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial function) กำลัง 6 โดยมี $R^2 = 0.9997$ ดังสมการที่ 4.10

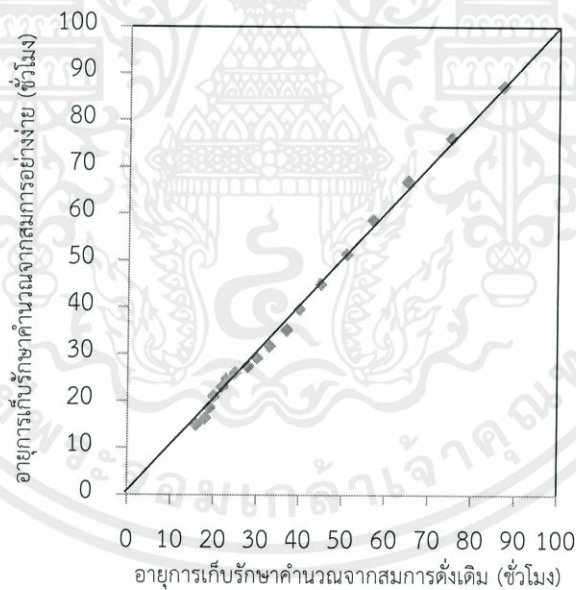
$$SL_m = (3.526250 \times 10^{-5})T^6 - (3.143059 \times 10^{-3})T^5 + (1.122762 \times 10^{-1})T^4 - 2.070055T^3 + 21.33323T^2 - 126.4675T + 416.3089 \quad (4.10)$$

เมื่อ SL_m คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิใดๆ (ชั่วโมง) อ้างอิงจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากที่สุดที่ทำให้อาหารเริ่มเสื่อมเสียและ T คืออุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) โดยมีช่วงอุณหภูมิใช้งานเท่ากับ 0 ถึง 25 องศาเซลเซียส พบว่าผลการคำนวณจากสมการที่ 4.10 เทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองดั้งเดิม มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจพหุคูณ (R^2) เท่ากับ 0.9997 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า (Standard error of estimation) เท่ากับ 1.829 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองอย่างง่ายพบว่า สอดคล้องกัน ยกเว้นสำหรับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสการประมาณค่าด้วยแบบจำลองอย่างง่ายมากกว่าการประมาณค่าจากแบบจำลองดั้งเดิม (overestimation) ดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.7 แสดงผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาของเนื้อไก่ในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่สดกับอุณหภูมิคำนวณจากแบบจำลองทำนายอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อ *Pseudomonas* spp.



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่สดคำนวณจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองอย่างง่ายในช่วงอุณหภูมิ 0 – 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 อายุการเก็บรักษาเนื้ออกไก่คำนวณจากแบบจำลองทำนายอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อ *Pseudomonas* spp.เปรียบเทียบกับแบบจำลองอย่างง่ายในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 25 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการเจริญเติบโต ($\Delta \log$ CFU/h)	อายุการเก็บรักษา			
		สมการดั้งเดิม		สมการอย่างง่าย	
		ชั่วโมง	วัน	ชั่วโมง	วัน
0	0.0119	419	17.5	416	17.3
1	0.0164	305	12.7	309	12.9
2	0.0216	232	9.7	234	9.7
3	0.0275	183	7.6	181	7.6
4	0.0340	147	6.1	145	6.0
5	0.0413	121	5.0	119	5.0
6	0.0493	102	4.3	101	4.2
7	0.0580	87	3.6	87	3.6
8	0.0674	75	3.1	76	3.2
9	0.0776	65	2.7	67	2.8
10	0.0884	57	2.4	59	2.4
11	0.0999	51	2.1	51	2.1
12	0.1122	45	1.9	45	1.9
13	0.1251	40	1.7	40	1.6
14	0.1388	37	1.5	35	1.5
15	0.1531	33	1.4	32	1.3
16	0.1682	30	1.3	29	1.2
17	0.1840	28	1.2	27	1.1
18	0.2004	25	1.0	26	1.1
19	0.2176	23	1.0	25	1.0
20	0.2355	22	0.9	23	1.0
21	0.2541	20	0.8	21	0.9
22	0.2734	19	0.8	19	0.8
23	0.2934	18	0.8	16	0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 0.3142 ชั่วโมงเพื่อการศึกษาเท่านั้น 0.7 อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ 0.6 ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง 25 อีกทั้งห้ามมิให้ 0.3356 ลงเนื้อหา และ 15 อ่างอิงถึง 0.6 ของเอกสาร 16* ครั้งที่มีค่า 0.7* ไปใช้

4.2.4 เนื้อปลา (Fresh fish)

Dalgaard et al. (1997) เสนอแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาของเนื้อปลาคอด โดยประเมินอายุการเสื่อมเสียจากปริมาณเชื้อ *Photobacterium phosphoreum* มากที่สุดที่ทำให้เนื้อปลาคอดเสื่อมเสีย จากงานวิจัยพบว่าปริมาณเท่ากับ $7 \log \text{ CHU/g}$ และปริมาณเริ่มต้นของเชื้อ *P.phosphoreum* เท่ากับ $3.5 \log \text{ CFU/g}$ แสดงดังสมการที่ 4.11

$$t_s = \frac{4 \ln 2 + \ln \left(\frac{N_{\max}}{N_0} - 1 \right)}{\mu_{\max}} \quad (4.11)$$

โดย t_s คืออายุการเก็บรักษาของเนื้อปลาคอด (ชั่วโมง) N_{\max} และ N_0 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากที่สุดที่ทำให้เนื้อปลาคอดเริ่มเสื่อมเสียและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นตามลำดับ μ_{\max} คืออัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์จำเพาะ (1/ชั่วโมง) ในงานวิจัยนี้อ้างอิงการเจริญเติบโตของเชื้อ *Photobacterium phosphoreum* ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.12, 4.13 และ 4.14

interpolation model:

$$\mu_{\max} = 0.082 + 0.032T - 3.6 \times 10^{-4}C - 1.1 \times 10^{-4}TC \quad (4.12)$$

square root model:

$$\sqrt{\mu_{\max}} = 0.032(T + 8.8) \left[\frac{368 - C}{368} \right] \quad (4.13)$$

Polynomial model:

$$\sqrt{\mu_{\max}} = 0.29 + 0.032T - 1.6 \times 10^{-3}C + 9 \times 10^{-5}TC - 9 \times 10^{-6}C^2 \quad (4.14)$$

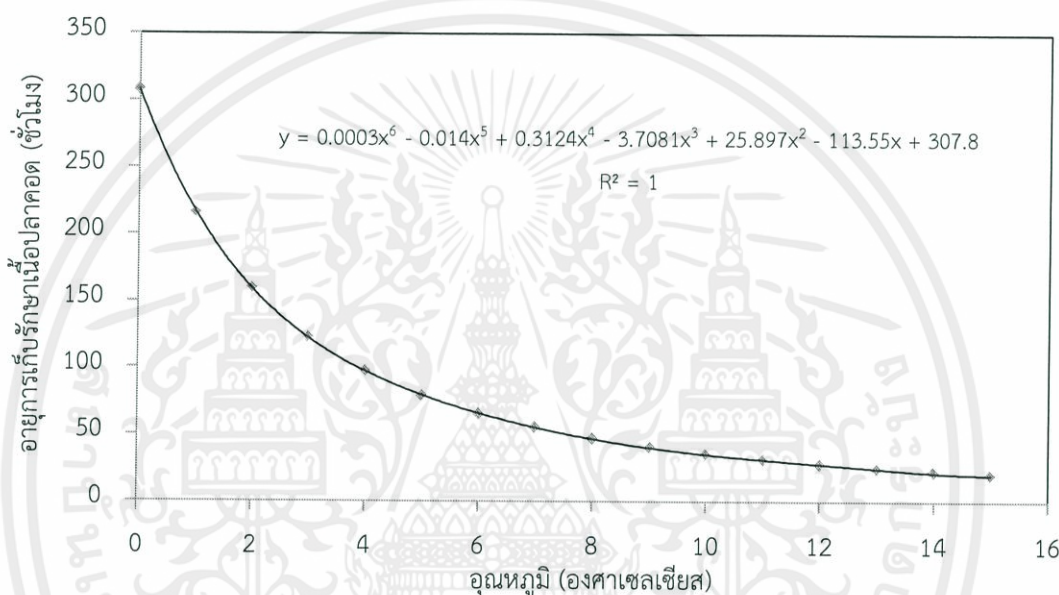
โดย T คืออุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) C คือร้อยละของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ในงานวิจัยฉบับนี้อ้างอิงที่ $50\% \text{ CO}_2$ และช่วงอุณหภูมิศึกษาเท่ากับ 0 ถึง 15 องศาเซลเซียส สำหรับความแปรปรวนของอายุการเก็บรักษาห้วงค่าจากการสังเกตและจากค่าคำนวณด้วยสมการที่ 4.11 โดยคิดอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์จำเพาะจากสมการ 4.12, 4.13 และ 4.14 เท่ากับ -26%, -21% และ -12% ดังนั้นสมการพหุนาม (Polynomial model) สำหรับคำนวณอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์จำเพาะจึงมีความเหมาะสมมากที่สุดในการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสมการที่ 4.11

จากแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาปลาคอด (สมการที่ 4.11) โดยคำนวณอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ *P.phosphoreum* จากสมการที่ 4.14 พบว่าอายุการเก็บรักษาเนื้อปลาคอดมีความสัมพันธ์แบบฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial function) กำลัง 6 กับอุณหภูมิได้ดังสมการที่ 4.15 โดยมี $R^2 = 1$ แสดงดังรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.8 แสดงอายุการเก็บรักษาเนื้อปลาคอดที่อุณหภูมิต่างๆ คำนวณจากแบบจำลองดั้งเดิมและแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่าย ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจหาคู่ (R^2) เท่ากับ 0.9999 และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า (Standard error of estimation) เท่ากับ 0.5273 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อปลาคอดคำนวณจากแบบจำลองดั้งเดิมและแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่าย ดังรูปที่ 4.19

พบว่าผลการประเมินอายุการเก็บรักษาเนื้อปลาสดจากการคำนวณด้วยแบบจำลองอย่างง่าย สอดคล้องกัน (Good fitting)

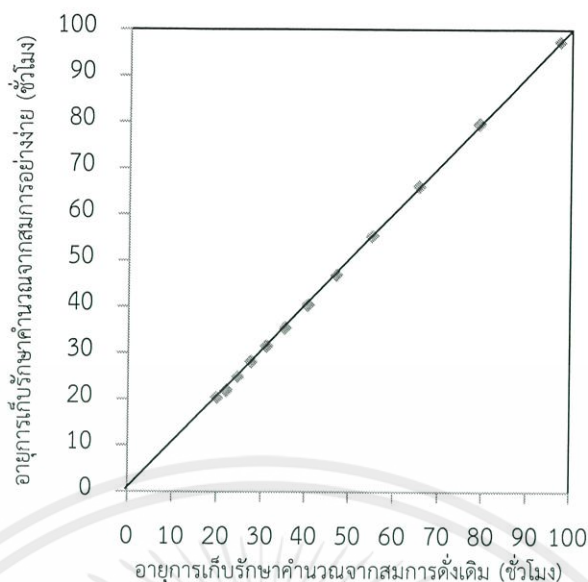
$$SL_m = (2.5416 \times 10^{-4})T^6 - (1.3968 \times 10^{-5})T^5 + (3.1241 \times 10^{-1})T^4 - 3.7081T^3 + 25.897T^2 - 113.55T + 307.80 \quad (4.15)$$

เมื่อ SL_m คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิใดๆ (ชั่วโมง) อ้างอิงจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากที่สุดที่ทำให้ อาหารเริ่มเสื่อมเสียและ T คืออุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) โดยมีช่วงอุณหภูมิใช้งานเท่ากับ 0 ถึง 15 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อปลาคอดกับอุณหภูมิจากการคำนวณด้วย สมการที่ 4.10 โดยอายุการเก็บรักษาพิจารณาจากปริมาณเชื้อ *Photobacterium phosphoreum* มากที่สุดที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย (7 log CFU/g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเนื้อปลาสดคำนวณจากแบบจำลองเดิมกับแบบจำลองอย่างง่าย ในช่วงอุณหภูมิ 0 – 15 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.8 อายุการเก็บรักษาเนื้อปลาสดคำนวณจากแบบจำลองเดิมที่อุณหภูมิเก็บรักษาในช่วง 0 – 15 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ (%CO ₂)	$\sqrt{\mu_{\max}}^a$	μ_{\max} (1/h)	สมการดั้งเดิม ^b		สมการอย่างง่าย ^c	
				ชั่วโมง	วัน	ชั่วโมง	วัน
0	50	0.188	0.035	308.1	12.8	307.8	12.8
1	50	0.224	0.050	215.9	9.0	216.7	9.0
2	50	0.261	0.068	159.6	6.7	159.2	6.6
3	50	0.297	0.088	122.8	5.1	122.2	5.1
4	50	0.334	0.111	97.4	4.1	97.3	4.1
5	50	0.370	0.137	79.1	3.3	79.5	3.3
6	50	0.407	0.165	65.5	2.7	66.0	2.7
7	50	0.443	0.196	55.2	2.3	55.3	2.3
8	50	0.480	0.230	47.1	2.0	46.8	2.0
9	50	0.516	0.266	40.7	1.7	40.3	1.7
10	50	0.553	0.305	35.5	1.5	35.3	1.5
11	50	0.589	0.347	31.2	1.3	31.5	1.3
12	50	0.626	0.391	27.7	1.2	28.1	1.2
13	50	0.662	0.438	24.7	1.0	24.8	1.0
14	50	0.699	0.488	22.2	0.9	21.7	0.9
15	50	0.735	0.540	20.0	0.8	20.2	0.8

^a คำนวณจากสมการที่ 4.13 ^b คำนวณจากสมการที่ 4.11 ^c คำนวณจากแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่าย(สมการ 4.15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผักสด (Fresh vegetables)

Jacxcens et al. (2002) ได้เสนอแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาผักสดซึ่งบรรจุในบรรจุภัณฑ์ EMA (Equilibrium Modified Atmosphere package) โดยอายุการเก็บรักษาอ้างอิงจากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสและการเสื่อมเสียจากเชื้อจุลินทรีย์ (Microbial proliferation) โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิต่ำเย็น (Psychrotrophic bacteria) เช่น *Listeria monocytogenes* และ *Aeromonas caviae* สำหรับผักสดที่ศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้ได้แก่ กะหล่ำปลีชนิดต่างๆ (Mixed lettuce) แดงกวาหั่น (Sliced cucumbers) และ พริกหวาน (Bell peppers) มีแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษา ดังต่อไปนี้

1) ประเมินจากคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Sensory base)

กะหล่ำปลีผสม

$$\ln t_s = -0.1351T + 39.365 \quad (R^2 = 0.9906) \quad (4.16)$$

แตงกวาหั่น

$$\ln t_s = -0.0933T + 27.763 \quad (R^2 = 0.9865) \quad (4.17)$$

พริกหวาน

$$\ln t_s = -0.2507T + 71.751 \quad (R^2 = 0.9339) \quad (4.18)$$

2) ประเมินจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ Psychrotrophic ทั้งหมด (Microorganism base)

โดยพิจารณาจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์สูงสุดที่สามารถยอมรับได้ แสดงดังตารางที่ 4.9

กะหล่ำปลีผสม

$$\ln t_m = -0.0397T + 13.32 \quad (R^2 = 0.9926) \quad (4.19)$$

แตงกวาหั่น

$$\ln t_m = -0.1536T + 44.898 \quad (R^2 = 0.9656) \quad (4.20)$$

เมื่อ t_s และ t_m คืออายุการเก็บรักษา (วัน) ประเมินจากคุณภาพทางประสาทสัมผัสและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ ตามลำดับ T คืออุณหภูมิองศาเซลเซียส (K) สำหรับพริกหวานไม่สามารถสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ได้ เนื่องจากมีความแปรปรวนของปริมาณเชื้อเริ่มต้นมาก และทั้ง 5 สมการดังกล่าวพิจารณาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 2 ถึง 10 องศาเซลเซียส

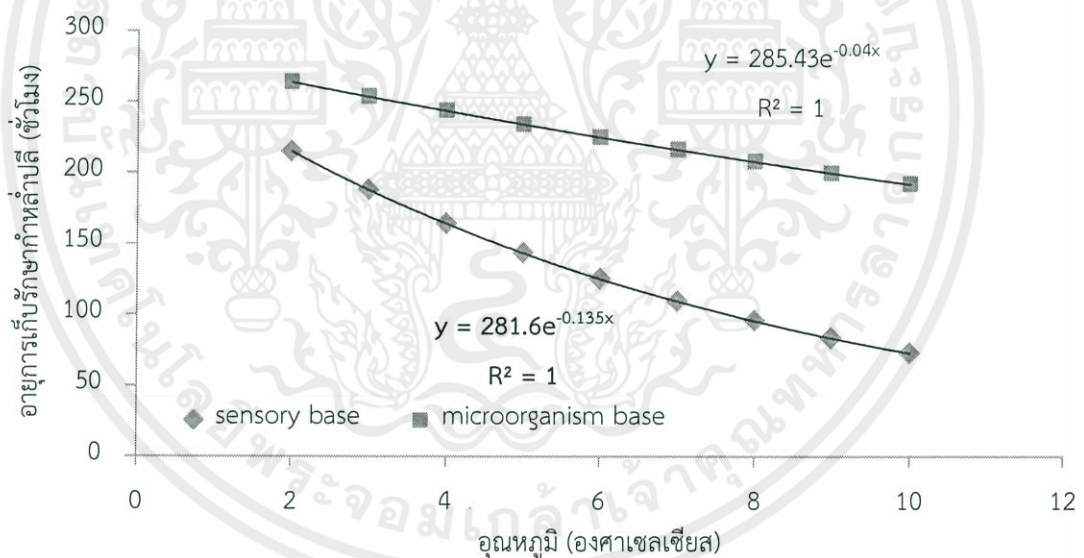
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลเชื้อจุลินทรีย์ Psychrotrophic เบื้องต้นเพื่อใช้พิจารณาสร้างสมการความสัมพันธ์

ชนิดตัวอย่างศึกษา	อัตราการเจริญเติบโต เชื้อจุลินทรีย์จำเพาะ ^a (1/h)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ เริ่มต้น (log CFU/g)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์สูงสุด ที่ยอมรับได้ (log CFU/g)
กะหล่ำปลีผสม	0.01 – 0.07	2.68 – 2.82	
แตงกวาหั่น	0.03 – 0.23	5.76 – 5.96	8
พริกหวาน	0.041 – 0.0006	5.98 – 6.62	

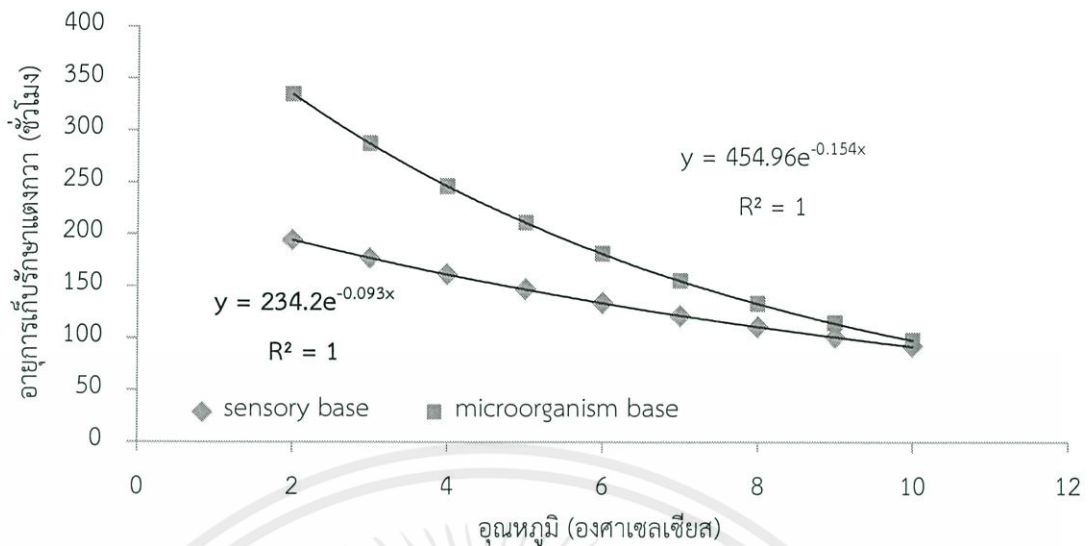
^aขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิเก็บรักษา

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาของผักชนิดต่างๆกับอุณหภูมิ ผลออกมาดังแสดงดังรูปที่ 4.20 สำหรับอายุการเก็บรักษากะหล่ำปลี รูปที่ 4.21 สำหรับอายุการเก็บรักษาแตงกวา และรูปที่ 4.22 สำหรับอายุการเก็บรักษาพริกหวานพบว่ามีความสัมพันธ์แบบฟังก์ชันชี้กำลังสำหรับผักทั้งสามชนิด โดยมี $R^2 = 1$ โดยสมการความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นใหม่ อายุการเก็บรักษา อยู่ในหน่วยชั่วโมงและอุณหภูมิอยู่ในหน่วยองศาเซลเซียส นอกจากนี้พบว่าอายุการเก็บรักษาซึ่งคำนวณจากแบบจำลองคุณภาพทางประสาทสัมผัสมีค่าน้อยกว่าการคำนวณจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ โดยผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาจากสมการทั้งสองแสดงในตารางที่ 4.10

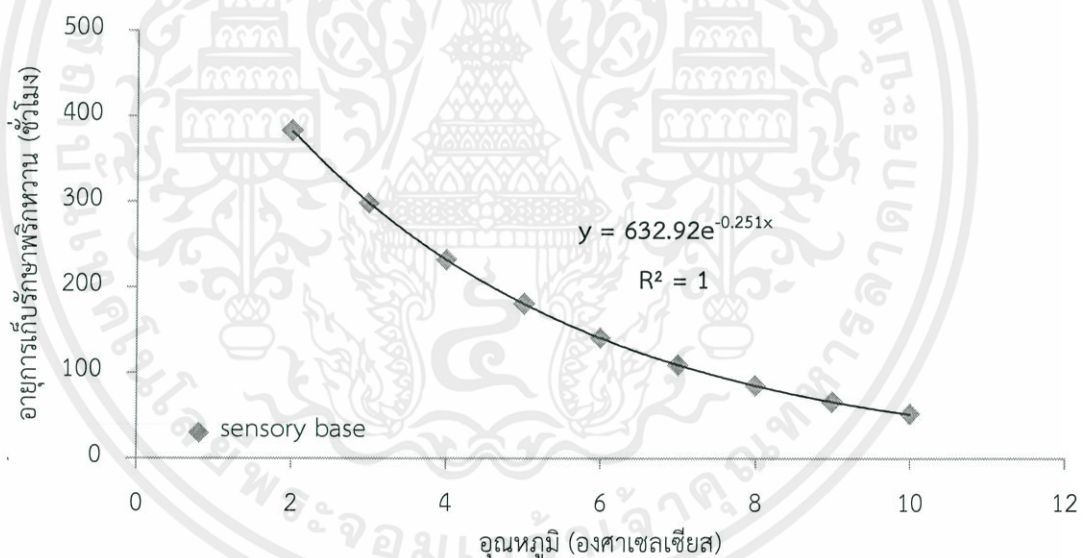


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษากะหล่ำปลีกับอุณหภูมิ คำนวณจากแบบจำลองคุณภาพทางประสาทสัมผัส (สมการที่ 4.16) และแบบจำลองปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (สมการที่ 4.19)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาแตงกวากับอุณหภูมิ คำนวณจากแบบจำลองคุณภาพทางประสาทสัมผัส (สมการที่ 4.17) และแบบจำลองปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (สมการที่ 4.20)



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาพริกหวานกับอุณหภูมิ คำนวณจากแบบจำลองคุณภาพทางประสาทสัมผัส (สมการที่ 4.18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 อายุการเก็บรักษาผักสดภายใต้บรรจุภัณฑ์ EMA

อุณหภูมิ (°C)	สมการอ้างอิงจากคุณภาพทางประสาทสัมผัส		สมการอ้างอิงจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์	
	ชั่วโมง	วัน	ชั่วโมง	วัน
กะหล่ำปลีผสม				
2	214.9	9.0	263.6	11.0
3	187.8	7.8	253.4	10.6
4	164.0	6.8	243.5	10.1
5	143.3	6.0	234.0	9.8
6	125.2	5.2	224.9	9.4
7	109.4	4.6	216.2	9.0
8	95.6	4.0	207.8	8.7
9	83.5	3.5	199.7	8.3
10	72.9	3.0	191.9	8.0
แตงกวา				
2	194.3	8.1	334.6	13.9
3	177.0	7.4	287.0	12.0
4	161.3	6.7	246.1	10.3
5	146.9	6.1	211.1	8.8
6	133.8	5.6	181.0	7.5
7	121.9	5.1	155.2	6.5
8	111.0	4.6	133.1	5.5
9	101.1	4.2	114.2	4.8
10	92.1	3.8	97.9	4.1
พริกหวาน				
2	383.4	16.0	-	-
3	298.3	12.4	-	-
4	232.2	9.7	-	-
5	180.7	7.5	-	-
6	140.6	5.9	-	-
7	109.4	4.6	-	-
8	85.2	3.5	-	-
9	66.3	2.8	-	-
10	51.6	2.1	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ผักสลัด (Salad vegetables)

นอกจากจะมีงานวิจัยเกี่ยวกับอายุการเก็บรักษาของผักสดซึ่งเก็บแยกชนิดในบรรจุภัณฑ์แบบ EMA ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่แล้ว Garcia-Gimeno et al. (1997) ก็ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับผักสดเช่นกัน แต่เป็นผลิตภัณฑ์ผักสลัดซึ่งเก็บรักษารวมในบรรจุภัณฑ์เดียวกัน ผักสลัดประกอบด้วย กะหล่ำเขียว (75%) แครอท (15%) และกะหล่ำม่วง (10%) ห่อด้วยพลาสติกใส สำหรับแบบจำลองทำนายอายุ การเก็บรักษาพัฒนามาจากแบบจำลอง Ratkowsky (Ratkowsky et al., 1982) แสดงดังสมการที่ 4.21

$$\sqrt{\mu} = b * (T - T_{\min}) \quad (4.21)$$

เมื่อ $\sqrt{\mu}$ คือรากที่สองของอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์จำเพาะ (1/h) b คือความชันของกราฟความสัมพันธ์ T และ T_{\min} คืออุณหภูมิองศาสมบูรณ์ใดๆและอุณหภูมิองศาสมบูรณ์น้อยที่สุดที่เชื้อจุลินทรีย์นั้นๆสามารถเจริญเติบโตได้ (K)

จากการศึกษาของ Garcia-Gimeno et al. (1997) พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อ Lactic Acid Bacteria (LAB) มีค่าดังสมการที่ 4.22 และอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อ Psychrotrophic bacteria มีค่าดังสมการที่ 4.23

$$\sqrt{\mu_{LAB}} = 0.0209(T - 266.11) \quad R^2 = 0.7600 \quad (4.22)$$

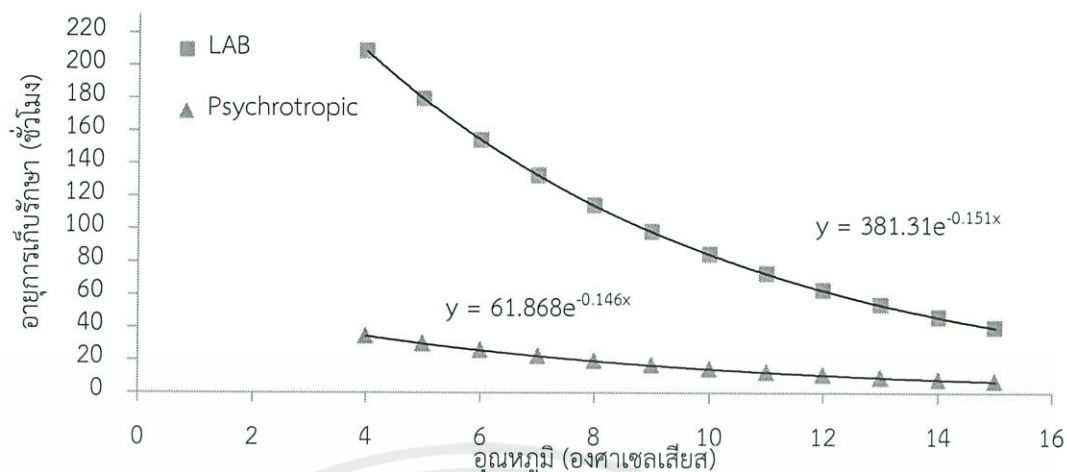
$$\sqrt{\mu_{psy}} = 0.0094(T - 250.85) \quad R^2 = 0.9980 \quad (4.23)$$

เมื่อตรวจวัดปริมาณเชื้อ LAB และเชื้อ Psychrotrophic bacteria เริ่มต้นในผักสลัดพบว่า มีปริมาณเท่ากับ 3 logCFU/g และ 5 logCFU/g ตามลำดับ และปริมาณเชื้อมากที่สุดที่ทำให้ผักสลัดเสื่อมเสียเท่ากับ 6 logCFU/g สำหรับ LAB และเท่ากับ 7 logCFU/g สำหรับ Psychrotrophic bacteria จากสมการที่ 4.22 และสมการที่ 4.23 ทำให้สามารถคำนวณหาอายุการเก็บรักษาของผักสลัดได้ โดยอ้างอิงจากปริมาณเชื้อทั้งสองชนิด จากรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างอายุการเก็บรักษา (ชั่วโมง) และอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบฟังก์ชันชี้กำลัง (Exponential function) $R^2 = 0.9986$ สำหรับ LAB และ $R^2 = 0.9027$ สำหรับเชื้อ Psychrotrophic bacteria ดังสมการ 4.24 และ 4.25

$$SL_{LAB} = 381.31 \exp(-0.151T) \quad (4.24)$$

$$SL_{psy} = 61.868 \exp(-0.146T) \quad (4.25)$$

เมื่อ SL_{LAB} และ SL_{psy} อายุการเก็บรักษาของผักสลัด (ชั่วโมง) อ้างอิงจากปริมาณเชื้อ LAB และเชื้อ Psychrotrophic bacteria ตามลำดับ และหมดอายุการเก็บรักษาเมื่อปริมาณเชื้อทั้งสองมีค่าเท่ากับ 6 logCFU/g โดยขอบเขตอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4 – 15 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาผักสลัดและอุณหภูมิ

เมื่อเปรียบเทียบอายุการเก็บรักษาจากผลการประเมินอายุด้วยคุณภาพทางประสาทสัมผัสกับการคำนวณด้วยแบบจำลอง จากตารางที่ 4.11 แสดงอายุการเก็บรักษาผักสลัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 4 – 15 องศาเซลเซียส ด้วยการประเมิน 3 วิธีพบว่า แบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาอ้างอิงจากปริมาณเชื้อ LAB มีความถูกต้องมากกว่าการทำนายด้วยแบบจำลองที่อ้างอิงจากปริมาณเชื้อ Psychrotrophic bacteria เนื่องจากผลการประเมินสอดคล้องกับการประเมินด้วยคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ตารางที่ 4.11 อายุการเก็บรักษาผักสลัดภายใต้อุณหภูมิต่างๆ จากการประเมิน 3 วิธี

อุณหภูมิ (°C)	อายุการเก็บรักษา (ชั่วโมง (วัน))		
	Sensorial	LAB	Psychrotrophicbac.
4	201 (8.4)	208.6 (8.7)	34.5 (1.4)
5	180 (7.5)	179.4 (7.5)	29.8 (1.2)
6	161 (6.7)	154.3 (6.4)	25.8 (1.1)
7	144 (6.0)	132.7 (5.5)	22.3 (0.9)
8	129 (5.4)	114.1 (4.8)	19.2 (0.8)
9	115 (4.8)	98.1 (4.1)	16.6 (0.7)
10	103 (4.3)	84.4 (3.5)	14.4 (0.6)
11	92 (3.8)	72.6 (3.0)	12.4 (0.5)
12	83 (3.5)	62.4 (2.6)	10.7 (0.4)
13	74 (3.1)	53.7 (2.2)	9.3 (0.4)
14	66 (2.8)	46.2 (1.9)	8.0 (0.3)
15	59 (2.5)	39.7 (1.7)	6.9 (0.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 สรุปผลการรวบรวมและดัดแปลงแบบจำลองทำนายอายุการเก็บรักษาอาหาร

ตารางที่ 4.12 แสดงแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่ายเพื่อประเมินอายุการเก็บรักษาของอาหารชนิดต่างๆ จากการดัดแปลงและพัฒนาจากแบบจำลองเดิมของงานวิจัยที่ผ่านมา โดยประกอบด้วยการประเมิน 2 วิธีได้แก่ ประเมินอายุการเก็บรักษาด้วยคุณภาพทางประสาทสัมผัส และประเมินด้วยปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากที่สุดที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย

จากรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาอาหารประเภทเนื้อสัตว์ประเภทต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่ายกับอุณหภูมิในช่วง 4 – 15 องศาเซลเซียส พบว่า เนื้อไก่มีอายุการเก็บรักษานานที่สุดในขณะที่เนื้อวัวมีอายุการเก็บรักษาน้อยกว่าเนื้อปลา ในช่วงอุณหภูมิ 4 – 9 องศาเซลเซียส แต่เมื่อผ่านอุณหภูมิช่วงนี้ไปเนื้อปลาก็จะเสียน้อยกว่าเนื้อวัว ทั้งนี้เป็นเพราะคุณสมบัติของเนื้อแต่ละชนิดไม่เหมือนกันอีกทั้งการประเมินอายุของเนื้อวัวประเมินจากคุณภาพทางประสาทสัมผัสในขณะที่เนื้อชนิดอื่นพิจารณาจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เมื่อนำความสัมพันธ์นี้เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาอาหารประเภทเนื้อสัตว์ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองดั้งเดิมในช่วงอุณหภูมิอุณหภูมิเดียวกันพบว่า ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกัน ดังรูปที่ 4.25

จากรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์และผักชนิดต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิเก็บรักษา 4 – 10 องศาเซลเซียส โดยอายุการเก็บรักษาคำนวณจากแบบจำลองอย่างง่าย พบว่า อายุการเก็บรักษาของผักชนิดต่างๆมากกว่าอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์ และเมื่อพิจารณาเฉพาะอายุการเก็บรักษาของผักพบว่า ผักสลัดมีอายุการเก็บรักษาน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ของผักชนิดอื่น ได้แก่ กะหล่ำปลี แดงควาและพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์แบบ EMA ซึ่งมีการปรับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ผักมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น ดังนั้นหากไม่มีการปรับคุณภาพบรรจุภัณฑ์ผักสลัดถือว่าเป็นตัวแทนที่เหมาะสมสำหรับทำนายอายุการเก็บรักษาของผักมากที่สุด เมื่อนำผลเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์และผักชนิดต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิเดียวกันโดยอายุการเก็บรักษาคำนวณจากแบบจำลองดั้งเดิมพบว่า ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกัน แสดงดังรูปที่ 4.27

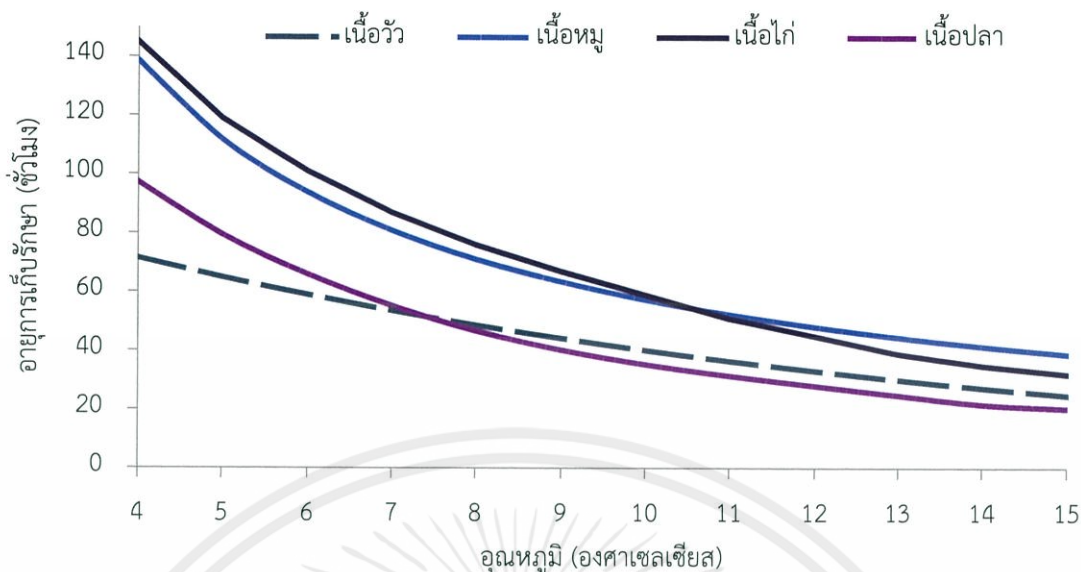
จากตารางที่ 4.13 สรุปอายุการเก็บรักษาอาหารชนิดต่างๆ เนื่องจากผลของอุณหภูมิ โดยอายุการเก็บรักษาอาหารประเมินจากคำนวณด้วยแบบจำลองดั้งเดิมและแบบจำลองอย่างง่าย พร้อมทั้งอายุการเก็บรักษาซึ่งประเมินจากคุณภาพทางประสาทสัมผัสจากงานวิจัยที่ได้แสดงข้อมูลไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

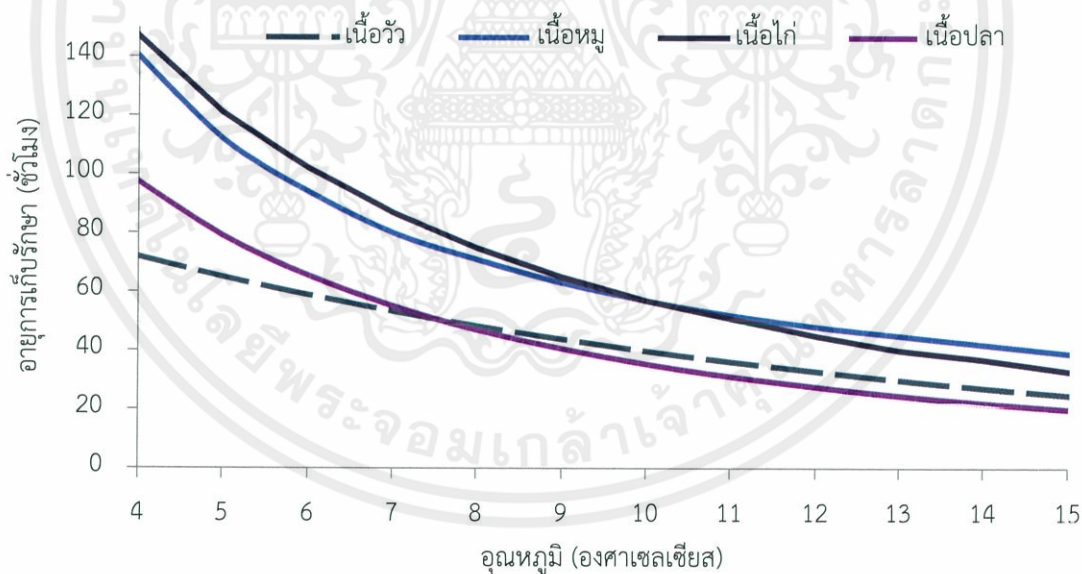
ตารางที่ 4.12 แบบจำลองความสัมพันธ์เพื่อทำนายอายุการเก็บรักษาอาหารอย่างง่าย

ชนิดอาหาร	แบบจำลองอย่างง่าย ^a SL = Shelf Life (hours) T = Temperature (°C)	สัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจพหุคูณ (R^2)	ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อ้างอิง
เนื้อสัตว์สด	$SL_s = 104.98 \exp(-0.096T)$ (4.3)	0.9996	2 – 19	Hough et al. (2006)
เนื้อหมูสด	$SL_m = 525.81T^{-0.962}$ (4.8)	0.9998	4 – 15	Tang et al. (2013)
เนื้ออกไก่สด	$SL_m = (3.526250 \times 10^{-5})T^6 - (3.143059 \times 10^{-3})T^5 + (1.122762 \times 10^{-1})T^4 - 2.070055T^3 + 21.33323T^2 - 126.4675T + 416.3089$ (4.10)	0.9997	0 – 25	Dominguez and Schaffner (2007)
เนื้อปลาสด	$SL_m = (2.5416 \times 10^{-4})T^6 - (1.3968 \times 10^{-5})T^5 + (3.1241 \times 10^{-1})T^4 - 3.7081T^3 + 25.897T^2 - 113.55T + 307.80$ (4.15)	0.9999	0 – 15	Dalgaard et al. (1997)
ผักสด				
กะหล่ำปลี	$SL_s = 281.6 \exp(-0.135T)$ (4.26)	0.9906		
แตงกวา	$SL_s = 234.2 \exp(-0.093T)$ (4.27)	0.9865	2 – 10	Jacxsens et al. (2002)
พริกหวาน	$SL_s = 632.92 \exp(-0.251T)$ (4.28)	0.9339		
ผักสลัด	$SL_m = 381.31 \exp(-0.151T)$ (4.24)	0.9986	4 – 15	Garcia-Gimeno et al. (1997)

^a subscript S หมายถึงประเมินจากคุณภาพทางประสาทสัมผัส m หมายถึงประเมินจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

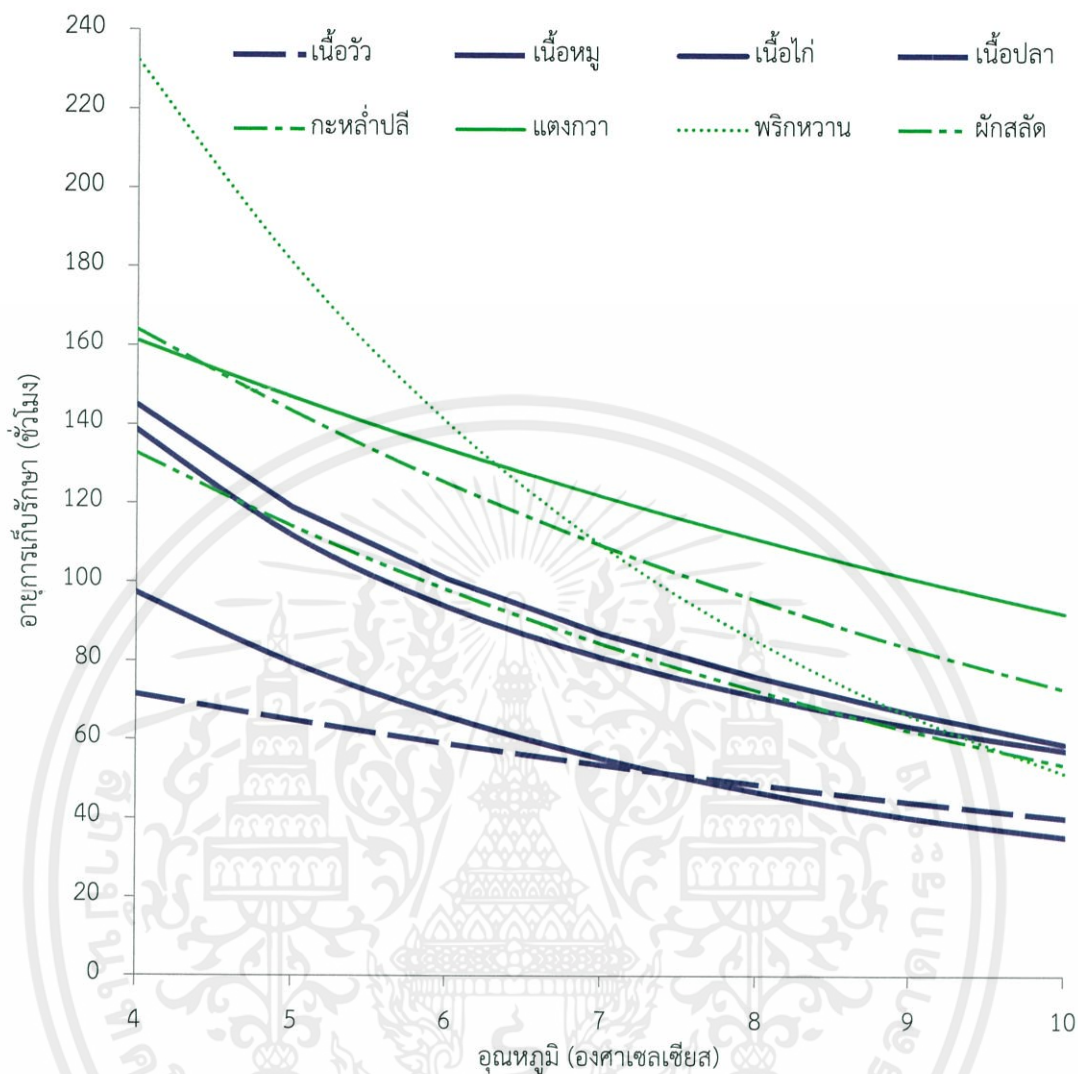


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์ชนิดต่างๆกับอุนหมูมิเก็บรักษา (ชั่วโมง) ในช่วง 4-15 องศาเซลเซียส โดยอายุการเก็บรักษาคำนวณจากแบบจำลองอย่างง่าย



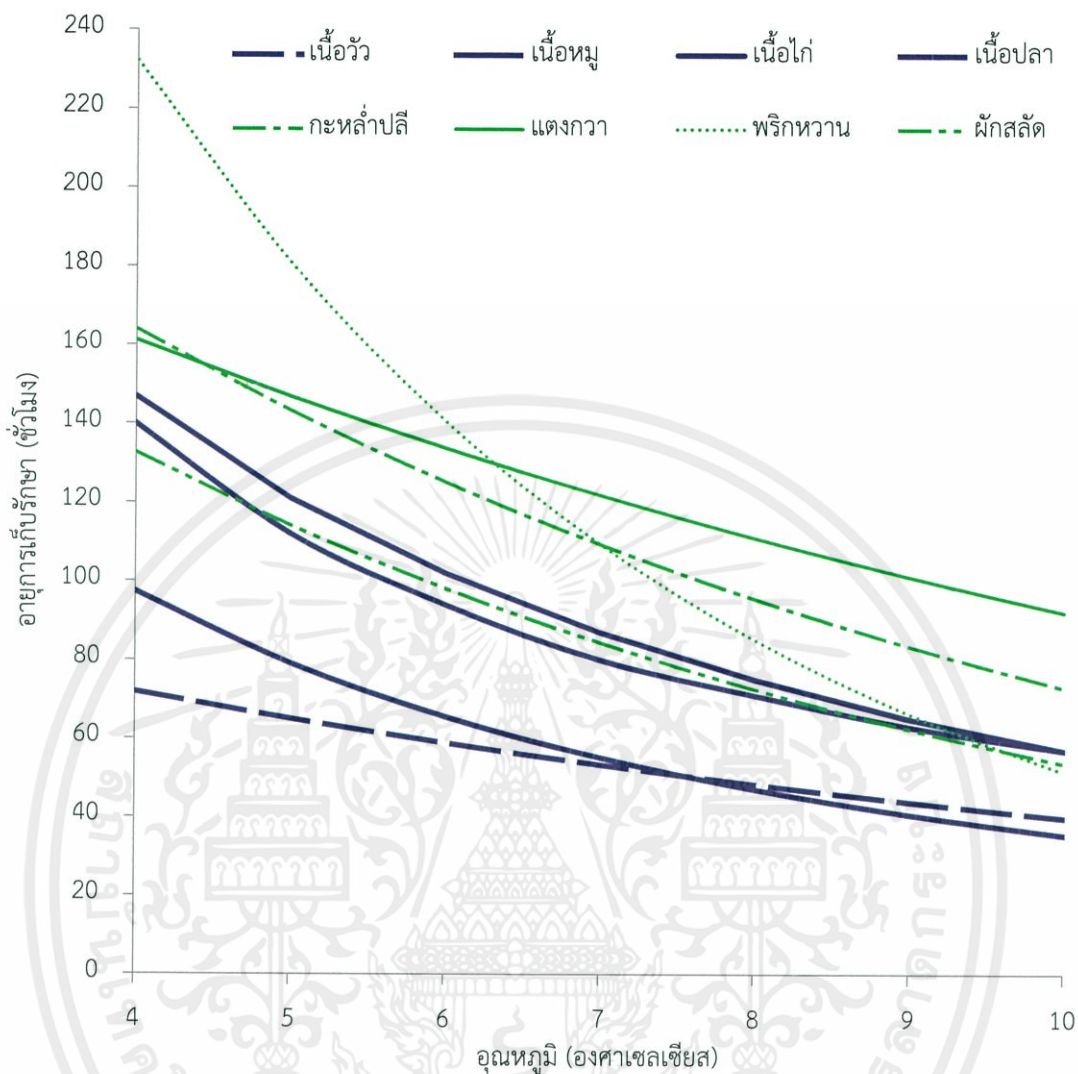
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์ชนิดต่างๆกับอุนหมูมิเก็บรักษา (ชั่วโมง) ในช่วง 4-15 องศาเซลเซียส โดยอายุการเก็บรักษาคำนวณจากแบบจำลองดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์และผักชนิดต่างๆกับอุณหภูมิเก็บรักษาในช่วง 4 - 10 องศาเซลเซียส โดยอายุการเก็บรักษาคำนวณจากแบบจำลองอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์และผักชนิดต่างๆกับอุณหภูมิเก็บรักษา ในช่วง 4 - 10 องศาเซลเซียส โดยอายุการเก็บรักษาคำนวณจากแบบจำลองดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 อายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์และผักชนิดต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 0 - 15 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	อายุการเก็บรักษา (ชั่วโมง)																								
	เนื้อวัว			เนื้อหมู			เนื้อไก่			เนื้อปลา			กะหล่ำปลี			แตงกวา			พริกหวาน			ผักสลัด			
	I ^a	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III				
0		88.0 ^b	86.6						419	416		308.1	307.8												
1		79.5	78.7						305	309		215.9	216.7												
2	88	71.9	71.5						232	234		159.6	159.2	214.9 ^b	263.6	194.3 ^b	334.6			383.4 ^b					
3		65.0	65.0						183	181		122.8	122.2	187.8	253.4	177.0	287.0			298.3					
4		58.9	59.0	115.2	140	139			147	145		97.4	97.3	164.0	243.5	161.3	246.1			232.2			201	208.6	
5		53.3	53.6		112	112			121	119		79.1	79.5	143.3	234.0	146.9	211.1			180.7			180	179.4	
6		48.4	48.7		94	94			102	101		65.5	66.0	125.2	224.9	133.8	181.0			140.6			161	154.3	
7		43.9	44.2	98.4	80	81			87	87		55.2	55.3	109.4	216.2	121.9	155.2			109.4			144	132.7	
8		39.8	40.2		71	71			75	76		47.1	46.8	95.6	207.8	111.0	133.1			85.2			129	114.1	
9	44	36.2	36.5		63	64			65	67		40.7	40.3	83.5	199.7	101.1	114.2			66.3			115	98.1	
10		32.9	33.2	74.4	57	57			57	59		35.5	35.4	72.9	191.9	92.1	97.9			51.6			103	84.4	
11		29.9	30.1		52	52			51	51		31.2	31.5										92	72.6	
12		27.2	27.4		48	48			45	45		27.7	28.1										83	62.4	
13		24.8	24.9		45	45			40	40		24.7	24.9										74	53.7	
14		88.0	86.6		42	42			37	35		22.2	21.8										66	46.2	
15		79.5	78.7	24	39	39			33	32		20.0	20.4										59	39.7	

^a I หมายถึงการประเมินจากคุณภาพทางประสาทสัมผัสจากการทดลอง II หมายถึงการคำนวณสมการดั้งเดิม III หมายถึงการคำนวณสมการอย่างง่าย ^b การประเมินจากคุณภาพทางประสาทสัมผัสจากการคำนวณ

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 ตู้เย็น

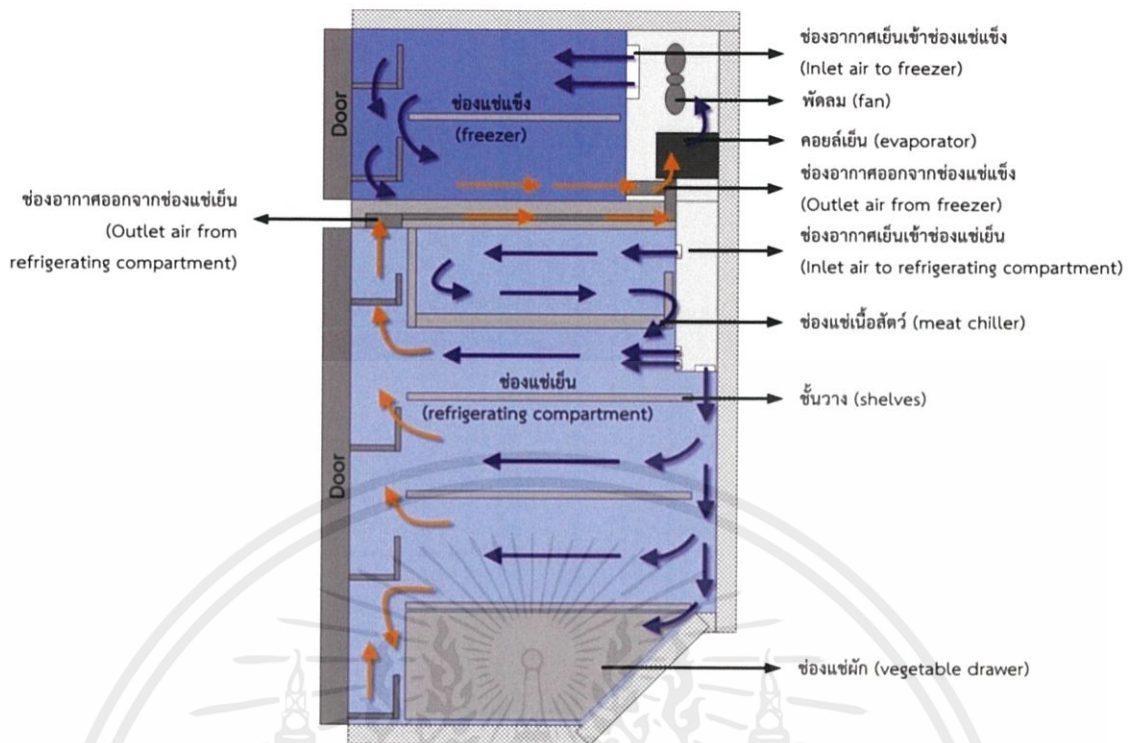
5.1.1 การไหลของอากาศภายในตู้เย็น

หน้าที่หลักของตู้เย็นคือการรักษาอุณหภูมิของอาหารให้มีอุณหภูมิต่ำเพื่อยับยั้งอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค (Pathogens) ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อผู้บริโภคอาหาร ดังนั้นพื้นที่ทำความเย็นของตู้เย็นต้องมีการรักษาระดับอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องโดยรอบ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณโดยรอบตู้เย็น (อุณหภูมิสูง) เข้าสู่ภายในช่องแช่ของตู้เย็น (อุณหภูมิต่ำ) ในขณะที่ตู้เย็นบรรจุไหลหรืออาหาร จะเกิดการถ่ายความร้อนออกจากไหลที่อยู่ภายในช่องแช่ของตู้เย็นด้วย เปรียบเสมือนไหลหรืออาหารเป็นแหล่งความร้อนภายในตู้เย็น

การศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านบน (Frost-free refrigerator) และคอยล์เย็น (Evaporator) ติดตั้งอยู่ในช่องแช่แข็ง (Freezer) โดยช่องแช่แข็งตามมาตรฐานปกติต้องมีอุณหภูมิภายในประมาณ -18 องศาเซลเซียสหรือน้อยกว่า ในขณะที่ช่องแช่เย็น (Refrigerating compartment) ต้องมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 5 องศาเซลเซียส สำหรับลักษณะของช่องแช่เย็นส่วนใหญ่ของตู้เย็นชนิดนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ช่องแช่เนื้อสัตว์ (Meat chiller) อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 0 – 4 องศาเซลเซียสซึ่งนอกจากเหมาะสำหรับแช่เนื้อสัตว์แล้วยังเหมาะสำหรับแช่อาหารประเภทเสื่อมเสียง่าย เช่น ผลิตภัณฑ์จากนม (Dairy product) 2) บริเวณชั้นวาง (Shelves) อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 4 – 7 องศาเซลเซียสบริเวณนี้เป็นช่องแช่ผลิตภัณฑ์อาหารสดทั่วไป รวมถึงผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชนิดต่างๆ (Beverages) สุดท้าย 3) ช่องแช่ผัก (Vegetable drawer) ในช่องแช่นี้มีการควบคุมทั้งอุณหภูมิและความชื้นเพื่อรักษาความสดของผัก โดยอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 5 – 13 องศาเซลเซียสตามมาตรฐานโรงงาน

สำหรับลักษณะการไหลเวียนของอากาศภายในตู้เย็นแสดงดังรูปที่ 5.1 ช่วงแรกพัดลมดูดอากาศให้ไหลผ่านคอยล์เย็นทำให้อุณหภูมิและความชื้นอากาศลดลง จากนั้นพัดลมจะเป่าอากาศเย็นและแห้ง (อุณหภูมิประมาณ -20 องศาเซลเซียส) ส่วนหนึ่งไหลเข้าสู่ช่องแช่แข็ง ส่วนที่เหลือจะไหลเข้าสู่ช่องแช่เย็น (Refrigerating compartment) โดยอาศัยแรงลอยตัว (Buoyancy force) และแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) โดยอากาศจะไหลและกระจายเข้าสู่ช่องแช่เนื้อสัตว์ (Meat chiller) ผ่านชั้นวาง (Shelves) และลงสู่ช่องแช่ผัก (Vegetable drawer) ตามลำดับ จากนั้นอากาศจะรับเอาความร้อนและความชื้นจากไหลซึ่งแช่อยู่ในตู้เย็นและอากาศเดิมภายในช่องแช่ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนจากบรรยากาศภายนอกโดยรอบตู้เย็น ดังนั้นในช่วงนี้อุณหภูมิและความชื้นของอากาศจะสูงขึ้น ทำให้อากาศลอยขึ้นผ่านชั้นวางที่ติดตั้งตามประตูตู้เย็นเข้าสู่ช่องนำอากาศออกบริเวณด้านบนของช่องแช่เย็นเพื่อนำไปลดอุณหภูมิและความชื้นต่อไป โดยอากาศจะปลดปล่อยความร้อนสัมผัส (Sensible heat) และความร้อนแฝง (Latent heat) ให้กับคอยล์เย็นขณะไหลผ่าน อากาศจะไหลวนเวียนเป็นวัฏจักรลักษณะนี้ตลอดการทำงานของตู้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ลักษณะการไหลเวียนอากาศภายในตู้เย็นสองประตูช่องแช่แข็งด้านบน

5.1.2 การกระจายอุณหภูมิภายในตู้เย็นเปล่า (Empty refrigerator)

การทดลองจัดทำขึ้นเพื่อวัดอุณหภูมิภายในตู้เย็นเปล่า โดยใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ (Data logger iButtonDS1921G) ช่วงการวัดอุณหภูมิเท่ากับ -30 ถึง $+70$ องศาเซลเซียส ความแม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง บันทึกค่าทุกๆ 1 นาทีภายใต้การตั้งค่าระดับอุณหภูมิ 3 สถานะคือ ระดับอุณหภูมิภายในช่องแช่เย็นคงที่ที่ระดับสูงและระดับอุณหภูมิภายในช่องแช่แข็งเปลี่ยนแปลง 3 ระดับได้แก่ สูง กลางและต่ำตามลำดับ โดยความหมายของระดับอุณหภูมิสูงคือ อุณหภูมิภายในตู้เย็นของช่องแช่เย็นมีอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่ระดับอุณหภูมิมiddle และต่ำหมายถึงอุณหภูมิภายในตู้เย็นของช่องแช่เย็นจะมีค่าสูงขึ้น ตามลำดับ

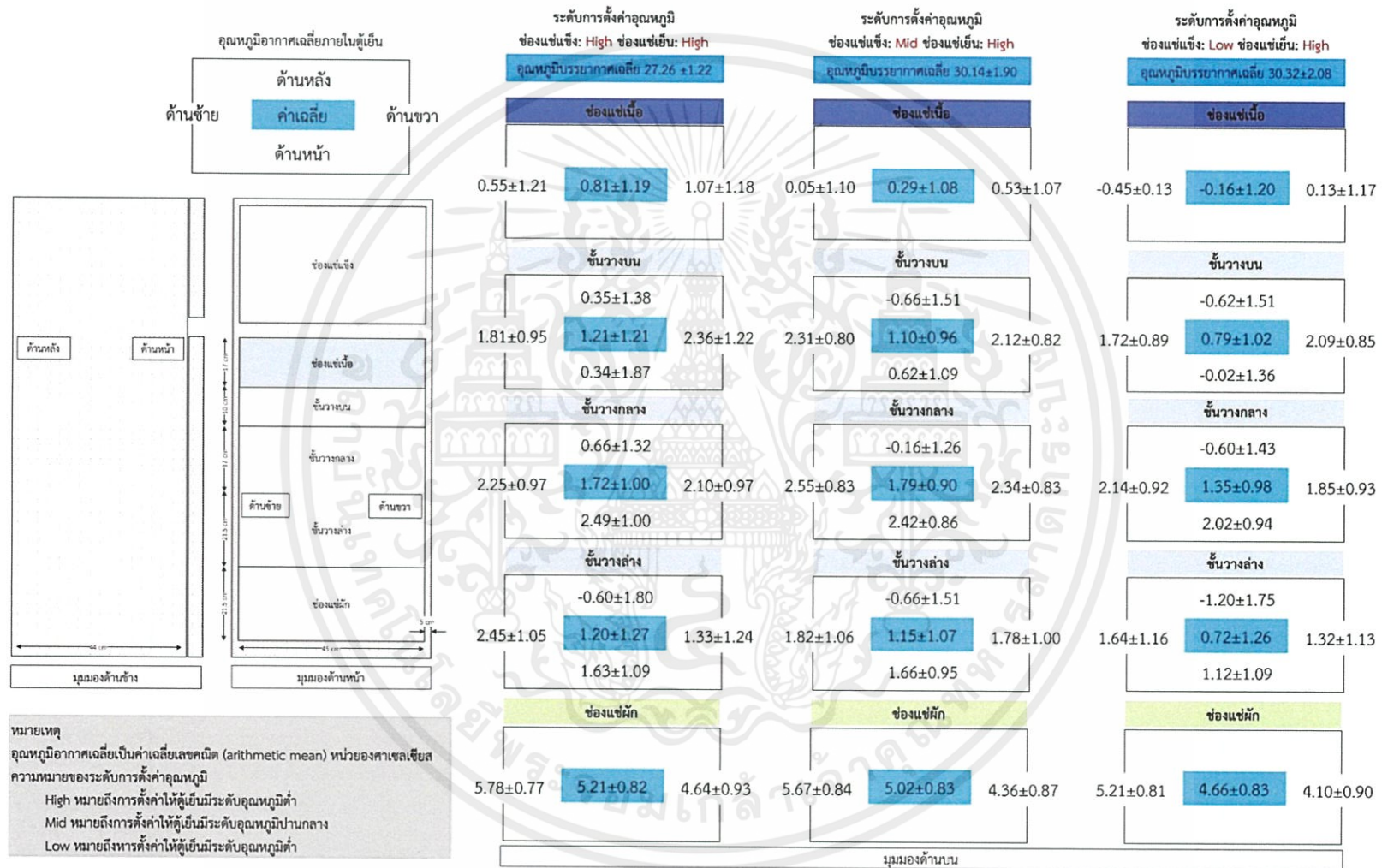
จากรูปที่ 5.2 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็นตั้งแต่ช่องแช่เนื้อ ชั้นวางและช่องแช่ผัก พร้อมแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งของแต่ละชั้นนั้นๆ ภายใต้การทดลอง 3 สถานะพบว่า การทดลองทั้งสามให้ผลที่สอดคล้องกันคือ บริเวณช่องแช่เนื้อมีอุณหภูมิต่ำที่สุด จากนั้นอุณหภูมิจะสูงขึ้นเมื่อระดับความสูงลดลง โดยชั้นวางบนและชั้นวางล่างมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แต่ชั้นวางกลางจะมีอุณหภูมิสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นวางอื่นๆ ดังรูปที่ 5.3.5.4 และ 5.5 แสดงระดับอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็นเทียบกับเวลา ภายใต้สถานะการตั้งค่าอุณหภูมิสูง - สูง กลาง - สูง และต่ำ - สูง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบและติดตั้งช่องปล่อยอากาศเย็นเข้าภายในช่องแช่เย็นกล่าวคือ บริเวณชั้นวางบนติดตั้งอยู่ใกล้กับช่องปล่อยอากาศเย็นเข้า ในขณะที่ชั้นวางล่างได้รับอากาศเย็นโดยตรงที่ไหลออกมาจากช่องปล่อยอากาศเย็นผ่านช่องว่างระหว่างผนังด้านหลังกับชั้นวาง อีกทั้งเมื่ออากาศเย็นไหลมาถึงชั้นวางล่าง อากาศจะพบกับช่องแช่ผักซึ่งเปรียบเสมือนสิ่งกีดขวางทิศทางการไหลของอากาศทำให้ชั้นวางล่างได้รับอากาศเย็นเต็มที่ ส่วนชั้นวางกลางได้รับอากาศเย็นโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงลอยตัวของอากาศ ประกอบกับได้รับ

ผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังตู้ด้านข้างทั้งสองด้าน ส่งผลให้ชั้นวางกลางมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นวางอื่นๆ จากที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าช่องแช่ผักเปรียบเสมือนสิ่งกีดขวางทิศทางการไหลของอากาศหมายความว่าอากาศเย็นไหลเข้าสู่ภายในช่องแช่ผักได้น้อยมาก ทำให้ช่องแช่ผักมีอุณหภูมิสูงที่สุดของช่องแช่เย็น เหตุผลที่ช่องแช่ผักไม่ต้องการอากาศเย็นเพราะความเย็นจะทำให้ผักสูญเสียความชื้นมากจนทำให้ผักเหี่ยวและเสียเร็วขึ้น

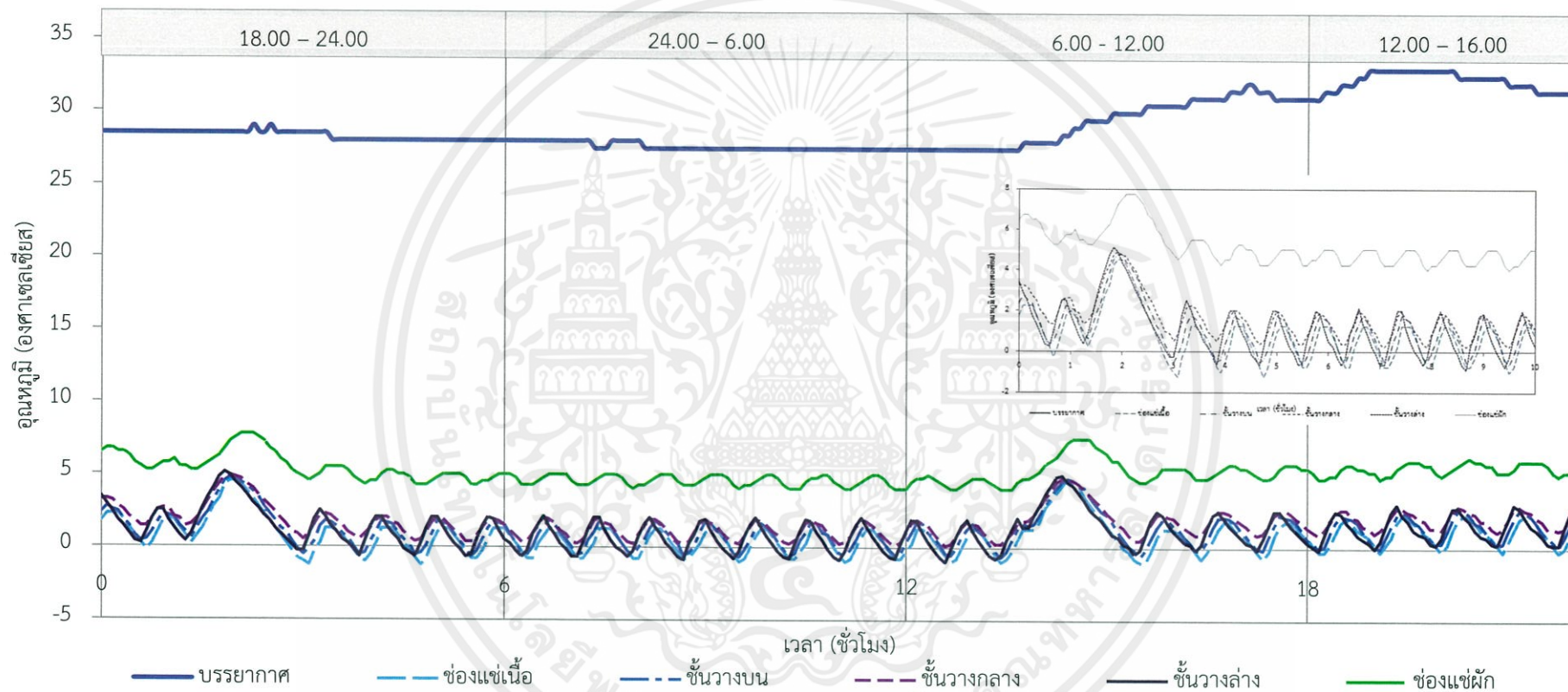
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของแต่ละชั้นวางพบว่า อุณหภูมิบริเวณด้านซ้ายและด้านขวามีความแตกต่างกันน้อยมาก แต่สำหรับอุณหภูมิบริเวณด้านหลังจะมีค่าต่ำกว่าด้านหน้าอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณด้านหลังอยู่ใกล้กับช่องปล่อยอากาศเย็น จากนั้นเมื่ออากาศไหลผ่านแต่ละชั้นอากาศจะได้รับความร้อนจากอากาศเดิมที่อยู่ภายในช่องแช่เย็นซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากบรรยากาศภายนอกตู้เย็นผ่านเข้าสู่ช่องแช่เย็น ทำให้เมื่ออากาศมาถึงบริเวณด้านหน้าของชั้นวางมีอุณหภูมิสูงมากขึ้นซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับบริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของชั้นวางชั้นนั้นๆ ยกเว้นชั้นวางบนที่บริเวณด้านหน้ามีอุณหภูมิต่ำกว่าด้านซ้ายและขวา เนื่องจากชั้นวางด้านบนอยู่ติดกับช่องปล่อยอากาศ โดยการกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของแต่ละชั้นวาง แสดงดังรูปที่ 5.6

เมื่อพิจารณาสภาวะการตั้งค่าอุณหภูมิทั้งสามพบว่า การตั้งค่าช่องแช่แข็งระดับต่ำและช่องแช่เย็นระดับสูง (low – high) ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในช่องแช่เย็นต่ำที่สุด ในการกลับกันการตั้งค่าช่องแช่แข็งระดับกลางและสูงกับอุณหภูมิช่องแช่เย็นระดับสูง (mid – high และ high – high) ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในช่องแช่เย็นสูงขึ้น ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบระบบท่ออากาศของตู้เย็นรุ่นนี้ (Mitsubishi Electric: MR-F26D) กล่าวคือ เมื่อตั้งค่าระดับอุณหภูมิสูงภายในช่องแช่แข็งส่งผลให้ความต้องการความเย็นภายในช่องแช่แข็งเพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วนอากาศเย็นที่ไหลเข้าสู่ช่องแช่เย็นน้อยลง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในจึงสูงขึ้น แต่เมื่อตั้งค่าระดับอุณหภูมิช่องแช่แข็งต่ำ ความต้องการความเย็นภายในช่องแช่แข็งจะลดลง ทำให้สัดส่วนอากาศเย็นเข้าสู่ภายในช่องแช่เย็นเพิ่มขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยภายในช่องแช่เย็นจึงต่ำลง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเฉลี่ยภายในช่องแช่เย็นภายใต้สภาวะการตั้งค่าทั้งสามระดับยังคงมีค่าไม่เกินอุณหภูมิมาตรฐาน (5 องศาเซลเซียส) ตารางที่ 5.1 เป็นตารางสรุปการกระจายอุณหภูมิภายในช่องแช่เย็นแต่ละชั้น ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ

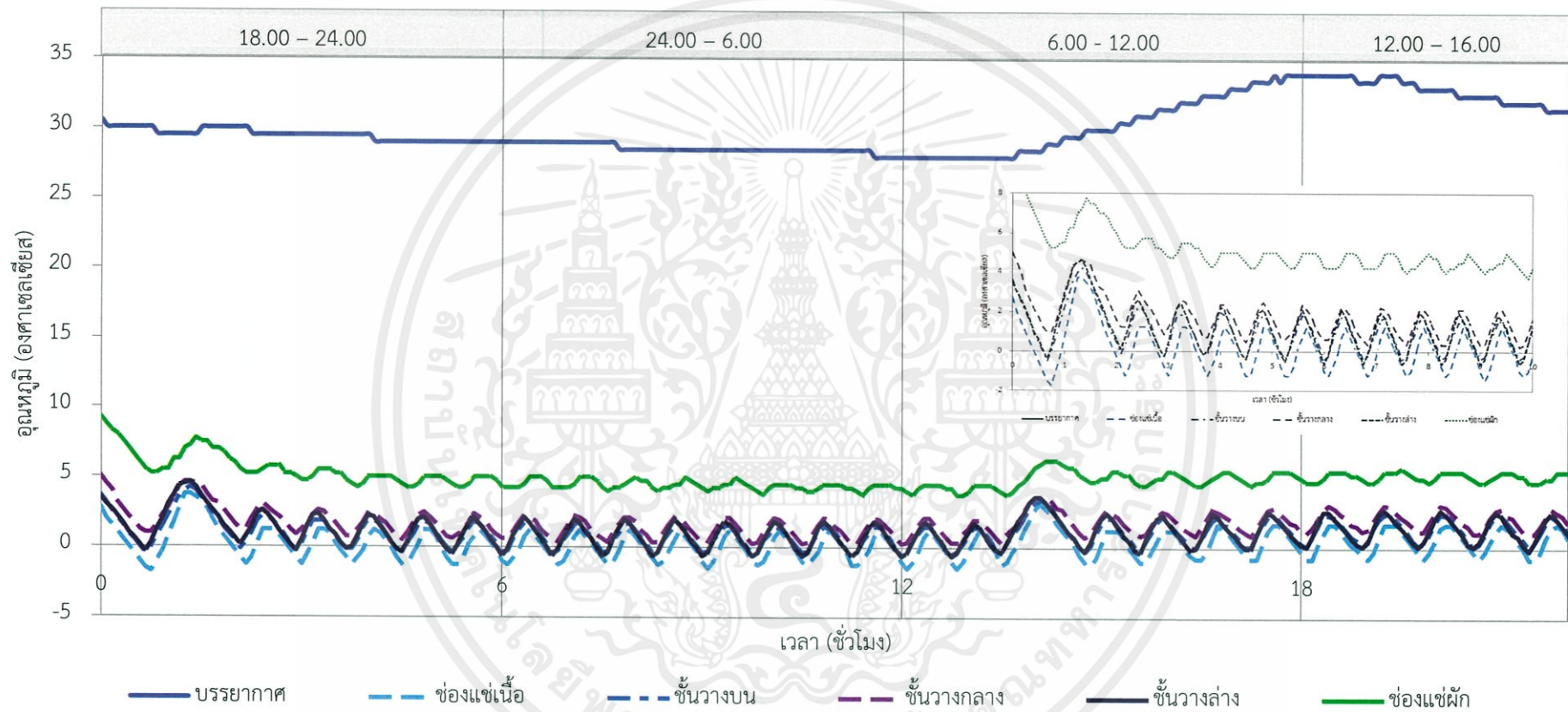
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



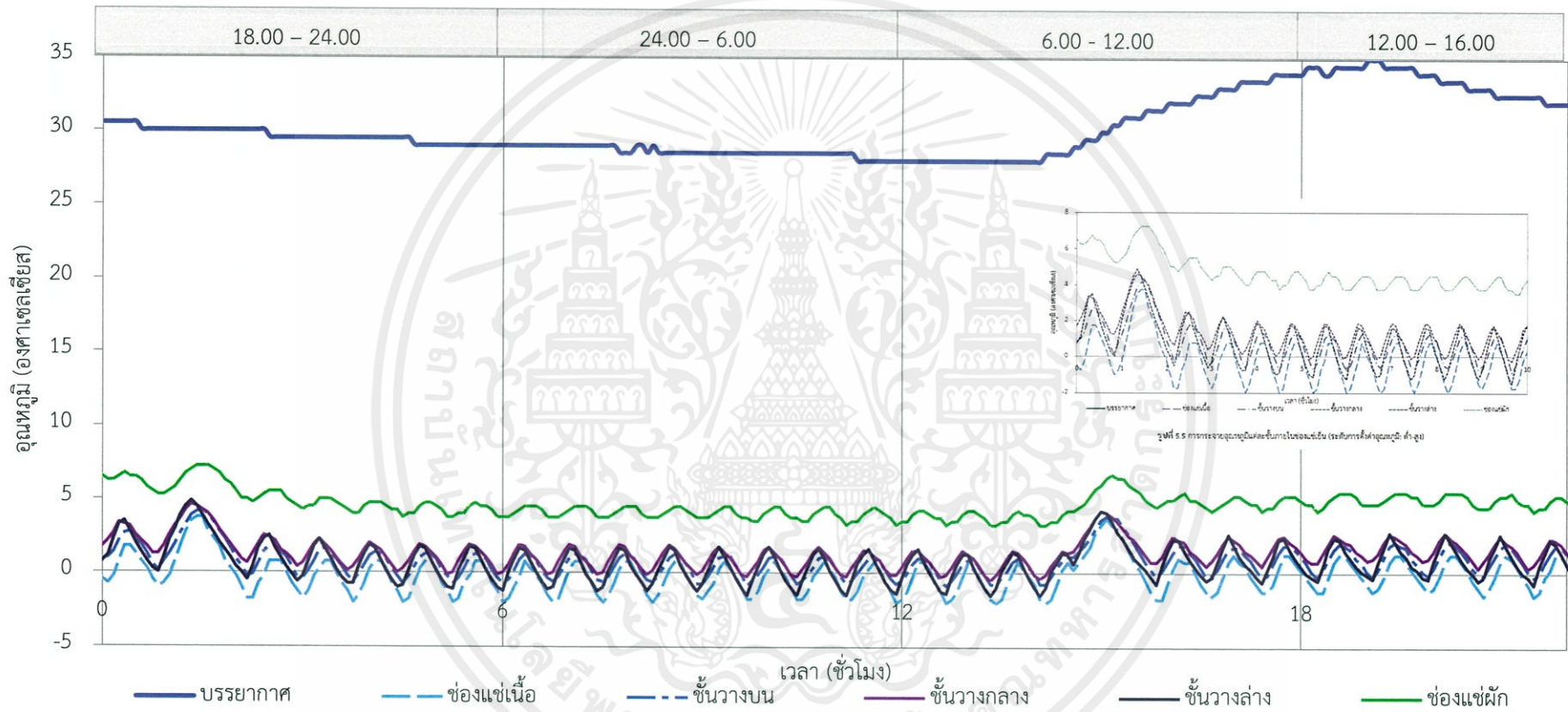
รูปที่ 5.2 การกระจายอนุภาคในแต่ละชั้นวางภายในช่องแช่เย็น ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ (I) High-High (II) Mid-High และ (III) Low-High



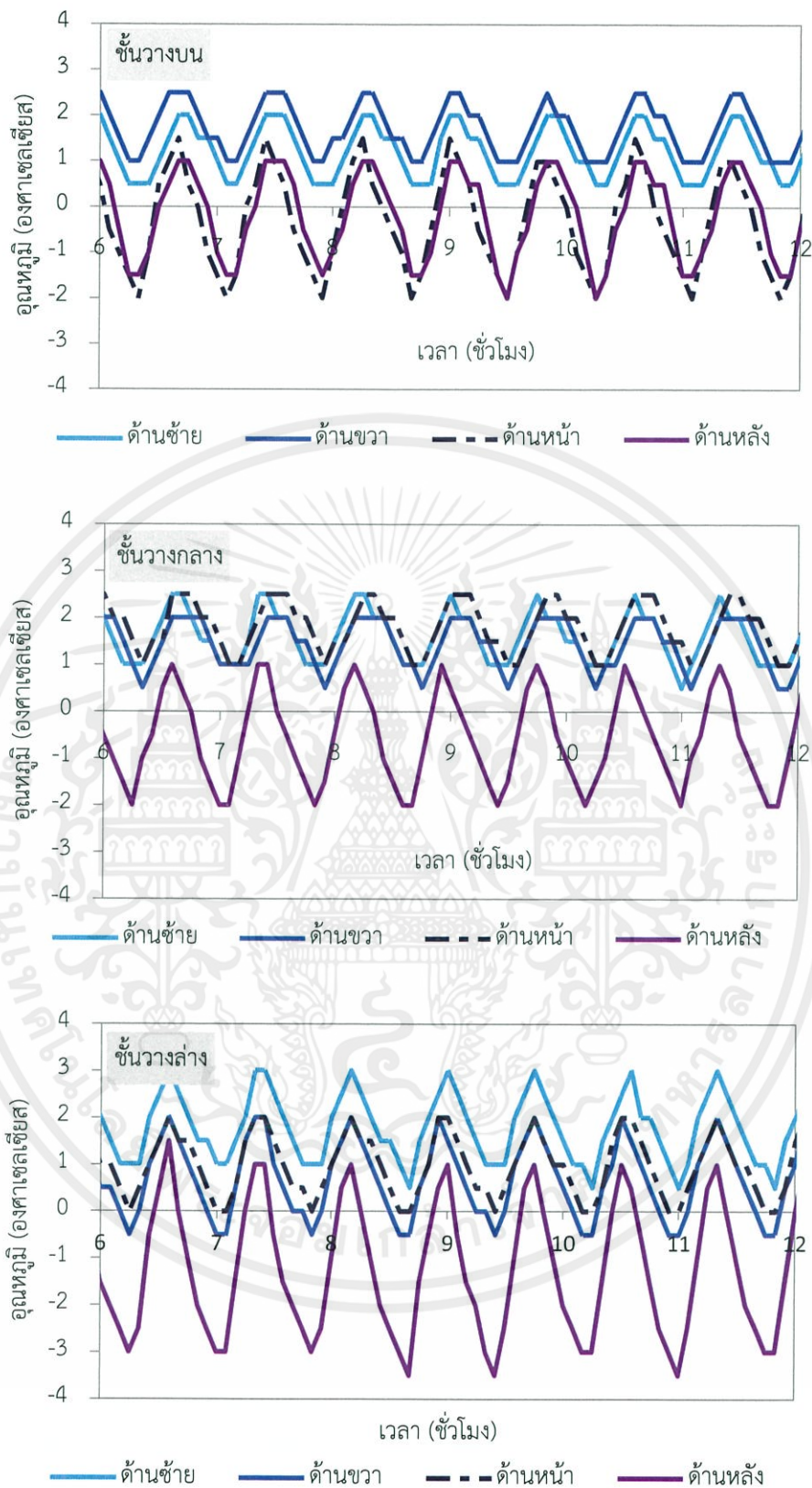
รูปที่ 5.3 การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็น (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: สูง-สูง)



รูปที่ 5.4 การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็น (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: กลาง-สูง)



รูปที่ 5.5 การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็น (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: ต่ำ-สูง)



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของแต่ละชั้นวาง ประกอบด้วย (I) ชั้นวางบน (II) ชั้นวางกลาง และ (III) ชั้นวางล่าง ภายใต้การตั้งค่าระดับอุณหภูมิ High-High

ตารางที่ 5.1 การกระจายอุณหภูมิภายในช่องแช่เย็นแต่ละชั้น ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ

ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ (ช่องแช่แข็ง-ช่องแช่เย็น): high-high						
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)						
	บรรยากาศ	ช่องแช่เนื้อ	ช่องแช่ผัก	ชั้นบน	ชั้นกลาง	ชั้นล่าง
อุณหภูมิเฉลี่ย	29.24	0.81	5.21	1.21	1.72	1.20
SD	1.84	1.19	0.82	1.21	1.00	1.27
ค่าสูงสุด	33.00	4.75	7.75	6.38	4.88	6.38
ค่าต่ำสุด	27.50	-1.25	4.00	-0.63	0.13	-1.00
ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ (ช่องแช่แข็ง-ช่องแช่เย็น): mid-high						
อุณหภูมิเฉลี่ย	30.14	0.29	5.02	1.10	1.79	1.15
SD	1.90	1.08	0.83	0.96	0.90	1.07
ค่าสูงสุด	34.00	3.75	9.25	4.25	5.00	4.63
ค่าต่ำสุด	28.00	-1.75	3.75	-0.63	0.25	-0.63
ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ (ช่องแช่แข็ง-ช่องแช่เย็น): low-high						
อุณหภูมิเฉลี่ย	30.32	-0.16	4.66	0.79	1.35	0.72
SD	2.08	1.20	0.83	1.02	0.98	1.26
ค่าสูงสุด	35.00	3.75	7.25	4.25	4.63	4.88
ค่าต่ำสุด	28.00	-2.00	3.25	-0.88	-0.50	-1.50

5.1.3 การกระจายอุณหภูมิภายในตู้เย็นบรรจุโหลด (Loaded refrigerator)

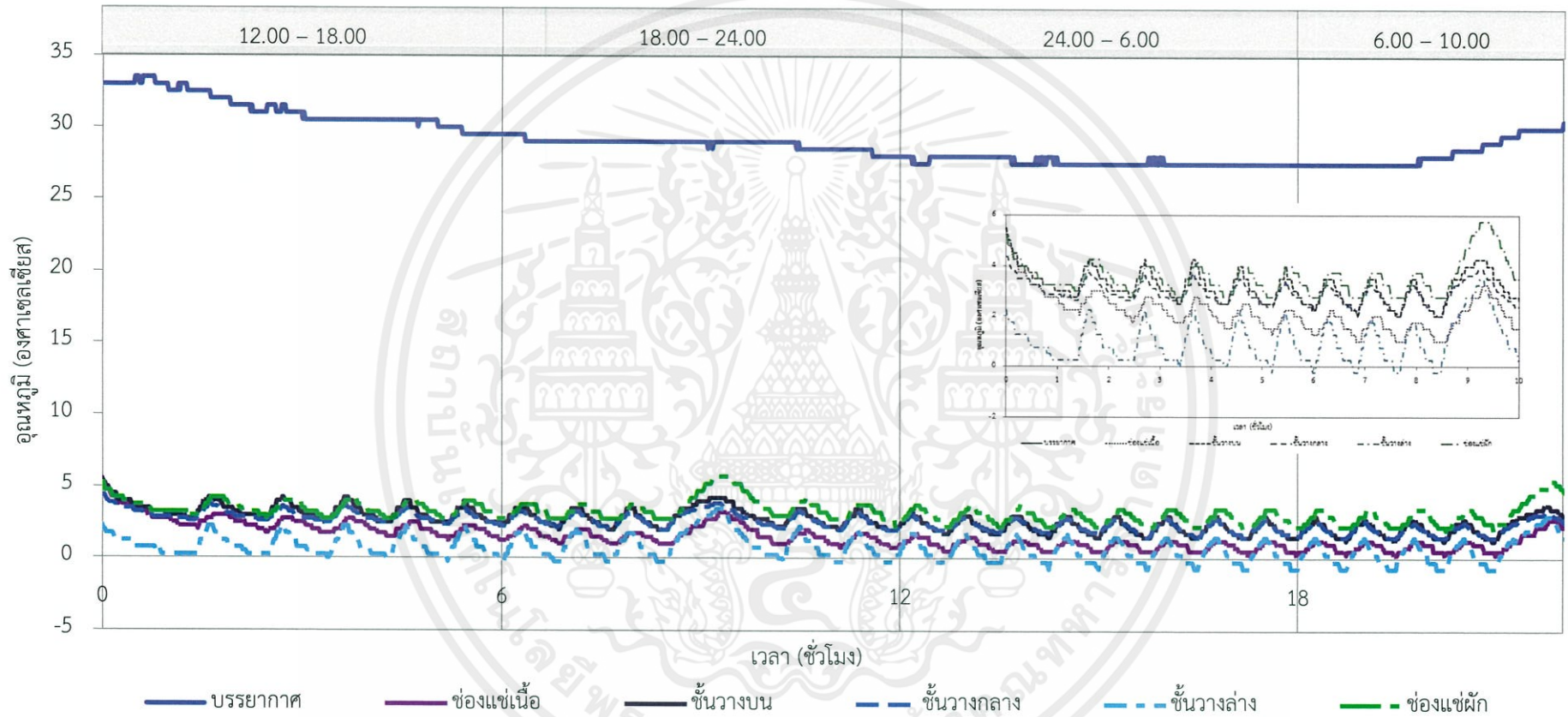
การทดลองจัดทำขึ้นเพื่อวัดอุณหภูมิภายในตู้เย็นซึ่งภายในบรรจุโหลด โดยโหลดที่ใช้คือเนื้อไก่บด (minced chicken) บรรจุถ้วยพลาสติกขนาด 425 มิลลิลิตร จำนวน 5 ถ้วยพร้อมกับน้ำบริสุทธิ์บรรจุถ้วยลักษณะเดียวกัน จำนวน 43 ถ้วย รวมปริมาตรบรรจุทั้งหมดของโหลดเท่ากับ 20.4 ลิตรสำหรับพลาสติกของถ้วยเป็นพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีน (Polypropylene: PP) การวัดอุณหภูมิใช้วิธีการเดียวกับการทดลองตู้เย็นเปล่าคือ ใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ (Data logger iButton DS1921G) ช่วงการวัดอุณหภูมิเท่ากับ -30 ถึง +70 องศาเซลเซียสความแม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียสบันทึกค่าทุกๆ 1 นาทีเป็นเวลา 22 ชั่วโมง ภายใต้การตั้งค่าระดับอุณหภูมิ 3 แบบได้แก่ ระดับอุณหภูมิช่องแช่เย็นคงที่ที่ระดับสูงกับระดับอุณหภูมิช่องแช่แข็งเปลี่ยนแปลง 3 ระดับคือ สูง กลางและต่ำ โดยวัดทั้งอุณหภูมิของเนื้อไก่บดและอากาศภายในช่องแช่เย็น

จากการทดลองภายใต้ 3 สภาวะพบว่าทั้งสามสภาวะมีผลการทดลองที่สอดคล้องกันคือ ชั้นวางล่างมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด ตามด้วยช่องแช่เนื้อ ชั้นวางกลาง ชั้นวางบนและช่องแช่ผักมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด ดังรูปที่ 5.7 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็นกรณีตู้เย็นบรรจุโหลดพร้อมแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งของแต่ละชั้นนั้นๆ และอุณหภูมิเฉลี่ยของเนื้อไก่บดตลอดระยะเวลา 22 ชั่วโมง ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ การที่ชั้นวางล่างมีอุณหภูมิต่ำสุดเนื่องจากโหลดที่บรรจุภายในตู้เย็นทำหน้าที่เสมือนสิ่งกีดขวางการไหลของอากาศ ทำให้อากาศส่วนใหญ่ไหลลงผ่านทางช่องว่างระหว่างผนังตู้เย็นด้านหลังกับชั้นวางได้สะดวกมากกว่าการไหลจากด้านหลังตู้เย็นไป

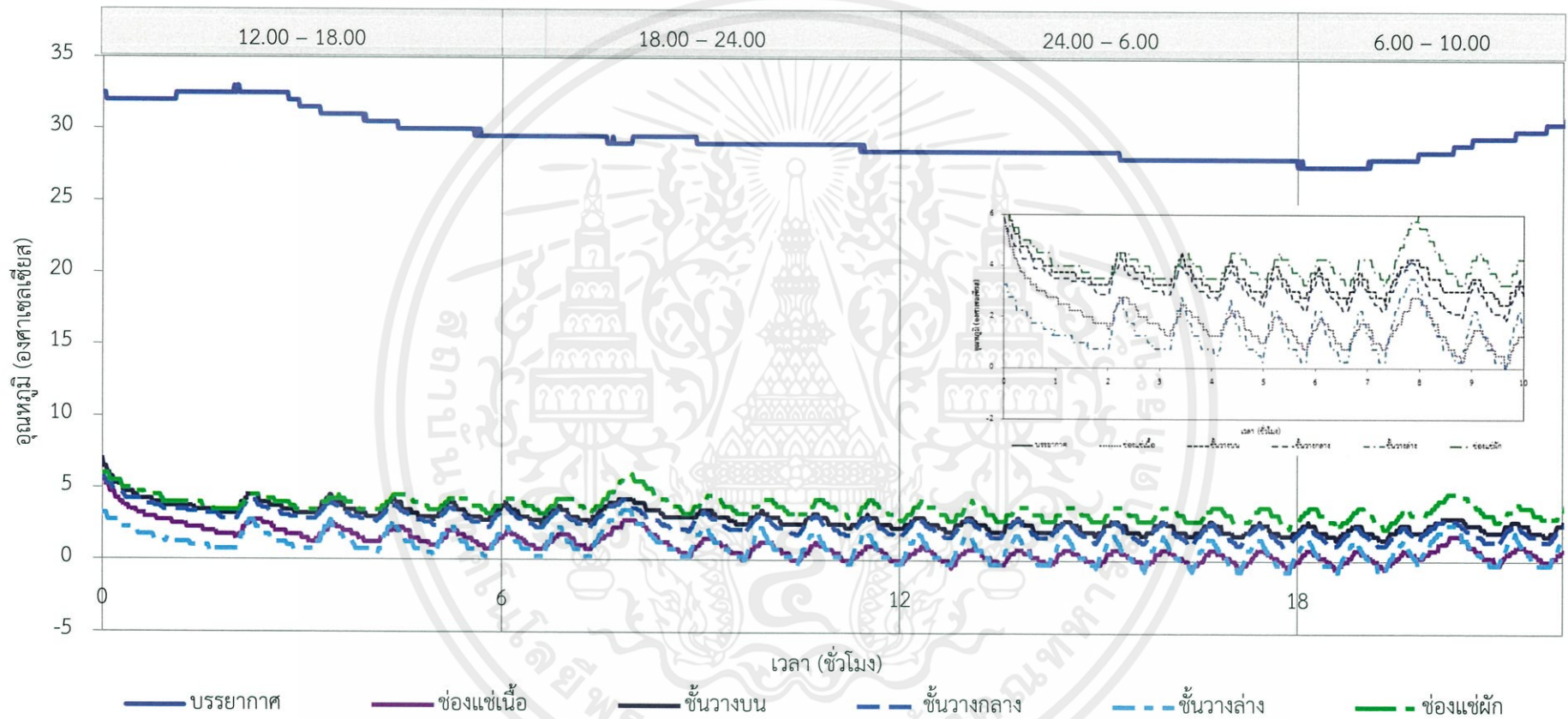
ด้านหน้าหรือประตู จึงเป็นสาเหตุทำให้ชั้นวางล่างมีอุณหภูมิต่ำสุด ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ทำให้ชั้นวางกลางมีอุณหภูมิต่ำกว่าชั้นวางบน นอกจากนี้เหตุผลที่ช่องแช่เนื้อไม่ใช่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสุดสามารถอธิบายด้วยรูปที่ 5.8 5.9 และ 5.10 แสดงการกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็นภายในตู้เย็นกรณีมีบรรจุไหลด์ ภายใต้การตั้งค่าอุณหภูมิ สูง – สูง กลาง – สูง และ ต่ำ – สูง ตามลำดับ กล่าวคือแม้ว่าอุณหภูมิชั้นวางล่างมีอุณหภูมิต่ำสุด แต่ความจริงแล้วอุณหภูมิของทั้งสองบริเวณ (ช่องแช่เนื้อและชั้นวางล่าง) มีความแตกต่างกันเล็กน้อยอีกทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยคิดจากอุณหภูมิจากอุณหภูมิบริเวณด้านซ้ายและด้านขวาทำให้อุณหภูมิใกล้เคียงกัน และเมื่อสังเกตอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆบนชั้นวางแต่ละชั้นพบว่า อุณหภูมิบริเวณด้านซ้ายและด้านขวามีความแตกต่างกันเล็กน้อย และอุณหภูมิด้านหน้ามีค่าสูงกว่าด้านหลัง โดยอุณหภูมิบริเวณด้านหลังมีค่าต่ำสุด ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองกรณีตู้เย็นเปล่า ดังรูปที่ 5.11 แสดงการกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งบริเวณชั้นวางกลางของตู้เย็นกรณีบรรจุไหลด์ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ

เมื่อนำผลการทดลองตู้เย็นเปล่าเปรียบเทียบกับผลการทดลองตู้เย็นบรรจุไหลด์พบว่า กรณีตู้เย็นเปล่าช่องเก็บเนื้อจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด ในขณะที่ตู้เย็นบรรจุไหลด์ชั้นวางล่างจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด (ตามที่ได้กล่าวไปแล้วตู้เย็นบรรจุไหลด์ความแตกต่างของอุณหภูมิช่องแช่เนื้อและชั้นวางล่างไม่แตกต่างกันมาก) นอกจากนี้อุณหภูมิเฉลี่ยของช่องแช่ผักของการทดลองทั้งสองมีความสอดคล้องกันคือ ช่องแช่ผักเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดในช่องแช่เย็น โดยช่องแช่ผักของตู้เย็นบรรจุไหลด์มีอุณหภูมิต่ำกว่าตู้เย็นเปล่า ทั้งนี้เป็นผลของอุณหภูมิชั้นวางล่างของตู้เย็นบรรจุไหลด์ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด สุดท้ายเมื่อเปรียบเทียบตู้เย็นจากทั้งสองการทดลอง ภายใต้การตั้งค่าระดับอุณหภูมิ 3 ระดับพบว่า มีผลการทดลองเหมือนกันคือ การตั้งค่าช่องแช่เย็นสูงและช่องแช่แข็งต่ำจะทำให้อุณหภูมิช่องแช่เย็นมีอุณหภูมิต่ำสุด ในขณะที่อุณหภูมิช่องแช่เย็นจะเพิ่มขึ้น เมื่อเปลี่ยนการตั้งค่าระดับอุณหภูมิช่องแช่แข็งเป็นกลางและสูง ตามลำดับ ตารางที่ 5.2 สรุปการกระจายอุณหภูมิกอากาศภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นบรรจุไหลด์ ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะอย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละชั้นของตู้เย็นระหว่างตู้เย็นเปล่าและตู้เย็นบรรจุไหลด์พบว่า ตั้งแต่ช่องแช่เนื้อจนถึงชั้นวางกลางของตู้เย็นเปล่ามีอุณหภูมิต่ำกว่าตู้เย็นบรรจุไหลด์ แต่เมื่อพิจารณาบริเวณชั้นวางล่างและช่องแช่ผักของตู้เย็นทั้งสองพบว่า อุณหภูมิที่บริเวณดังกล่าวของตู้เย็นเปล่ามากกว่าตู้เย็นบรรจุไหลด์ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยการมีอยู่ของไหลด์ที่ตั้งได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น กล่าวคือการมีอยู่ของไหลด์เปรียบเสมือนเป็นสิ่งกีดขวางทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้เย็นทำให้อากาศที่ออกจากช่องปล่อยอากาศไหลผ่านตามช่องวางระหว่างผนังด้านหลังกับชั้นวางได้ง่ายกว่าการไหลไปยังด้านหน้าหรือประตู ทำให้อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านล่างของตู้เย็นบรรจุไหลด์ต่ำกว่าตู้เย็นเปล่า ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ทำให้ช่องแช่ผักของตู้เย็นบรรจุไหลด์มีอุณหภูมิต่ำกว่าด้วยเช่นกัน

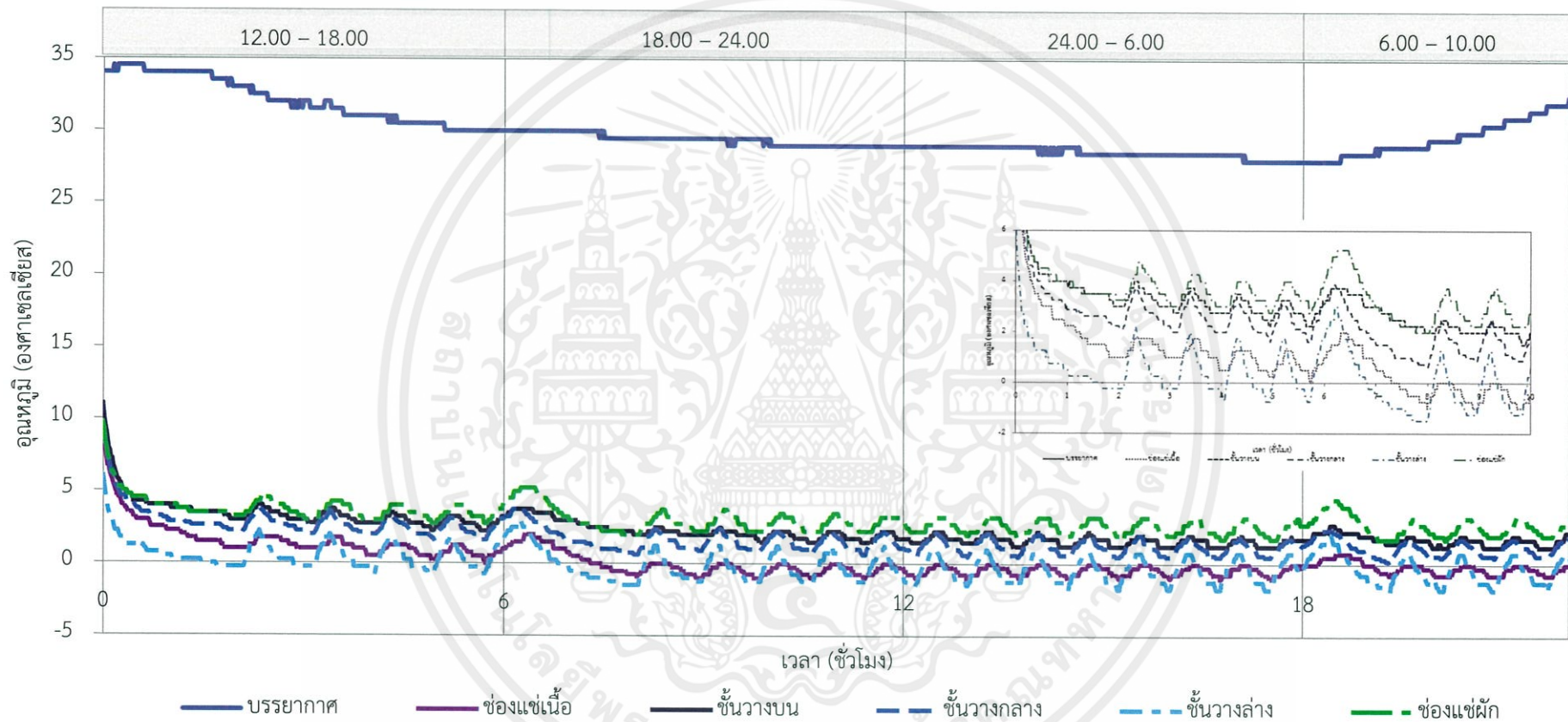
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



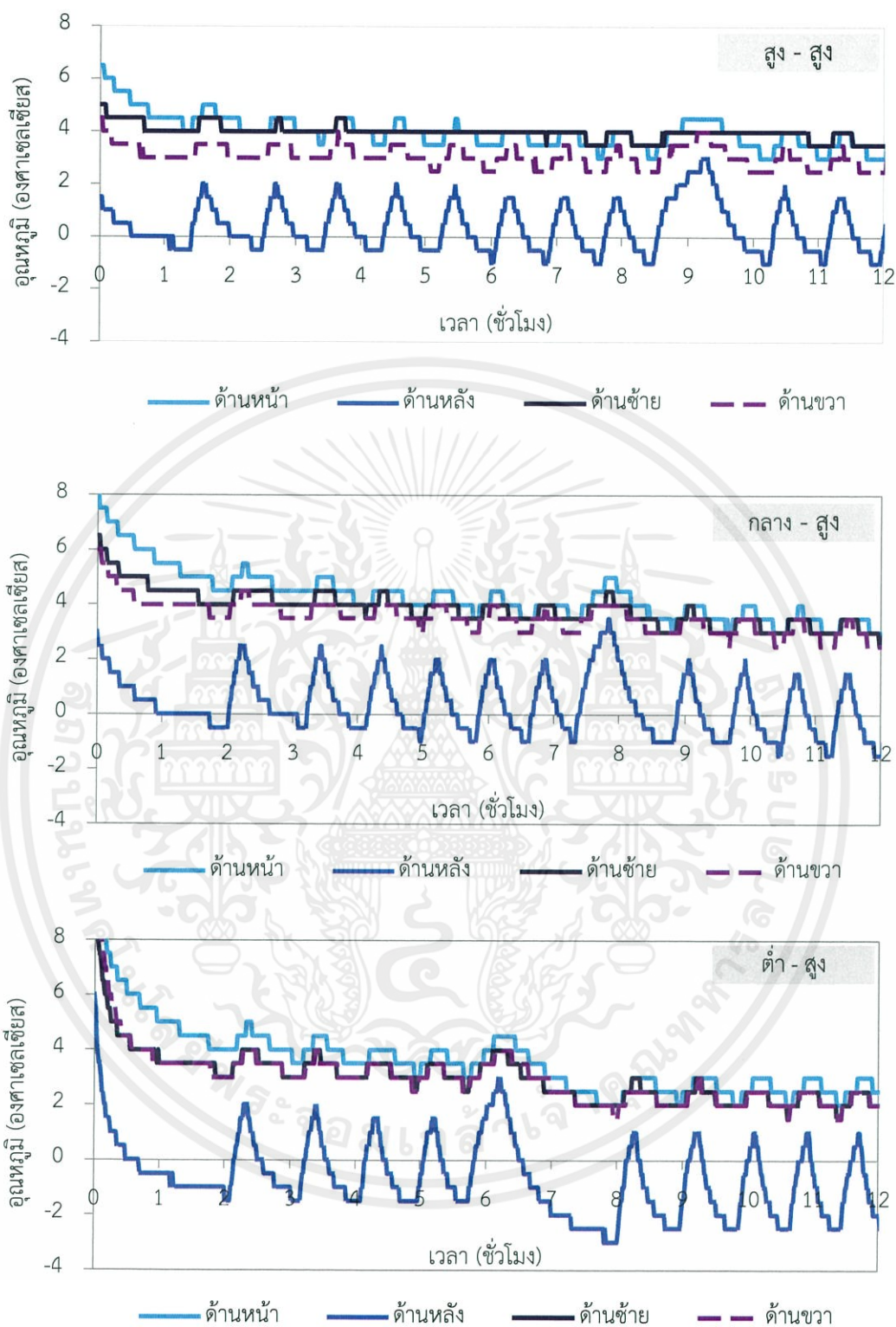
รูปที่ 5.8 การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็นกรณีมีโหลด (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: สูง-สูง)



รูปที่ 5.9 การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็นกรณีมีโหลสด (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: กลาง-สูง)



รูปที่ 5.10 การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในช่องแช่เย็นกรณีมีไหลต (ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: ต่ำ-สูง)



รูปที่ 5.11 การกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของชั้นวางกลางที่ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ 3 สภาวะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 การกระจายอุณหภูมิภายในช่องแช่เย็นแต่ละชั้นของตู้เย็นบรรจุโพลด ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ

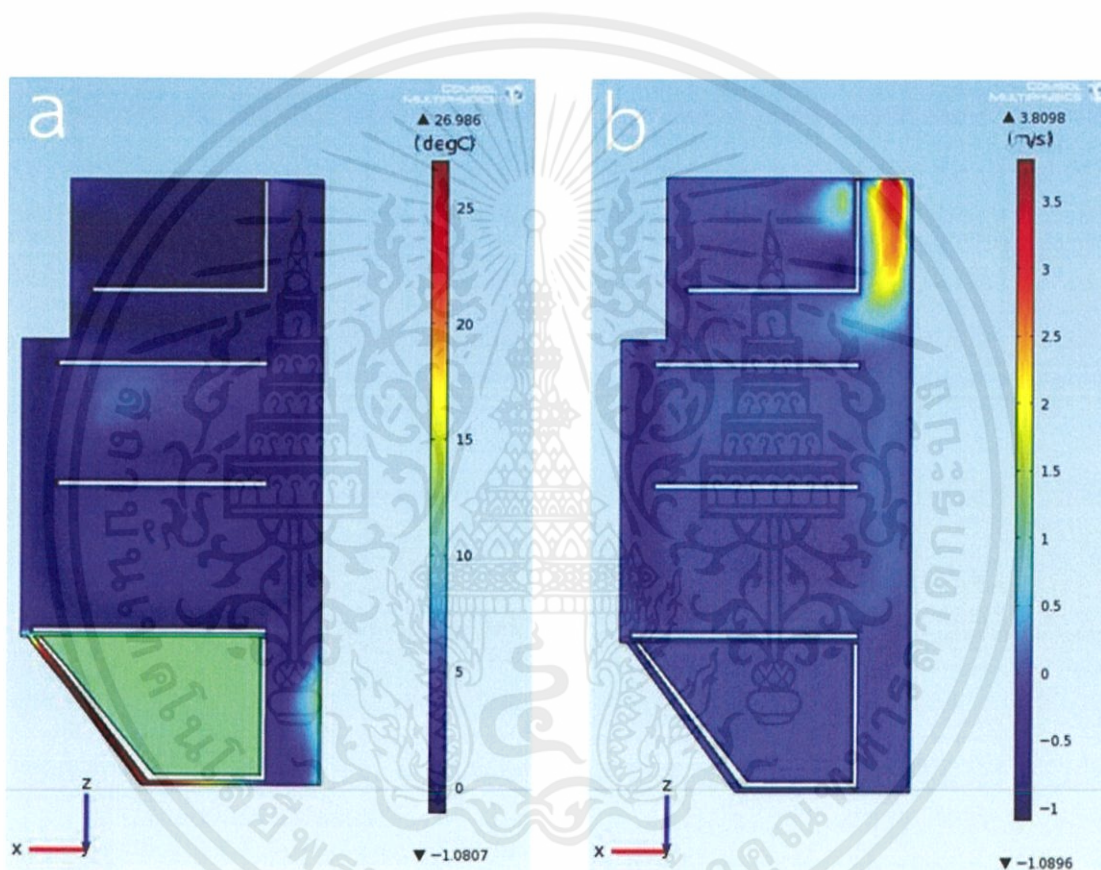
ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ (ช่องแช่แข็ง-ช่องแช่เย็น): high-high						
อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)						
	บรรยากาศ	ช่องแช่เนื้อ	ช่องแช่ผัก	ชั้นบน	ชั้นกลาง	ชั้นล่าง
อุณหภูมิเฉลี่ย	29.16	1.54	3.31	2.69	2.55	0.74
SD	1.60	0.81	0.72	0.73	0.56	0.85
ค่าสูงสุด	33.50	5.25	5.75	5.50	4.38	3.50
ค่าต่ำสุด	27.50	0.25	2.00	1.25	1.50	-0.75
ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ (ช่องแช่แข็ง-ช่องแช่เย็น): mid-high						
อุณหภูมิเฉลี่ย	29.56	1.00	3.68	2.85	2.50	0.72
SD	1.50	0.97	0.64	0.79	0.80	0.85
ค่าสูงสุด	33.00	5.75	6.00	7.00	5.88	3.50
ค่าต่ำสุด	27.50	-0.50	2.25	1.50	1.13	-0.75
ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ (ช่องแช่แข็ง-ช่องแช่เย็น): low-high						
อุณหภูมิเฉลี่ย	30.14	0.25	3.05	2.31	1.75	-0.08
SD	1.76	1.13	0.87	0.99	1.00	1.02
ค่าสูงสุด	34.50	9.00	9.75	11.00	9.50	6.00
ค่าต่ำสุด	28.00	-1.00	1.75	1.25	0.13	-1.75

5.1.4 การจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในตู้เย็น

จากจำลองระบบด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Comsol Multiphysics 4.1®) ภายในตู้เย็น กำหนดลักษณะการไหลเวียนของอากาศเป็นแบบราบเรียบ (laminar flow) และการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (natural convection) โดยการคำนวณเป็นการคำนวณภายใต้สภาวะสมดุล (stationary)

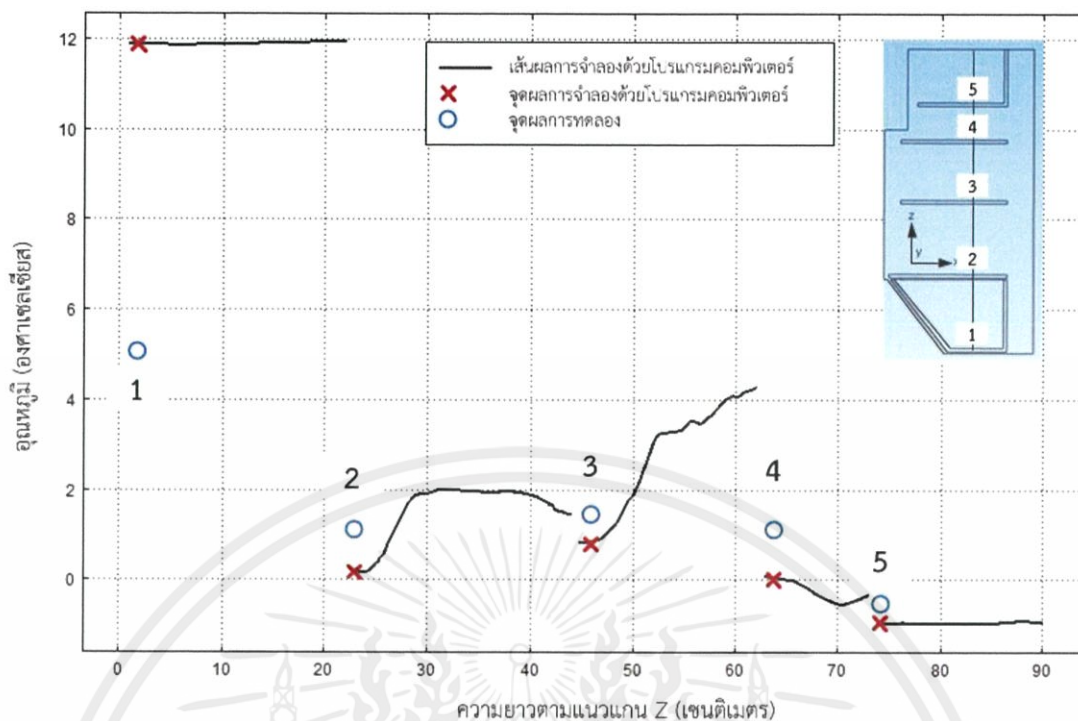
ผลการจำลองระบบการถ่ายเทความร้อนภายในตู้เย็นเปล่า รูปที่ 5.12(a) แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็น โดยอุณหภูมิบริเวณช่องแช่เนื้อมีอุณหภูมิต่ำที่สุดและอุณหภูมิภายในช่องแช่ผักมีอุณหภูมิสูงสุด และเมื่อพิจารณาชั้นวางต่างๆภายในช่องแช่เย็นพบว่า ชั้นวางบนและชั้นวางล่างอุณหภูมิสูงกว่าชั้นวางกลาง ทั้งนี้เนื่องจากชั้นวางบนอยู่ติดกับช่องปล่อยอากาศเย็นเข้า ในขณะที่ชั้นวางล่างได้รับอากาศเย็นจากช่องปล่อยอากาศแนวแกน z ทำให้มีอากาศเย็นไหลลงมาตามช่องว่างระหว่างผนังด้านหลังกับชั้นวาง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 5.12(b) แสดงความเร็วการไหลของอากาศภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็น โดยความเร็วเป็นความเร็วประกอบแนวแกน z (z-component velocity field) จากรูปที่ 5.12(b) นี้พบว่า อากาศที่ไหลออกจากช่องปล่อยแนวแกน x จะไหลเข้าสู่ช่องแช่เนื้อและชั้นวางบน และชั้นวางบนจะได้รับอากาศเย็นในช่องแช่เนื้อบางส่วนที่ไหลกลับเข้ามาด้วย จากนั้นอากาศจะไหลผ่านชั้นวางแล้วไหลเข้าสู่ช่องหมุนเวียนอากาศ

ออก (outlet) ในขณะที่อากาศจากช่องปล่อยแนวแกน z จะไหลผ่านช่องว่างระหว่างผนังด้านหลังกับชั้นวางลงสู่ชั้นวางกลาง ชั้นวางล่างและช่องแช่ผักตามลำดับ ด้วยแรงลอยตัวและแรงโน้มถ่วงของโลก และเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นอากาศก็จะไหลขึ้นเข้าสู่ช่องหมุนเวียนอากาศออกผสมกับอากาศจากชั้นต่างๆ หมุนเวียนเช่นนี้เรื่อยๆตลอดการทำงานของตู้เย็น เมื่อนำผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิจากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง ยกเว้นที่ตำแหน่งชั้นวางบนและช่องแช่ผักที่อุณหภูมิจากการจำลองมีค่าสูงกว่าการทดลองอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองของการกระจายอุณหภูมิภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็น



รูปที่ 5.12 a) การกระจายอุณหภูมิ และ (b) ความเร็วในแนวแกน z ภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็น
บนระนาบสมมาตร ($y = 23.5 \text{ cm}$)

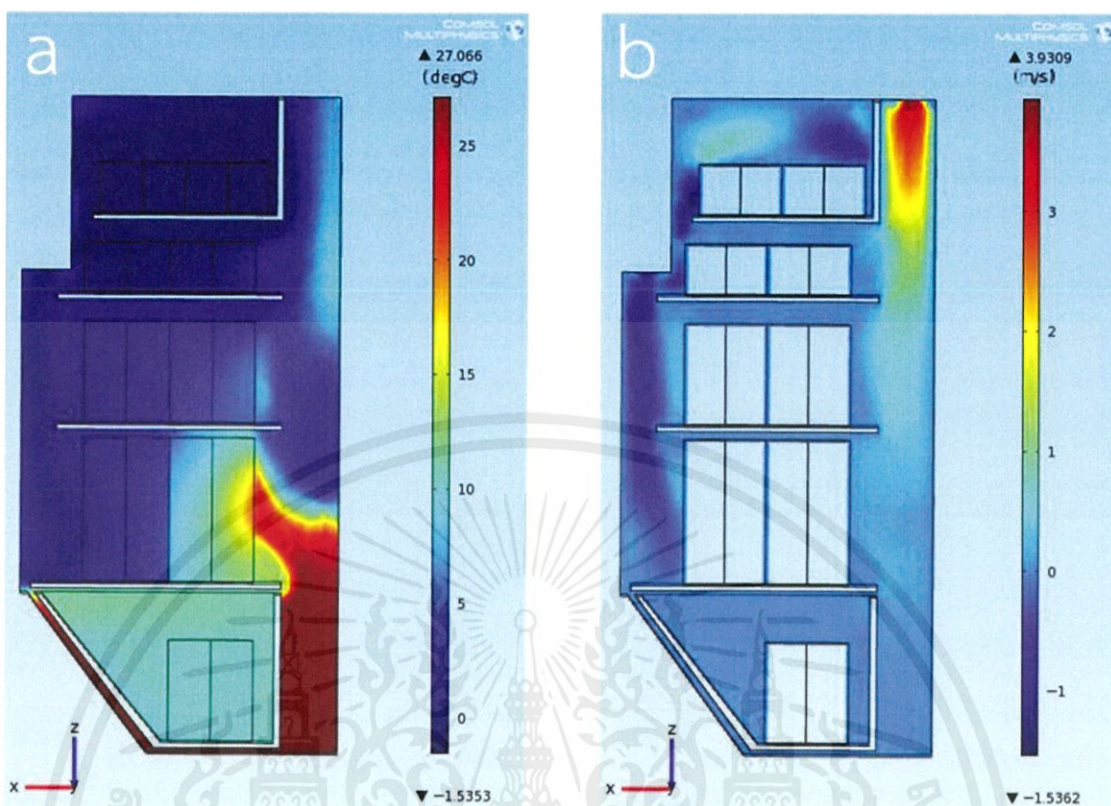
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



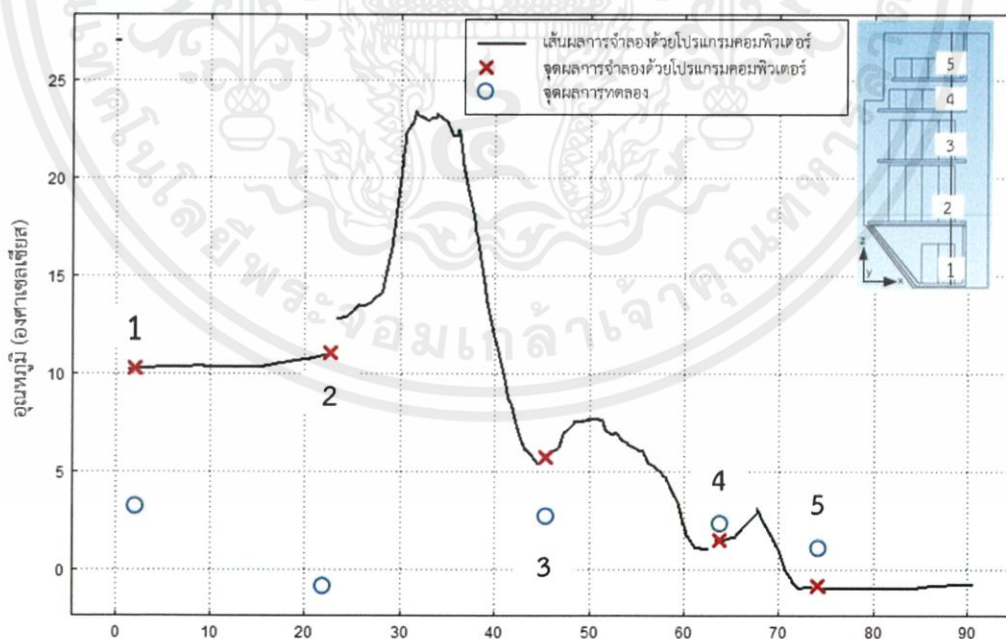
รูปที่ 5.13 ผลการเปรียบเทียบการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองของอุณหภูมิกายในช่องแช่เย็นของตู้เย็น บนระนาบสมมาตร ($x = 12$ cm. และ $y = 23.5$ cm.)

สำหรับกรณีตู้เย็นบรรจุหลอด การจำลองกำหนดให้มีขอบเขตของผนังด้านต่างๆ เช่นเดียวกับการจำลองตู้เย็นเปล่าและการไหลเวียนของอากาศเป็นแบบราบเรียบ การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ การคำนวณเป็นการคำนวณที่สภาวะสมดุล (stationary) และไหลตกกำหนดให้เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนในของแข็งและกำหนดให้หลอดมีคุณสมบัติทางความร้อนเช่นเดียวกับน้ำ ผลการจำลองดังรูปที่ 5.14(a) แสดงการกระจายอุณหภูมิกายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นกรณีบรรจุหลอด ในขณะที่รูปที่ 5.14(b) แสดงความเร็วการไหลเวียนของอากาศภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นในกรณีเดียวกัน จากการจำลองพบว่าผลการทำนายอุณหภูมิบริเวณชั้นวางล่างและช่องแช่ผักมากกว่าผลที่ได้จากการทดลอง ทั้งนี้อาจเกิดจากการคำนวณในบริเวณชั้นวางล่างได้ค่าความเร็วต่ำมาก ทำให้ผลจากการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังด้านหน้ามีผลมากกว่าการถ่ายเทอุณหภูมิกายจากช่องปล่อยอากาศเย็นด้านบนลงสู่ด้านล่าง นอกจากนี้อาจเป็นผลจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ อย่างไรก็ตามผลการจำลองบริเวณช่องแช่เนื้อจนถึงชั้นวางกลางมีค่าสอดคล้องกับผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบระหว่างระดับอุณหภูมิกายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นด้วยการจำลองและการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



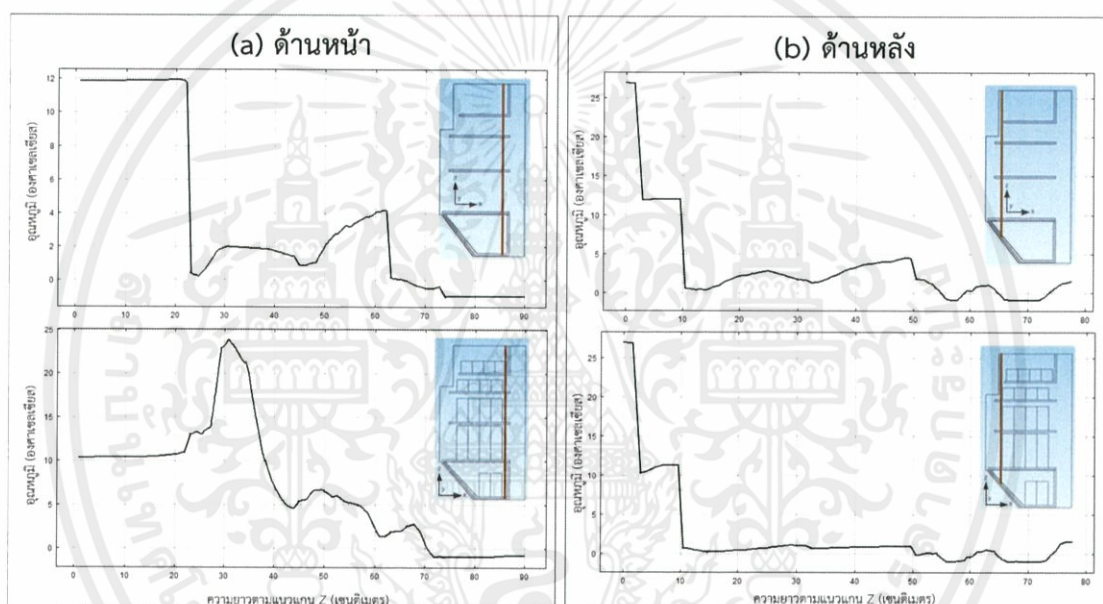
รูปที่ 5.14 (a) การกระจายอุณหภูมิ และ (b) ความเร็วในแนวแกน z ภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นกรณีบรรจุกะหล่ำปลีขนาดมาตรฐาน ($y = 23.5$ cm)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ความยาวตามแนวแกน Z (เซนติเมตร) มอนูญาตาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 5.15 ผลการเปรียบเทียบการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองของอุณหภูมิภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นกรณีบรรจุกะหล่ำปลีขนาดมาตรฐาน ($x = 12$ cm. และ $y = 23.5$ cm.)

จากรูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิบริเวณด้านหน้าและบริเวณด้านหลังภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นเปล้าและตู้เย็นบรรจุหลอดพบว่า ระดับอุณหภูมิบริเวณด้านหน้าของตู้เย็นเปล้าจะมีค่าน้อยกว่าตู้เย็นบรรจุหลอด ในขณะที่ระดับอุณหภูมิบริเวณด้านหลังของตู้เย็นเปล้าจะมีค่าสูงกว่าตู้เย็นบรรจุหลอด ซึ่งผลการจำลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในผลการทดลองตู้เย็นบรรจุหลอด กล่าวคือหลอดทำหน้าที่เปรียบเสมือนสิ่งกีดขวาง ทิศทางการไหลของอากาศซึ่งถูกปล่อยออกมาจากช่องปล่อยแนวแกน z ทำให้อากาศไม่สามารถไหลสู่บริเวณด้านหน้าได้อย่างสะดวกเหมือนกับกรณีตู้เย็นเปล้า ดังนั้นอากาศที่ถูกปล่อยออกมาส่วนใหญ่ จึงไหลลงสู่ด้านล่างตามช่องว่างระหว่างผนังด้านล่างกับชั้นวาง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ระดับอุณหภูมิบริเวณด้านหลังของตู้เย็นบรรจุหลอดมีค่าต่ำกว่า ในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิบริเวณด้านหน้าของตู้เย็นบรรจุหลอดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าด้านหลัง เนื่องจากอากาศไม่สามารถไหลมายังบริเวณด้านหน้าได้อย่างสะดวกเพราะหลอดทำหน้าที่เสมือนสิ่งกีดขวางการไหล



รูปที่ 5.16 ระดับอุณหภูมิจากผลการจำลองบริเวณด้านหน้าและด้านหลัง
($x = 33$ cm.; $y = 23.5$ cm.) ภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็นเปล้าและตู้เย็นบรรจุหลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ถังน้ำแข็ง

5.2.1 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่า (Unload ice box)

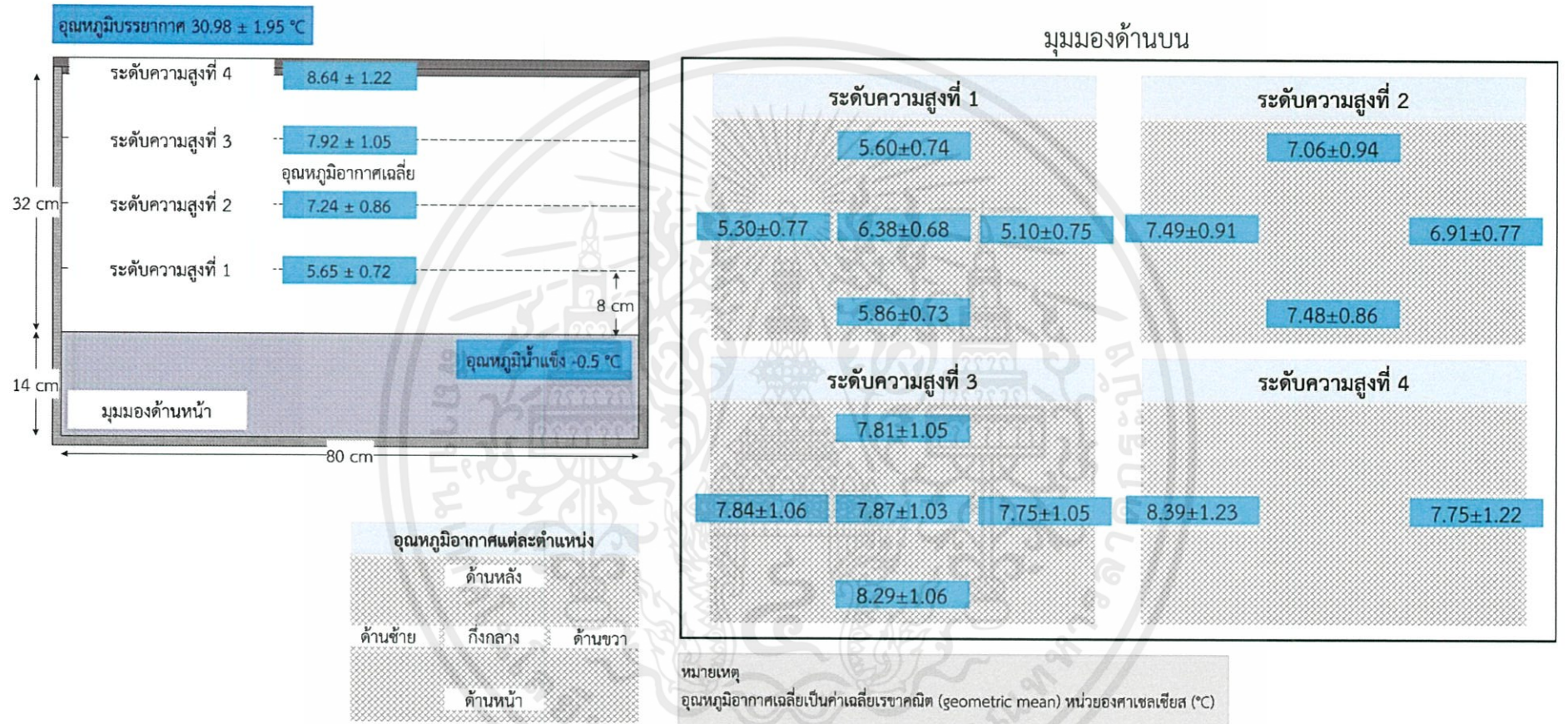
การทดลองจัดทำขึ้นเพื่อวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่า โดยใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ (Data logger iButton DS1921G) ช่วงการวัดอุณหภูมิเท่ากับ -30 ถึง +70 องศาเซลเซียสความแม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชั่วโมง บันทึกค่าทุกๆ 1 นาที โดยใช้น้ำแข็งบดเป็นแหล่งให้ความเย็นปริมาณ 55 ลิตร (ความสูงจากก้นถัง 14 เซนติเมตร)

จากการทฤษฎีพบว่าการถ่ายเทความร้อนภายในถังน้ำแข็งเป็นแบบการนำความร้อน (conductive heat transfer) เนื่องจากถังน้ำแข็งปิดฝาตลอดการทดลองทำให้อากาศภายในถังน้ำแข็งเปรียบเสมือนอยู่ในกล่องสี่เหลี่ยมพื้นผ้า โดยมีพื้นผิวด้านบนอุณหภูมิสูงกว่าพื้นผิวด้านล่าง (ผิวน้ำแข็ง) ดังนั้นอากาศบริเวณด้านล่างจะมีความหนาแน่นสูงกว่าบริเวณด้านบนส่งผลให้อากาศไม่มีการเคลื่อนที่ตามแรงโน้มถ่วงของโลกหรืออากาศหยุดนิ่ง (stagnant) ด้วยเหตุนี้ทำให้ระบบมีความเสถียร (stable) การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจึงเป็นแบบการนำความร้อน โดยถ่ายเทความร้อนจากบริเวณอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณอุณหภูมิต่ำกว่าจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium stage)

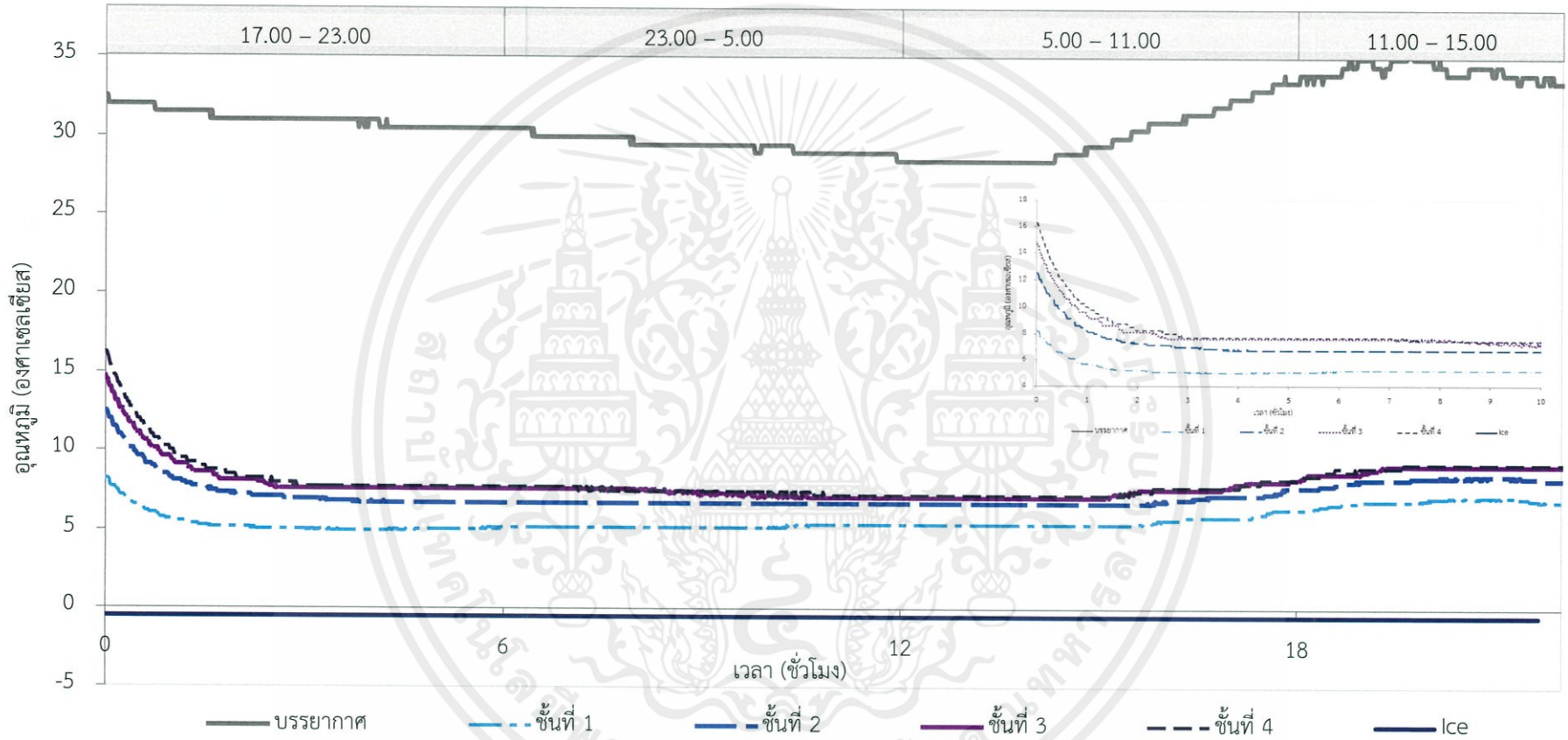
จากรูปที่ 5.17 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยที่ระดับความสูงจากผิวน้ำแข็ง 4 ระดับพร้อมแสดงอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของแต่ละระดับความสูงประกอบด้วยบริเวณด้านซ้าย ด้านขวา ด้านหน้าและด้านหลัง โดยระดับความสูงมีระดับละ 8 เซนติเมตรและระดับที่ 4 เป็นระดับสูงสุดขีดฝาดังน้ำแข็งพบว่า อุณหภูมิที่ระดับความสูงที่ 1 (ใกล้ผิวน้ำแข็งมากที่สุด) มีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับระดับความสูงอื่นๆ โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 5.65 องศาเซลเซียส (ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.72 องศาเซลเซียส และเมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิที่ระดับความสูงนั้นจะมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ โดยอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ระดับความสูงที่ 4 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.64 องศาเซลเซียส ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.22 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาตำแหน่งต่างๆ ในแต่ละระดับความสูงพบว่าที่ระดับเดียวกันมีอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิด้านหลังจะมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิบริเวณด้านหน้าเล็กน้อยในทุกๆระดับความสูง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการจัดวางถังน้ำแข็งคือ บริเวณด้านหน้าจะได้รับแสงแดดเต็มที่ดังนั้นพบว่าสถานที่จัดวางถังน้ำแข็งมีผลต่ออุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งและตารางที่ 5.3 แสดงระดับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในถังน้ำแข็งแต่ละชั้น

จากรูปที่ 5.18 แสดงการกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในถังน้ำแข็งเปล่าพบว่า อุณหภูมิถึงน้ำแข็งต้องใช้เวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมงเพื่อทำให้อุณหภูมิเข้าสู่สภาวะสมดุล และเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำแข็งลดลง อุณหภูมิสมดุลเฉลี่ยภายในถังน้ำแข็งจะมีค่าเพิ่มโดยช่วงอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่าเท่ากับ 0 – 8 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ภายในถังน้ำแข็งเปล่า



รูปที่ 5.18 การกระจายอุณหภูมิแต่ละชั้นภายในถังน้ำแข็งเปล่า

ตารางที่ 5.3 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่า

		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	บรรยากาศ	น้ำแข็ง	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4
อุณหภูมิเฉลี่ย	30.98	-0.50	5.65	7.24	7.92	8.07
SD	1.95	0.00	0.72	0.86	1.05	1.22
ค่าสูงสุด	35.50	-0.50	8.20	12.50	14.70	16.25
ค่าต่ำสุด	28.50	-0.50	5.00	6.75	7.13	7.25

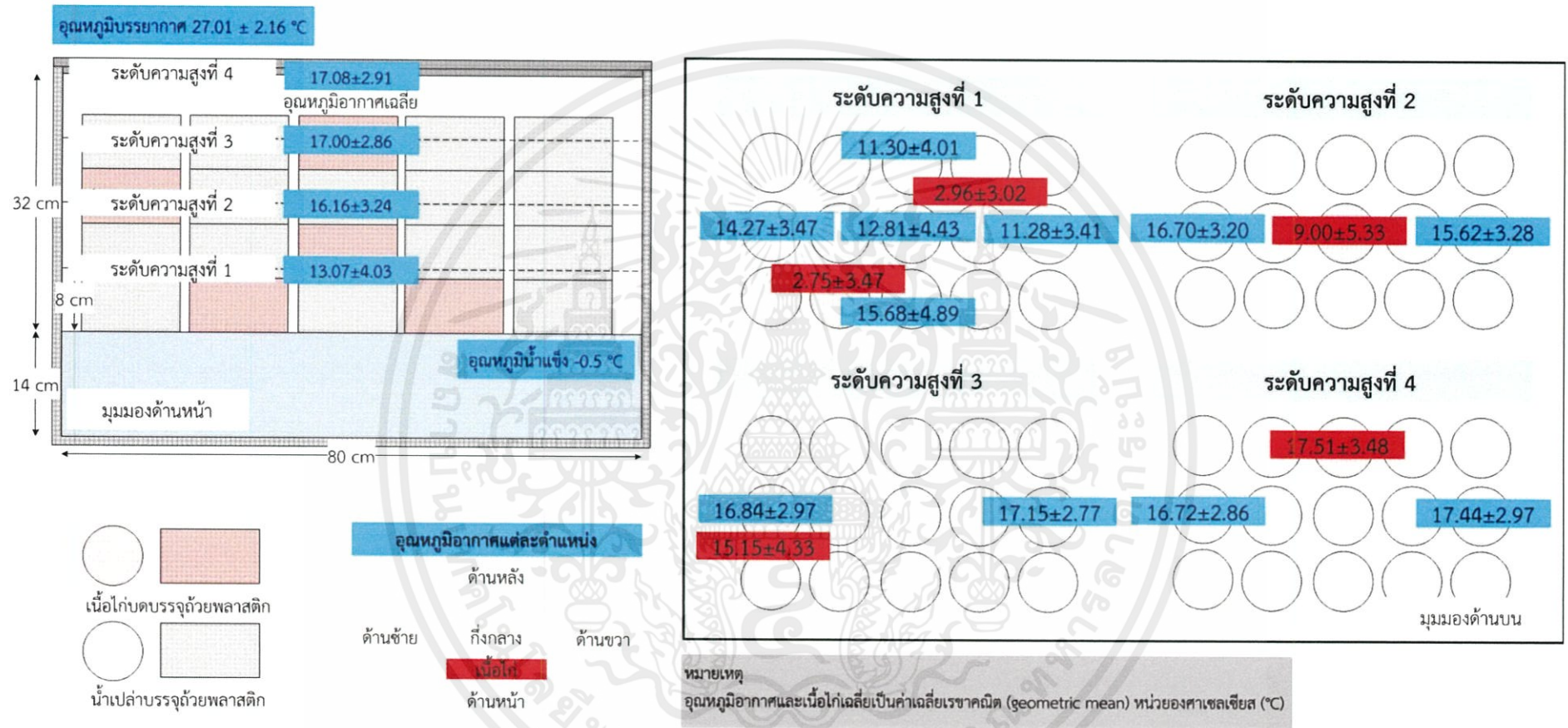
5.2.2 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุโหลด (Loaded ice box)

การทดลองจัดทำขึ้นเพื่อวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุโหลดประกอบด้วย เนื้อไก่บด (minced chicken) บรรจุด้วยพลาสติกขนาด 425 มิลลิลิตร จำนวน 5 ถ้วยพร้อมก้นน้ำบริสุทธิ์บรรจุถ้วยลักษณะเดียวกัน จำนวน 5 ถ้วย รวมปริมาตรบรรจุทั้งหมดของโหลดเท่ากับ 25.50 ลิตร สำหรับพลาสติกของถ้วยเป็นพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีน (polypropylene: PP) การวัดอุณหภูมิใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ (Data logger iButton DS1921G) ช่วงการวัดอุณหภูมิเท่ากับ -30 ถึง +70 องศาเซลเซียสความแม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชั่วโมง บันทึกค่าทุกๆ 1 นาที โดยใช้น้ำแข็งบดเป็นแหล่งให้ความเย็นปริมาณ 55 ลิตร (ความสูงจากก้นถึง 14 เซนติเมตร)

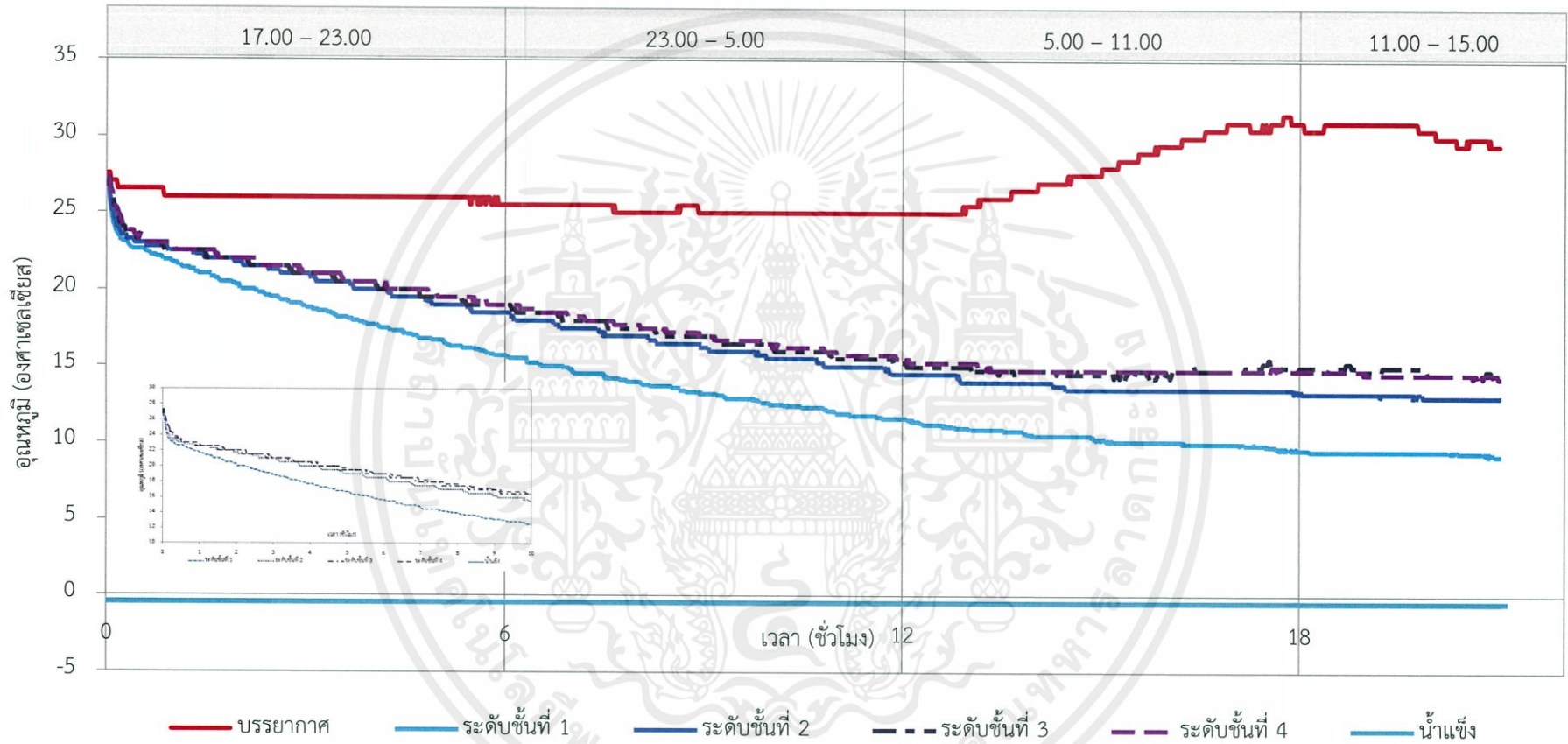
จากการทดลองพบว่าการถ่ายเทความร้อนภายในถังน้ำแข็งบรรจุโหลดเป็นแบบการนำความร้อนเช่นเดียวกับถังน้ำแข็งเปล่า แต่ถังน้ำแข็งบรรจุโหลดจะมีโหลดเป็นแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นนอกจากจะมีการนำความร้อนระหว่างพื้นผิวของน้ำแข็งกับผนังโดยรอบถังน้ำแข็งแล้วยังมีการนำความร้อนระหว่างผิวน้ำแข็งกับโหลดด้วย

จากรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยภายในถังน้ำแข็งกรณีบรรจุโหลดที่ระดับความสูงจากผิวน้ำแข็ง 4 ระดับพบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับกรณีถังน้ำแข็งเปล่า กล่าวคือ อุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็งจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากพื้นผิวน้ำแข็ง โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่ระดับความสูงที่ 1 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 13.07 องศาเซลเซียส (ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.03 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ระดับความสูงที่ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.08 องศาเซลเซียส ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.91 องศาเซลเซียส และจากรูปที่ 5.21 แสดงการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็งบรรจุโหลดพบว่า อุณหภูมิเข้าสู่อุณหภูมิสมดุลต้องใช้เวลามากกว่า 12 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากมีโหลดเป็นแหล่งความร้อนทำให้เข้าสู่สมดุลช้า โดยช่วงอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุโหลดเท่ากับ 0 – 17 องศาเซลเซียส ตารางที่ 5.4 แสดงระดับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในถังน้ำแข็งบรรจุโหลดแต่ละชั้นพร้อมอุณหภูมิโหลดเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 อุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิโพลิตแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลิต



รูปที่ 5.20 การกระจายอุณหภูมิแต่ละระดับความสูงภายในถึงน้ำแข็งบรรจุโหลสด

ตารางที่ 5.4 อุณหภูมิภายในถึงน้ำแข็งกรณีบรรจุไหลและอุณหภูมิเนื้อไก่ที่ระดับความสูง 4 ระดับ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)						
	บรรยากาศ	น้ำแข็ง	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4
อุณหภูมิเฉลี่ย	27.01	-0.50	13.07	16.16	17.00	17.08
SD	2.16	0.00	4.03	3.24	2.86	2.91
ค่าสูงสุด	31.50	-0.50	26.70	27.00	27.25	27.25
ค่าต่ำสุด	25.00	-0.50	9.20	13.00	14.25	14.25

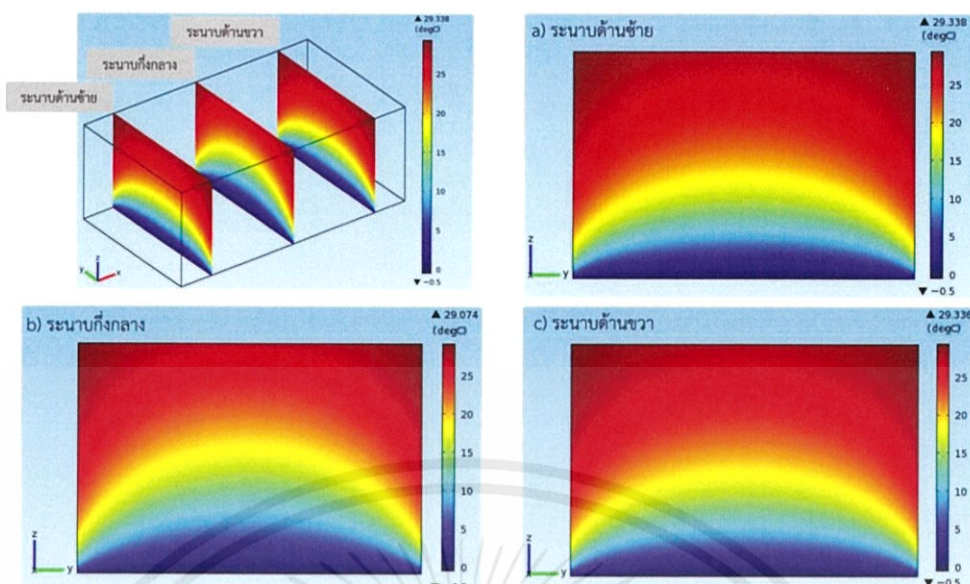
5.2.3 การจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในถึงน้ำแข็ง

การจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในถึงน้ำแข็งด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Comsol Multiphysics 4.1®) กำหนดให้การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการนำความร้อน (conductive heat transfer) การคำนวณเป็นการคำนวณภายใต้สภาวะสมดุล (stationary)

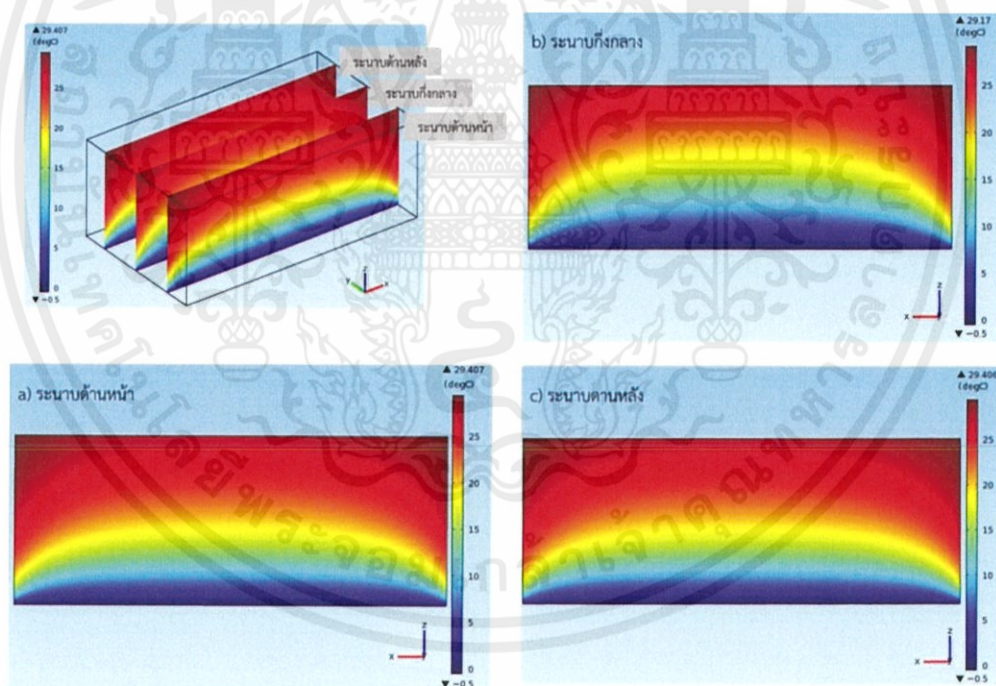
ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในถึงน้ำแข็งเปล่า ดังรูปที่ 5.21 แสดงการกระจายอุณหภูมิตามระนาบ y-z ที่ระยะ 10 40 และ 70 เซนติเมตรตามลำดับ และรูปที่ 5.22 แสดงการกระจายอุณหภูมิตามระนาบ x-z ที่ระยะ 9 24 และ 39 เซนติเมตรตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิภายในถึงน้ำแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระดับความสูง โดยอุณหภูมิด้านล่างจะน้อยกว่าอุณหภูมิด้านบน และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิด้านซ้าย ด้านขวาและกึ่งกลางพบว่าอุณหภูมิด้านกึ่งกลางจะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 5.23 แสดงอุณหภูมิภายในถึงน้ำแข็งแต่ละระดับความสูง โดยระดับความสูงที่ 1 หมายถึงอุณหภูมิกากาศที่ระดับสูงกว่าผิวน้ำแข็ง 8 เซนติเมตร และระดับความสูงที่ 1 2 3 และ 4 จะห่างกันระดับละ 8 เซนติเมตร

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดลองวัดอุณหภูมิภายในถึงน้ำแข็งเปล่าพบว่าผลไม่สอดคล้องกัน กล่าวคืออุณหภูมิที่ระดับความสูงต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมากแสดงดังรูปที่ 5.24 ผลการเปรียบเทียบการจำลองและการทดลองวัดอุณหภูมิภายในถึงน้ำแข็งเปล่า ดังนั้นจากผลการเปรียบเทียบนี้ทำให้ทราบว่า การถ่ายเทความร้อนภายในถึงน้ำแข็งอาจไม่ใช่การถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน เนื่องจากอากาศภายในถึงน้ำแข็งมีการไหลเนื่องจากแรงลอยตัวและแรงโน้มถ่วงของโลกและอาจมีอากาศรั่วไหลออกจากภายในถึงน้ำแข็ง อีกทั้งการคำนวณเป็นการคำนวณภายใต้สภาวะสมดุลซึ่งในทางปฏิบัติอากาศภายในถึงน้ำแข็งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากน้ำแข็งมีการละลายอยู่ตลอดเวลาเมื่อได้รับความร้อนจากภายนอกหรือสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

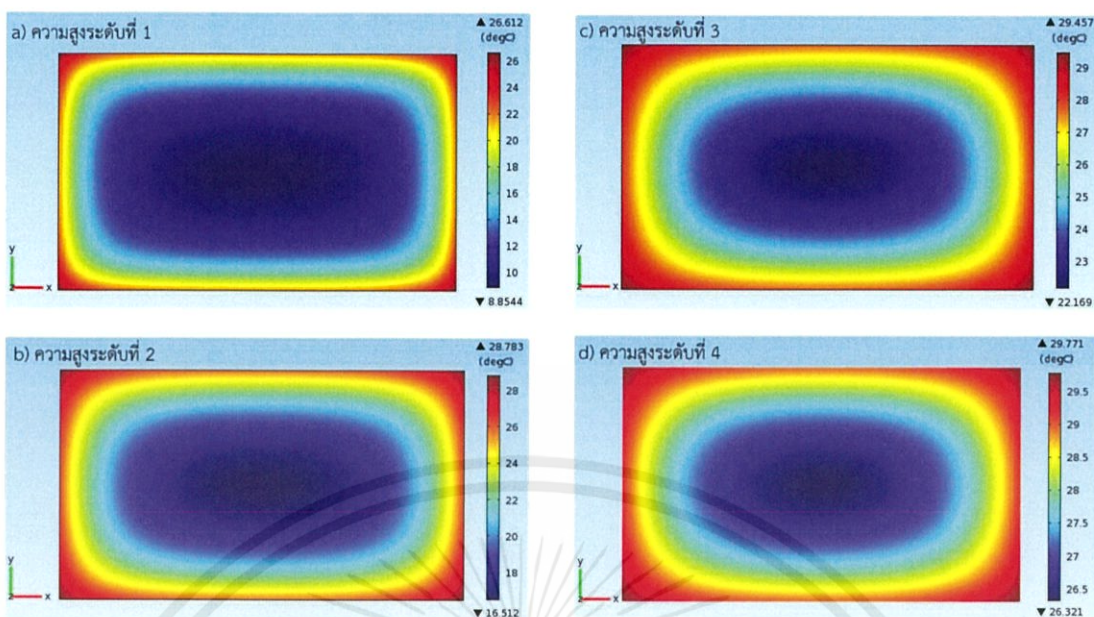


รูปที่ 5.21 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่าตามระนาบ y - z จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ระนาบด้านซ้าย ($x = 10$ cm) (b) ระนาบกึ่งกลาง ($x = 40$ cm) และ (c) ระนาบด้านขวา ($x = 70$ cm)

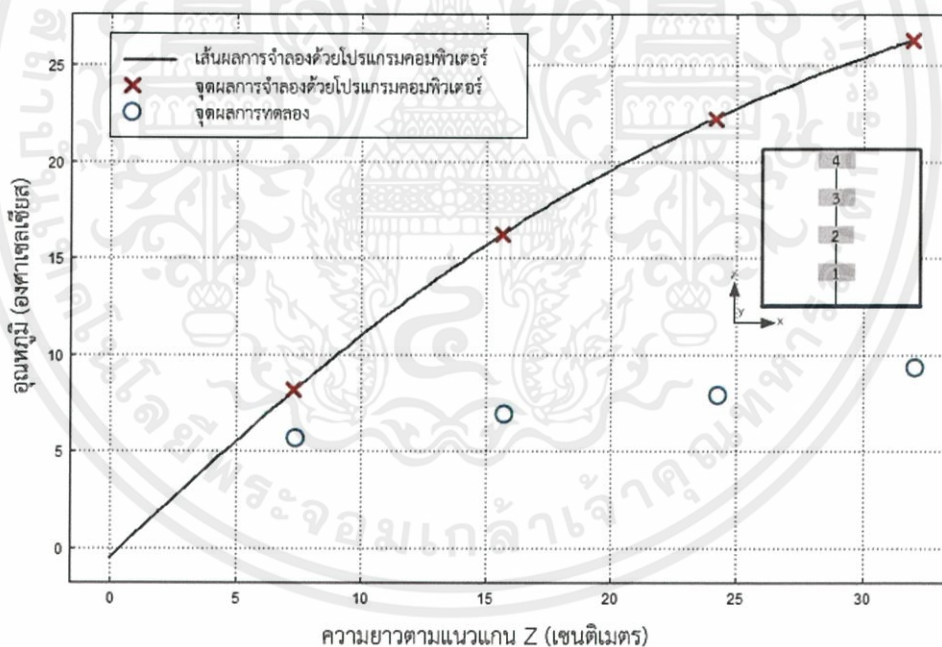


รูปที่ 5.22 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่าตามระนาบ x - z จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ระนาบด้านหน้า ($y = 9$ cm) (b) ระนาบกึ่งกลาง ($y = 24$ cm) และ (c) ระนาบด้านหลัง ($y = 39$ cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 การกระจายอุณหภูมิแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็งเปล่าจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 8 เซนติเมตร (b) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 16 เซนติเมตร (c) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 24 เซนติเมตร และ (d) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 32 เซนติเมตร



รูปที่ 5.24 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลองวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่า โดยอุณหภูมิการจำลองอ้างอิงที่ $x = 40$ cm และ $y = 24$ cm และอุณหภูมิการทดลองอ้างอิงจากอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็ง

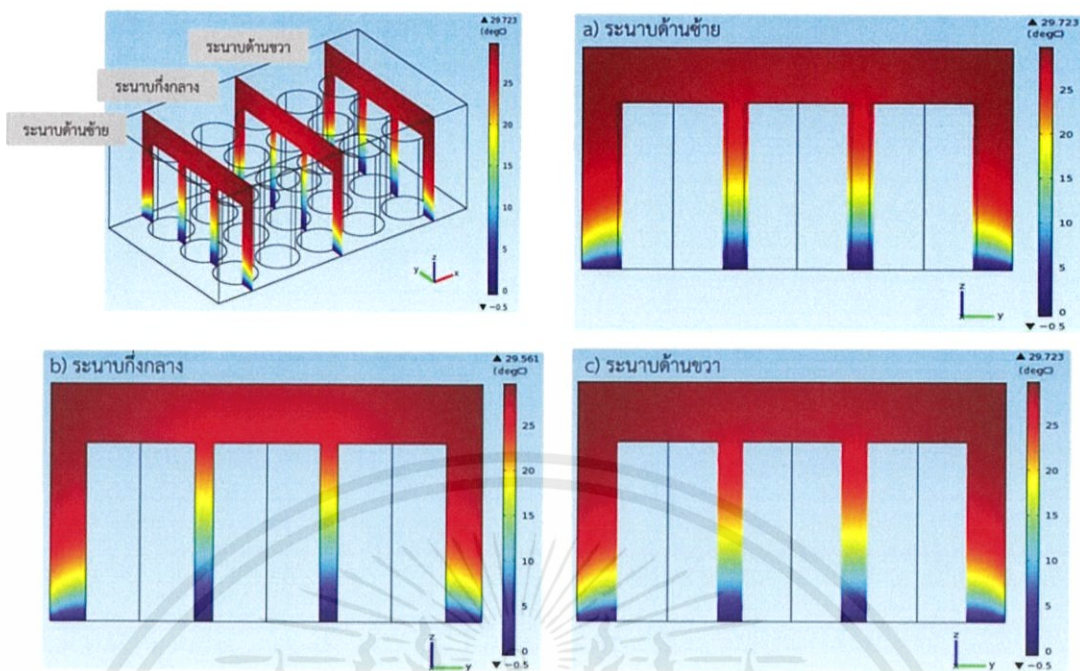
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลด์ การกำหนดขอบเขตกำหนด เช่นเดียวกับถังน้ำแข็งเปล่า โดยพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของอากาศภายในถังน้ำแข็งเป็นแบบ การนำความร้อนภายในของโพลด์ แต่สำหรับการจำลองระบบนี้ได้เพิ่มโพลด์เข้าสู่ระบบโดยโพลด์ พิจารณาให้คุณสมบัติทางความร้อนเป็นน้ำแลการถ่ายเทความร้อนภายในเป็นการถ่ายเทความร้อน ภายในของแข็งและการคำนวณกำหนดให้อยู่ภายในสภาวะสมดุล ผลการจำลอง ระบบแสดง ดังรูปที่ 5.25 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลด์ตามระนาบ y-z ที่ระยะ 10 40 และ 70 เซนติเมตร และรูปที่ 5.26 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลด์ตามระนาบ x-z ที่ระยะ 9 24 และ 39 เซนติเมตร พบว่าผลการจำลองภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลด์สอดคล้องกับการ จำลองภายในถังน้ำแข็งเปล่ากล่าวคือ ที่ระดับความสูงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งจะเพิ่มสูงขึ้น ด้วยซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 5.27 แสดงการกระจายอุณหภูมิแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็งบรรจุ โพลด์โดยระดับความสูงที่ 1 หมายถึงอุณหภูมิอากาศที่ระดับสูงกว่าผิวน้ำแข็ง 8 เซนติเมตรและระดับ ความสูงที่ 1 2 3 และ 4 จะห่างกันระดับละ 8 เซนติเมตร

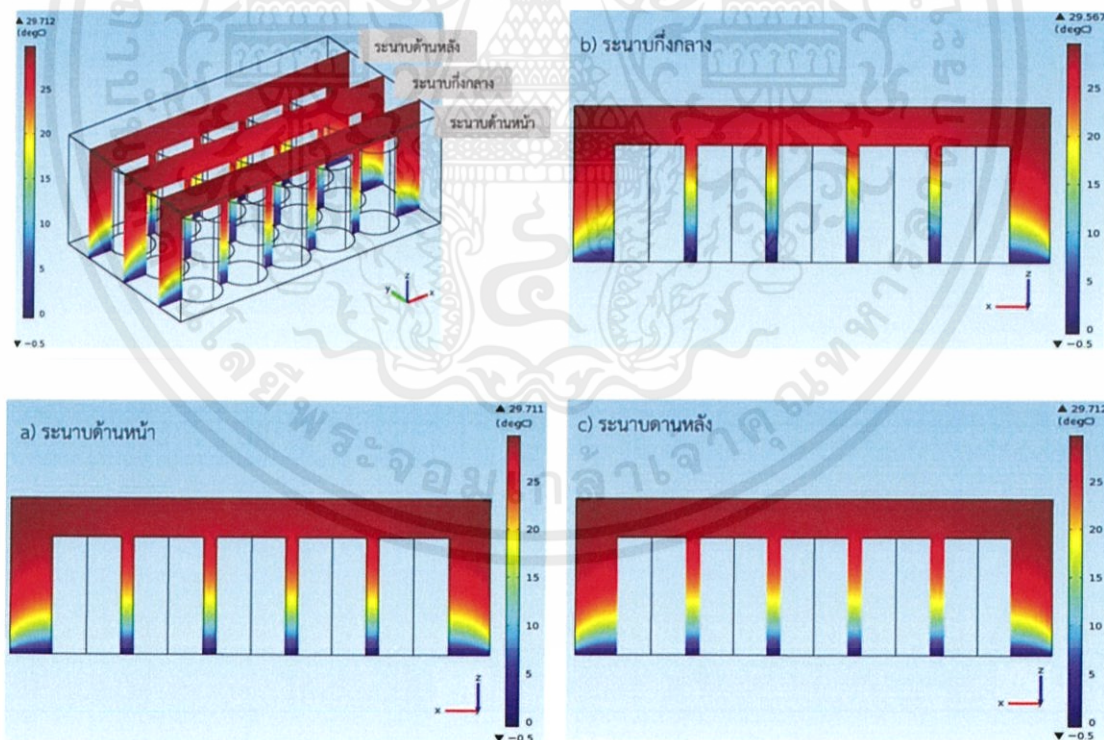
เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองการวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลด์ พบว่าไม่สอดคล้องกัน แสดงดังรูปที่ 5.28 กล่าวคืออุณหภูมิจากการจำลองมีค่ามากกว่าอุณหภูมิจาก การทดลอง (Over - estimate) ซึ่งสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับการเปรียบเทียบผล ระหว่างการจำลองและการทดลองวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งเปล่ากล่าวคือ การถ่ายเทความร้อน ภายในถังน้ำแข็งอาจไม่ใช่การนำความร้อน เนื่องจากอากาศภายในอาจมีการไหลเวียนด้วยแรงลอยตัว และแรงโน้มถ่วงของโลกและมีการรั่วไหลออกนอกระบบตามขอบของฝาถังน้ำแข็ง

สุดท้ายเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิจากผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในถังน้ำแข็ง เปล่าและถังน้ำแข็งบรรจุโพลด์พบว่า อุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลด์สูงกว่าอุณหภูมิภายใน ถังน้ำแข็งเปล่า ทั้งนี้เนื่องจากโพลด์ที่บรรจุอยู่ภายในถังน้ำแข็งทำหน้าที่เป็นแหล่งความร้อนอีก แหล่งหนึ่ง ทำให้ออกจากมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวน้ำแข็งกับโพลด์แล้วยังมีการถ่ายเท ความร้อนระหว่างอากาศกับโพลด์ด้วยจึงเป็นเหตุผลทำให้อากาศภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลด์มีค่า สูงกว่า

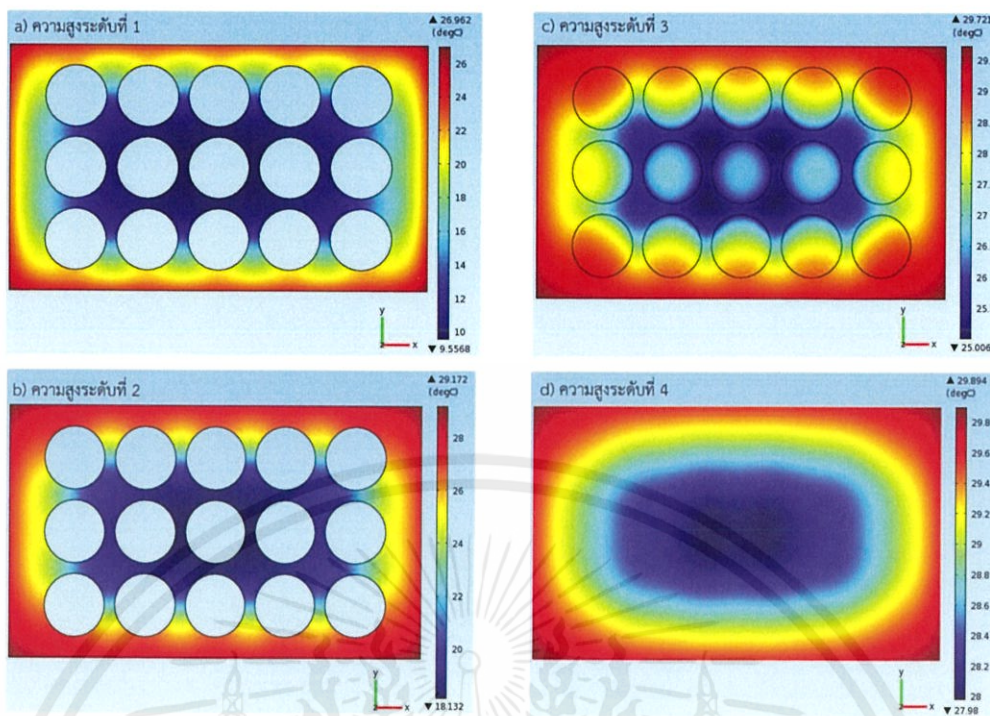
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



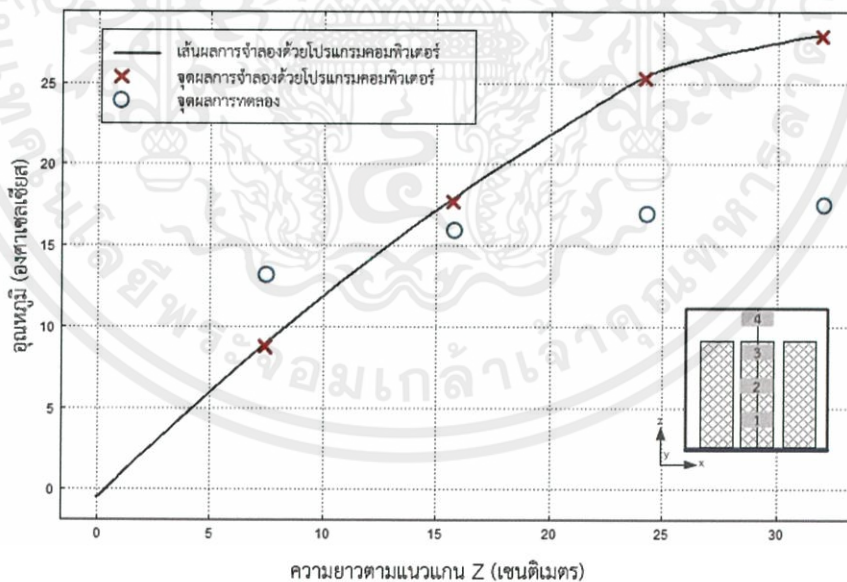
รูปที่ 5.25 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุหลอดตามระแนบ y-z จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ระแนบด้านซ้าย ($x = 10$ cm) (b) ระแนบกึ่งกลาง ($x = 40$ cm) และ (c) ระแนบด้านขวา ($x = 70$ cm)



รูปที่ 5.26 การกระจายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุหลอดตามระแนบ x-z จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ระแนบด้านหน้า ($y = 9$ cm) (b) ระแนบกึ่งกลาง ($y = 24$ cm) และ (c) ระแนบด้านหลัง ($y = 39$ cm)



รูปที่ 5.27 การกระจายอุณหภูมิแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลิต จากผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (a) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 8 เซนติเมตร (b) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 16 เซนติเมตร (c) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 24 เซนติเมตรและ (d) ห่างจากผิวน้ำแข็ง 32 เซนติเมตร



รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลองวัดอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งบรรจุโพลิต โดยอุณหภูมิการจำลองอ้างอิงที่ $x = 33$ cm และ $y = 24$ cm และอุณหภูมิการทดลองอ้างอิงจากอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละระดับความสูงภายในถังน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

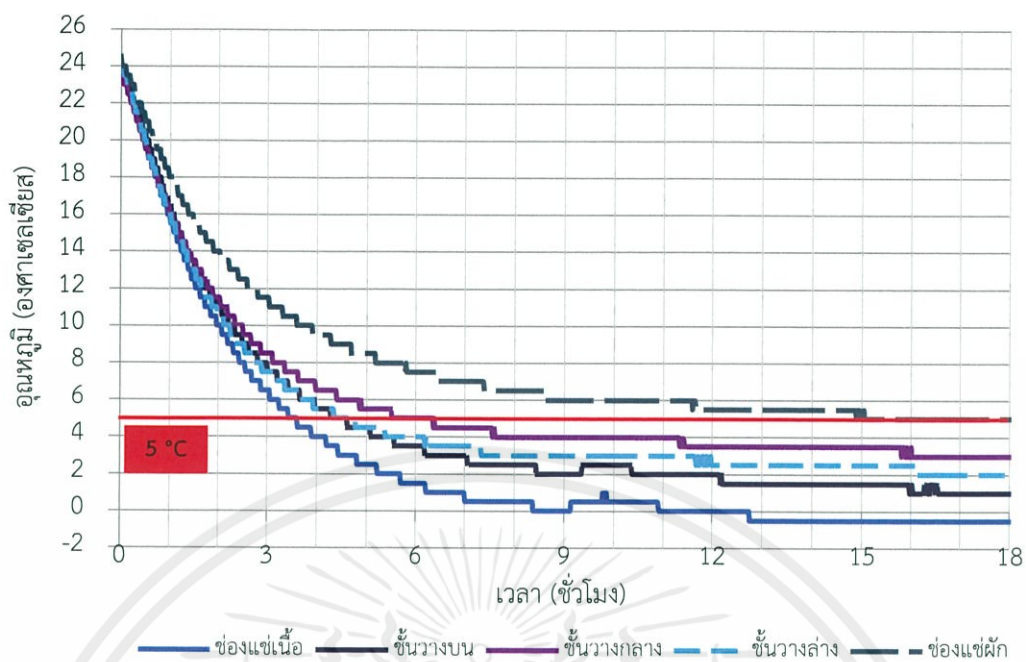
5.3 ความสามารถการเก็บรักษาอาหาร

การศึกษาเบื้องต้นได้รวบรวมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร ประกอบด้วย เนื้อวัว เนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อปลา กะหล่ำปลี แดงกวา พริกหวาน และผักสลัด โดยนำมาจัดใหม่ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์แบบง่ายระหว่างอายุการเก็บรักษา (ชั่วโมง) กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา (องศาเซลเซียส) แสดงในตารางที่ 4.12 (บทที่ 4) ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการถนอมอาหารระหว่างอุปกรณ์การเก็บรักษาความเย็นทั้งสองได้แก่ ตู้เย็นและถังน้ำแข็ง จึงเลือกเนื้อไก่เป็นตัวอย่างอาหารในนำเสนอ โดยพิจารณาข้อเปรียบเทียบดังนี้

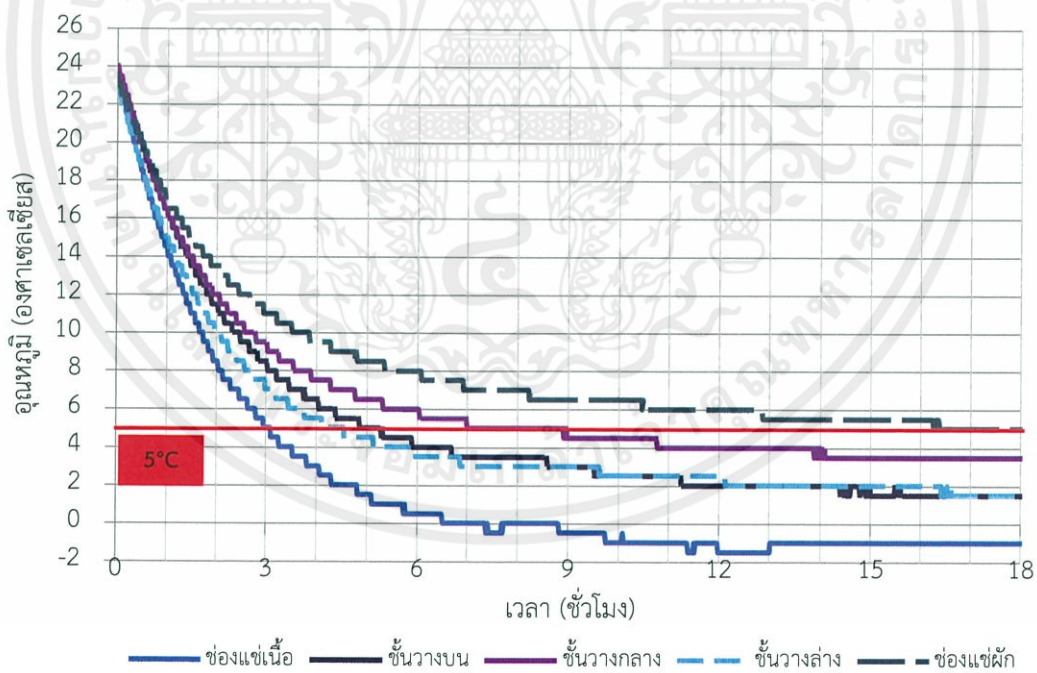
5.3.1 อัตราการลดลงของอุณหภูมิเนื้อไก่

สำหรับอุณหภูมิเนื้อไก่บดจากรูปที่ 5.29 5.30 และ 5.31 แสดงอัตราการลดอุณหภูมิของเนื้อไก่บดที่บริเวณชั้นต่างๆภายในช่องแช่เย็นของตู้เย็น ภายใต้การตั้งค่าอุณหภูมิ สูง - สูง กลาง - สูง และต่ำ - สูง ตามลำดับพบว่าเนื้อไก่บดต้องใช้เวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมงเพื่อให้เนื้อไก่บดมีอุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็น 5 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิแนะนำสำหรับเก็บรักษาอาหารประเภทเนื้อสัตว์ (Laguerre et al, 2002) โดยผลการทดลองใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Laguerre et al. (2004) ซึ่งได้ทำการทดลองและการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาเวลาที่ไส้กรอกใช้เพื่อลดอุณหภูมิจาก 20 องศาเซลเซียสเหลือ 5 องศาเซลเซียสภายใต้การเก็บรักษาภายในตู้เย็นชนิดหนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบนพบว่า ไส้กรอกต้องใช้เวลาอย่างน้อย 2.5 ชั่วโมง ดังนั้นช่วงเวลาระหว่างผลิตภัณฑ์อาหารกำลังลดอุณหภูมินี้ถือว่าการเพิ่มความเสถียรอันตรายทางชีวภาพส่งผลให้อายุการเก็บรักษาอาหารลดลง อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้สำหรับการลดอุณหภูมินี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการเก็บรักษาและการตั้งค่าระดับอุณหภูมิด้วยกล่าวคือเมื่อตั้งค่าระดับอุณหภูมิสูง - สูง การเก็บผลิตภัณฑ์ในช่องแช่เนื้อสัตว์จะใช้เวลาประมาณ 3.5 ชั่วโมง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ซึ่งเก็บในชั้นต่างๆและช่องแช่ผักต้องใช้เวลาประมาณ 4 - 6 ชั่วโมงและ 15 ชั่วโมง ตามลำดับเพื่อจะทำให้อุณหภูมิเนื้อไก่มีอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 5.5 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของเนื้อไก่บดในแต่ละตำแหน่งการเก็บรักษาพบว่า ช่องแช่เนื้อเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในกรณีที่ต้องการเก็บรักษาเป็นเวลานาน อย่างไรก็ตามกรณีที่ไม่ได้เก็บรักษาเป็นเวลานาน โดยเฉพาะกรณีของแผงค้าอาหารที่จะเก็บวัตถุดิบอาหารไว้สำหรับขายวันต่อวัน บริเวณชั้นวางแต่ละชั้นถือว่ามีอุณหภูมิเพียงพอในการเก็บรักษาอาหารให้ปลอดภัยเช่นกัน นอกจากนี้การเก็บรักษาในบริเวณชั้นวางอาจดีกว่าการเก็บในช่องแช่เนื้อด้วย เนื่องจากเนื้อสัมผัสของอาหารสดจะถูกทำลายด้วยความเย็นน้อยกว่า เช่น การเกิดผลึกน้ำแข็ง (ice crystal formation) เพราะอุณหภูมิต่ำมากจนเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

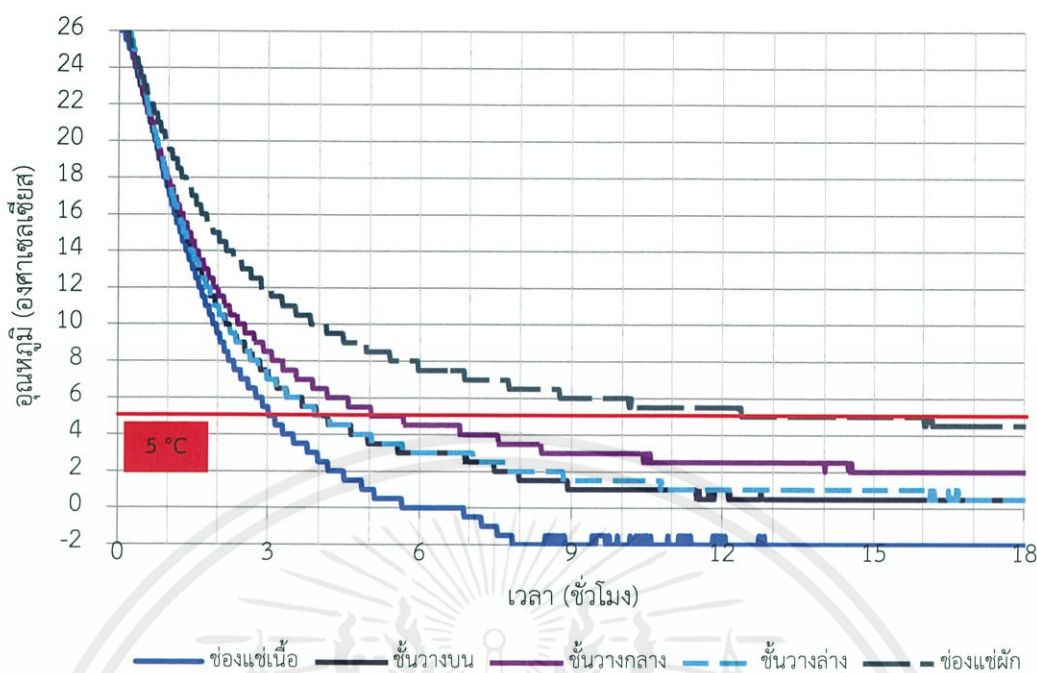


รูปที่ 5.29 อัตราการลดอุณหภูมิของเนื้อไก่บดที่ชั้นต่างๆ ภายในช่องแช่เย็น(ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: สูง - สูง)



รูปที่ 5.30 อัตราการลดอุณหภูมิของเนื้อไก่บดที่ชั้นต่างๆ ภายในช่องแช่เย็น(ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: กลาง- สูง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 อัตราการลดอุณหภูมิของเนื้อไก่บดที่ชั้นต่างๆ ภายในช่องแช่เย็น(ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ: ต่ำ-สูง)

ตารางที่ 5.5 อุณหภูมิเฉลี่ยเนื้อไก่บดที่เก็บในแต่ละชั้นของช่องแช่เย็น ภายใต้การทดลอง 3 สภาวะ

ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ (ช่องแช่แข็ง-ช่องแช่เย็น): high-high

	อุณหภูมิเนื้อไก่บด (องศาเซลเซียส)				
	ช่องแช่เนื้อ	ช่องแช่ผัก	ชั้นบน	ชั้นกลาง	ชั้นล่าง
อุณหภูมิเฉลี่ย	2.1	3.8	5.3	4.4	7.4
SD	5.0	4.7	4.0	4.3	4.1
ค่าสูงสุด	24.0	24.0	23.5	24.0	24.5
ค่าต่ำสุด	-0.5	1.0	3.0	2.0	4.5

ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ (ช่องแช่แข็ง-ช่องแช่เย็น): mid-high

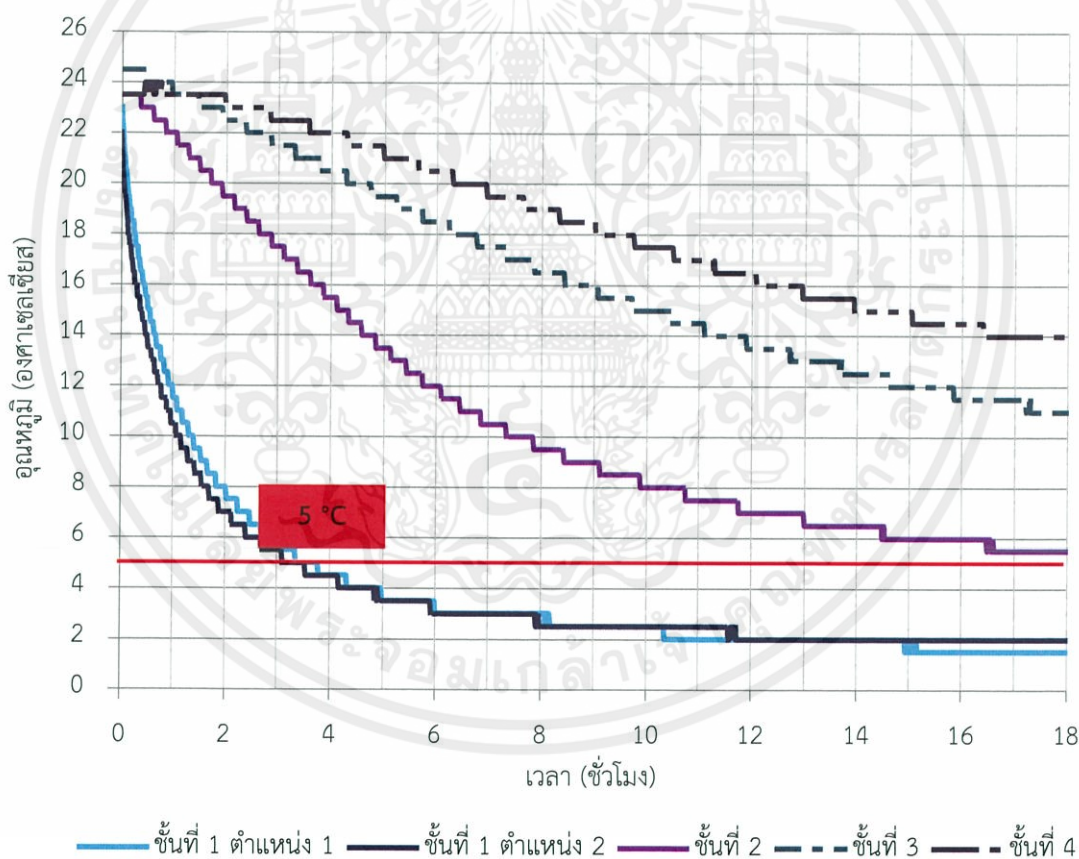
อุณหภูมิเฉลี่ย	1.24	4.19	5.69	3.91	7.45
SD	4.76	4.51	4.04	4.09	3.69
ค่าสูงสุด	23.00	24.00	24.00	23.00	23.50
ค่าต่ำสุด	-1.50	1.50	3.00	1.50	5.00

ระดับการตั้งค่าอุณหภูมิ (ช่องแช่แข็ง-ช่องแช่เย็น): low-high

อุณหภูมิเฉลี่ย	0.75	3.22	4.68	3.41	7.42
SD	5.88	5.28	4.93	5.25	4.65
ค่าสูงสุด	26.50	27.00	27.50	27.50	27.00
ค่าต่ำสุด	-2.00	0.50	2.00	0.50	4.50

เอกสารนี้เป็นเอกสาร SD งานไว้ 5.88 ับการใช้งาน 5.28 การศึกษาที่ 4.93 ไม่อนุญาต 5.25 ำไปใช้ประ 4.65 ด้ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้ง ค่าสูงสุด ั้งห้าม 26.50 ัดแปลงนี้ 27.00 ละต้องอ้าง 27.50 ้าของเอกสาร 27.50 ุคครั้งที่มิก 27.00 ำไปใช้

สำหรับเนื้อไก่บดซึ่งแช่ภายในถังน้ำแข็ง พิจารณาจากรูปที่ 5.32 แสดงอัตราการลดอุณหภูมิของเนื้อไก่บดภายในถังน้ำแข็งที่ระดับความสูงต่างๆพบว่า เนื้อไก่ชั้นที่ 1 (ติดผิวหนังน้ำแข็ง) ต้องใช้เวลาอย่างน้อยประมาณ 3.5 ชั่วโมงที่จะทำให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส ในขณะที่เนื้อไก่ชั้นที่ 2, 3 และ 4 ไม่สามารถทำให้เนื้อไก่ลดอุณหภูมิลงได้ถึง 5 องศาเซลเซียสและเนื่องจากบรรจุภัณฑ์ที่ใช้บรรจุเนื้อไก่บดมีความสูงเท่ากับ 6 เซนติเมตร ดังนั้นสรุปได้ว่าที่ระดับความสูงจากผิวหนังน้ำแข็งมากกว่า 6 เซนติเมตรขึ้นไป (เนื้อไก่บดชั้นที่ 2,3 และ 4) ไม่ควรเก็บรักษาอาหารประเภทเนื้อสัตว์หรืออาหารสดที่สามารถเสื่อมเสียได้ง่าย (perishable foods) แต่ในขณะที่การเก็บรักษาเนื้อไก่สดที่ชั้นที่ 1 หรือบริเวณที่ติดกับผิวหนังน้ำแข็งจะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิเนื้อไก่บดใกล้เคียงกับการเก็บรักษาภายในตู้เย็น ส่วนการเก็บเนื้อไก่บดที่ระดับชั้นที่ 2,3 และ 4 ไม่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษา เนื่องจากใช้เวลาในการลดอุณหภูมิให้เข้าถึงอุณหภูมิแนะนำมากเกินไป เพราะช่วงระหว่างการลดอุณหภูมิเป็นช่วงที่มีความเสี่ยงที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ ตารางที่ 5.6 สรุปอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศแต่ละชั้นภายในถังน้ำแข็งบรรจุโหลดและอุณหภูมิเฉลี่ยของโหลดที่ระดับชั้นต่างๆ



รูปที่ 5.32 อัตราการลดอุณหภูมิของเนื้อไก่บดที่ระดับความสูงต่างๆ ภายในถังน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 อุณหภูมิเฉลี่ยเนื้อไก่บดที่เก็บในแต่ละชั้นภายในถังน้ำแข็ง

อุณหภูมิเนื้อไก่บด (องศาเซลเซียส)					
	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4
อุณหภูมิเฉลี่ย	2.75	2.96	9.00	15.15	17.51
SD	3.47	3.02	5.33	4.33	3.48
ค่าสูงสุด	23.00	22.00	23.50	24.50	24.00
ค่าต่ำสุด	1.50	2.00	5.00	10.50	13.50

5.3.2 อายุการเก็บรักษาอาหาร

จากแบบจำลองความสัมพันธ์เพื่อทำนายอายุการเก็บรักษาอาหารประเภทต่างๆ เมื่อนำมาพิจารณาอายุการเก็บรักษาอาหารซึ่งจัดเก็บอยู่ภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้ง 2 ประเภทคือ ตู้เย็นและถังน้ำแข็ง โดยค่าอุณหภูมิที่แทนค่าลงในแบบจำลองความสัมพันธ์เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของเนื้อไก่บดที่จัดเก็บอยู่ในตำแหน่งนั้นๆของอุปกรณ์ ผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาอาหารแสดงดังตารางที่ 5.7 สำหรับการจัดเก็บในตู้เย็นภายใต้ 3 สภาวะการตั้งค่าอุณหภูมิ (สูง-สูง กลาง-สูง และต่ำ-สูง) และตารางที่ 5.8 สำหรับการจัดเก็บในถังน้ำแข็ง

เมื่อเปรียบเทียบอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่พบว่า การเก็บรักษาเนื้อไก่ในช่องแช่เนื้อของตู้เย็นสามารถเก็บรักษาเนื้อไก่ได้นานกว่าการเก็บในถังน้ำแข็งเนื้อไก่ที่เก็บอยู่ในช่องแช่เนื้อของตู้เย็นมีอายุการเก็บรักษาเฉลี่ย 282.2 ชั่วโมง ส่วนเนื้อไก่ที่เก็บอยู่ในถังน้ำแข็งในตำแหน่งสัมผัสกับน้ำแข็ง มีอายุการเก็บรักษาเฉลี่ย 187.9 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการเก็บเนื้อไก่ภายในตู้เย็นที่ตำแหน่งอื่นๆ พบว่ามีอายุการเก็บรักษาน้อยกว่าการเก็บรักษาเนื้อไก่ในตำแหน่งสัมผัสกับพื้นผิวน้ำแข็งภายในถังน้ำแข็งในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบการเก็บรักษาอาหารที่ตำแหน่งอื่นๆภายในตู้เย็น จะได้ค่าอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่ที่นานกว่าการเก็บรักษาภายในถังน้ำแข็งและในตำแหน่งที่ไม่สัมผัสกับน้ำแข็งในทุกกรณี

กรณีถังน้ำแข็งถึงแม้ว่าอายุการเก็บรักษาที่บริเวณสัมผัสผิวน้ำแข็งโดยตรงจะมีค่ามากกว่าอายุการเก็บรักษาภายในตู้เย็นตำแหน่งอื่นๆ (ยกเว้นช่องแช่เนื้อ) จำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยด้านความบริสุทธิ์และความสะอาดของน้ำแข็งที่ใช้เป็นแหล่งให้ความเย็นภายในถังน้ำแข็งเป็นประเด็นสำคัญด้วย จากงานวิจัย (Chavasit et al., 2011) พบว่ากระบวนการผลิตน้ำแข็งของประเทศไทยมีมาตรฐานค่อนข้างต่ำและจากผลการสำรวจของกระทรวงสาธารณสุขพบว่า น้ำแข็งอย่างน้อย 67% ของการสำรวจทั้งหมดปนเปื้อนเชื้อ *E. coli* และคอลิฟอร์ม ดังนั้นการเก็บรักษาอาหารภายในถังน้ำแข็งอาหารที่เก็บรักษาด้วยน้ำแข็งต้องไม่สัมผัสกับน้ำแข็งโดยตรง ควรบรรจุอยู่ในภาชนะที่สะอาดก่อนเพื่อป้องกันอาหารปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์จากน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 อายุการเก็บรักษาอาหารภายในตู้เย็นตำแหน่งต่างๆ โดยการประมาณจากแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างอายุการเก็บรักษาอาหารกับอุณหภูมิ

ตู้เย็น(การตั้งค่าช่องแช่แข็ง high ช่องแช่เย็น high): ช่วงอุณหภูมิตั้งค่า -1.25 ถึง 4.75 องศาเซลเซียส***					
ตำแหน่ง	ช่องแช่เนื้อ	ชั้นวางบน	ชั้นวางกลาง	ชั้นวางล่าง	ช่องแช่ผัก
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย	1.54	2.69	2.55	0.74	3.31
อุณหภูมิไหลต*	2.14	3.77	5.30	4.39	7.38
ระยะเวลาลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิไหลต (ชั่วโมง)	5	5	5	5	7
อายุการเก็บรักษา(ชั่วโมง)					
เนื้อวัว	85.5**	73.1	63.1	68.9	51.7
เนื้อหมู	252.9**	146.7**	105.7	126.7	76.9
เนื้อไก่	225.3	152.2	113.3	133.9	82.8
เนื้อปลา	153.0	102.3	75.1	89.8	51.8
กะหล่ำปลี	210.9	169.3	137.7	155.7	104.0
แตงกวา	191.9	164.9	143.1	155.7	117.9
พริกหวาน	369.9	245.7	167.3	210.3	99.3
ผักสลัด	276.0**	215.8**	171.3	196.5	125.1
ตู้เย็น(การตั้งค่าช่องแช่แข็ง mid ช่องแช่เย็น high): ช่วงอุณหภูมิตั้งค่า -1.75 ถึง 3.75 องศาเซลเซียส					
ตำแหน่ง	ช่องแช่เนื้อ	ชั้นวางบน	ชั้นวางกลาง	ชั้นวางล่าง	ช่องแช่ผัก
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย	1.00	2.85	2.50	0.72	3.68
อุณหภูมิไหลต*	1.24	4.19	5.69	3.91	7.45
ระยะเวลาลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิไหลต (ชั่วโมง)	5	6	6	5	7
อายุการเก็บรักษา(ชั่วโมง)					
เนื้อวัว	93.2**	70.2	60.8	72.1	51.3
เนื้อหมู	427.5**	132.5	98.7	141.6**	76.2
เนื้อไก่	288.6	139.4	106.2	147.7	82.0
เนื้อปลา	200.4	93.5	69.8	99.2	51.2
กะหล่ำปลี	238.2**	159.9	130.6	166.1	103.0
แตงกวา	208.7**	158.6	138.0	162.8	117.1
พริกหวาน	463.6**	221.1	151.7	237.2	97.6
ผักสลัด	316.2**	202.5	161.5	211.3**	123.8

* อุณหภูมิไหลตพิจารณาจากอุณหภูมิเฉลี่ยของเนื้อไก่บดซึ่งเก็บอยู่ในตู้เย็นเป็นเวลา 22 ชั่วโมง

** อุณหภูมิน้อยกว่าหรือมากกว่าขอบเขตการคำนวณของแบบจำลองความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 (ต่อ)อายุการเก็บรักษาอาหารภายในตู้เย็นตำแหน่งต่างๆ โดยการประมาณจากแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างอายุการเก็บรักษาอาหารกับอุณหภูมิ

ตู้เย็น(การตั้งค่าช่องแช่แข็ง low ช่องแช่เย็น high): ช่วงอุณหภูมิตั้งค่า -2.00 ถึง 3.75 องศาเซลเซียส					
ตำแหน่ง	ช่องแช่เนื้อ	ชั้นวางบน	ชั้นวางกลาง	ชั้นวางล่าง	ช่องแช่ผัก
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย	1.00	2.85	2.50	0.72	3.68
อุณหภูมิไหลต*	0.75	3.22	4.68	3.41	7.42
ระยะเวลาลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิไหลต (ชั่วโมง)	5	5	5	5	7
อายุการเก็บรักษา(ชั่วโมง)					
เนื้อวัว	97.7**	77.1	67.0	75.7	51.5
เนื้อหมู	693.5**	170.7**	119.1	161.6**	76.5
เนื้อไก่	332.6	172.2	126.7	164.8	82.3
เนื้อปลา	235.7	115.9	84.7	110.9	51.5
กะหล่ำปลี	254.5**	182.3	149.7	177.7	103.4
แตงกวา	218.4**	173.6	151.6	170.6	117.5
พริกหวาน	524.3**	282.1	195.5	268.9	98.3
ผักสลัด	340.5**	234.5**	188.1	227.9**	124.4

* อุณหภูมิไหลตพิจารณาจากอุณหภูมิเฉลี่ยของเนื้อไก่บดซึ่งเก็บอยู่ในตู้เย็นเป็นเวลา 22 ชั่วโมง

** อุณหภูมิน้อยกว่าหรือมากกว่าขอบเขตการคำนวณของแบบจำลองความสัมพันธ์

***อุณหภูมิอ้างอิงจากค่าสูงสุดและต่ำสุดภายในช่องแช่เนื้อของตู้เย็นเปล่า

ตารางที่ 5.8 อายุการเก็บรักษาอาหารภายในถ้ำน้ำแข็งตำแหน่งต่างๆ โดยการประมาณจากแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างอายุการเก็บรักษาอาหารกับอุณหภูมิ

ตำแหน่ง	ระดับ 1***		ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย	13.07		16.16	17.00	17.08
อุณหภูมิไหลต*	2.75	2.96	9.00	15.15	17.51
ระยะเวลาลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิไหลต (ชั่วโมง)	6	6	9	10	11
อายุการเก็บรักษา(ชั่วโมง)					
เนื้อวัว	80.6	79.0	44.2	24.5	19.5
เนื้อหมู	198.7**	185.1**	63.5	38.5**	33.5**
เนื้อไก่	192.7	183.1	66.8	31.3	26.6
เนื้อปลา	130.0	123.4	40.3	20.5**	53.9**
กะหล่ำปลี	194.3	188.8	83.6	36.4**	26.5**
แตงกวา	181.3	177.8	101.4	57.2**	46.0**
พริกหวาน	317.4	301.1	66.1	14.1**	7.8**
ผักสลัด	251.7**	243.9**	98.0	38.7**	27.1**

* อุณหภูมิไหลตพิจารณาจากอุณหภูมิเฉลี่ยของเนื้อไก่บดซึ่งเก็บอยู่ในตู้เย็นเป็นเวลา 22 ชั่วโมง

** อุณหภูมิน้อยกว่าหรือมากกว่าขอบเขตการคำนวณของแบบจำลองความสัมพันธ์

*** ระดับความสูงระดับละ 8 เซนติเมตร (นับจากผิวหน้าแข็ง)

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการกระจายอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นของแผงค้ำอาหาร ตู้เย็นและถังน้ำแข็ง พบว่า อุณหภูมิภายในอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้งสองประเภท มีการกระจายอุณหภูมิต่างกันขึ้นกับระดับตำแหน่งภายในอุปกรณ์ สำหรับตู้เย็นและถังน้ำแข็งพบว่า ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ที่ช่องแช่เนื้อและบริเวณพื้นผิวสัมผัสน้ำแข็ง ส่วนตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ช่องแช่ผักและตำแหน่งที่ห่างจากพื้นผิวน้ำแข็งมากที่สุด

ผลการทำนายอุณหภูมิภายในตู้เย็นส่วนใหญ่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองโดยมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในตู้เย็นเป็นแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ในขณะที่ผลจากการทำนายอุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งกับผลที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นไปได้ว่าการกำหนดลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในถังน้ำแข็งไม่ใช่เป็นการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว

การวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Comsol Multiphysics 4.1 ® สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำนายและจำลองการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตู้เย็นและถังน้ำแข็ง แต่อย่างไรก็ตามการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้จำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีเป็นสำคัญ เพื่อสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการคำนวณได้อย่างถูกต้อง

ในด้านความสามารถการเก็บรักษาอาหารของอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้งสองประเภทพบว่า ตู้เย็นมีความสามารถในการถนอมอาหารได้ดีกว่าถังน้ำแข็งโดยพิจารณาจากเกณฑ์อัตราการลดลงของอุณหภูมิอาหารโดยการเก็บรักษาอาหารในช่องแช่เนื้อของตู้เย็นสามารถเก็บอาหารได้นานกว่าการเก็บในลักษณะสัมผัสกับน้ำแข็งภายในถังน้ำแข็งและการเก็บรักษาอาหารในถังน้ำแข็งไม่ควรวางห่างจากผิวน้ำแข็งเกินกว่า 6 เซนติเมตร นอกจากนี้ความบริสุทธิ์ ความสะอาด การบรรจุและปริมาณน้ำแข็งที่ใช้เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเพื่อให้เก็บรักษาอาหารได้อย่างปลอดภัยตามเกณฑ์สุขลักษณะ

สุดท้ายจากการศึกษาของโครงการนี้พบว่า เมื่อพิจารณาต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ตู้เย็นมีต้นทุนต่อปีถูกกว่าถังน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรกฎ ไยบัวเทศ, วัชระ ทองงอก, และคมกฤต เล็กสกุล. (2549). เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม Engineering Economy. กรุงเทพฯ: ท้อป
- คันธารรัตน์ ชาทองยศ, จิตตราพร ไชยชนะ, และธีรพล ไพโรพยอม. (2554). การออกแบบแผงลอยจำหน่ายอาหารอย่างถูกสุขลักษณะ Design of hygienic food stall. ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- บัญญัติ บุญญา. (2546). ความปลอดภัยของอาหาร. กรุงเทพฯ: สยามศิลป์การพิมพ์
- บุหลัน พิทักษ์ผล. (2555). การถนอมอาหารโดยใช้ความเย็น. วันที่ค้นข้อมูล 21 มีนาคม 2556, จากโครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว
เว็บไซต์: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/New/sub/book/book.php?book=19&chap=3&page=t19-3-infodetail07.html>
- พงษ์เจต พรหมวงศ์. (2534). การถ่ายเทความร้อน Heat Transfer. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- สุธิกานต์ วงษ์เสถียร. (2548). เครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศ (ภาคทฤษฎี). กรุงเทพฯ: พีเอ็น เค แอนด์ สกายพริ้นติ้ง
- สุমনทนา วัฒนสินธุ์. (2549). ตำราจุลชีววิทยาทางอาหาร Food microbiology. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: จามจุรีโปรดักท์
- สำนักส่งเสริมและพัฒนาธุรกิจ. (2552). ธุรกิจร้านอาหาร/ภัตตาคาร. วันที่ค้นข้อมูล 4 สิงหาคม 2555, จากกรมพัฒนาธุรกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์ เว็บไซต์ <http://www.dbd.go.th/main/site/index.php?id=705>
- Amara, S.B., Laguerre, O., & Flick, D. (2004). Experimental study of convective heat transfer during cooling with low air velocity in a stack of objects. *International Journal of Thermal Sciences*, 43, 1213-1221
- Australia New Zealand Food Authority, ANZFA. (2002). Temperature control of potentially hazardous foods. Guideline of Standard 3.2.2 Food safety practices and general requirements. Retrieved August 29th, 2012 from <http://www.foodstandards.gov.au/scienceandeducation>
- Blank, L. and Tarquin, A. (2012). *Engineering economy*. (7th ed.). Singapore: McGraw-Hill
- Chavasit, V., Sirilaksanamanon, K., Phithaksantayothin, P., Norapoompipat, Y. and Parinyasiri, T. (2011). Measures for controlling safety of crushed ice and tube ice in developing country. *Food Control*, 22, 118 – 123
- Dalgaard, P. (1995). Modelling of microbial activity and prediction of shelf life for packed fresh fish. *International Journal of Food Microbiology*, 26, 305-317
- Dominguez, S. and Schaffner, D. W. (2007). Development and validation of a mathematical model to describe the growth of *Pseudomonas* spp. in raw

- poultry stored under aerobic conditions. *International Journal of Food Microbiology*, 120, 287 – 295
- Food Network Solution. (n.d.). *Food Wiki*. Retrieved August 4, 2012 from <http://www.foodnetworksolution.com>
- Gupta, J.K., Gopal, M. R. and Chakraborty, S. (2007). **Modeling of a domestic frost-free refrigerator**. *International Journal of Refrigeration*, 30, 311 - 322
- Garcia-Gimeno, R.M. and Zurera-Cosano, G. (1997). **Determination of ready-to-eat vegetable salad shelf-life**. *International Journal of Food Microbiology*, 36, 31 - 38
- Hough, G., Garitta, L. and Gomez, G. (2006). **Sensory shelf-life predictions by survival analysis accelerated storage models**. *Food Quality and Preference*, 17, 468 - 473
- Incropera, Frank P., & David P. D. (2007). **Fundamental Heat and Mass Transfer**. (6th ed.). Singapore: John Wiley & Sons
- James, S.J., Evans, J. & James, C. (2008). **A review of the performance of domestic refrigerators**. *Journal of Food Engineering*, 87, 2 – 10
- Jackson, V., Blair I.S., McDowell D.A., Kennedy J., and Bolton D.J. (2007). **The incidence of significant foodborne pathogens in domestic refrigerators**. *Food Control*, 18, 346–351
- Jacxsens, L., Devlieghere, F. and Debevere, J. (2002). **Temperature dependence of shelf-life as affected by microbial proliferation and sensory quality of equilibrium modified atmosphere packaged fresh produce**. *Postharvest Biology and Technology*, 26, 59 - 73
- Jarfelt, U. & Ramnas O. (2006). **Thermal conductivity of polyurethane foam - best performance**. *10th International Symposium on District Heating and Cooling*, Sweden, 2-6 September 2006, 1-11
- Laguerre, O., Derens, E., & Palagos, B. (2002). **Study of domestic refrigerator temperature and analysis of factors affecting temperature a French survey**. *International Journal of Refrigeration*, 25, 653–659
- Laguerre, O. and Flick, D. (2004). **Heat transfer by natural convection in domestic refrigerators**. *Journal of Food Engineering*, 62, 79–88
- Laguerre, O., Amara, S.B., & Flick, D. (2005). **Experimental study of heat transfer by natural convection in a closed cavity application in a domestic refrigerator**. *Journal of Food Engineering*, 70, 523–537
- Laguerre, O., Amara, S.B., Moureh, J., & Flick, D. (2007). **Numerical simulation of air flow and heat transfer in domestic refrigerators**. *Journal of Food Engineering*, 81, 144–156

- Laguerre, O., Benamara, S., & Flick, D. (2009). Numerical simulation of simultaneous heat and moisture transfer in a domestic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 33, 1425-1433
- Laguerre, O. and Flick, D. (2010). Temperature prediction in domestic refrigerators Deterministic and stochastic approaches. *International Journal of Refrigeration*, 33, 41-51
- Ministry of Public Health, MOPH. (2006). Clean food good taste project. Retrieved August 29, 2012 from www.phd.ptho.moph.go.th.
- Sergelidis, D., Abraham, A., Sarimvei, A., Panoulis, C., Karaioannoglou, Pr., and Genigeorgis, C. (1997). Temperature distribution and prevalence of *Listeria* spp. in domestic, retail and industrial refrigerators in Greece. *International Journal of Food Microbiology*, 34, 171-177
- Smale, N. J., Mourehb, J. and Cortella, G. (2006). A review of numerical models of airflow in refrigerated food applications. *International Journal of Refrigeration*, 29, 911 -930
- Tang, X., Sun, X., Wu, V. C.H., Xie, Jing., Pan, Y., Zhao, Y. and Malakar, P. K. (2013). Predicting shelf-life of chilled pork sold in China. *Food Control*, 32, 334 – 340

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

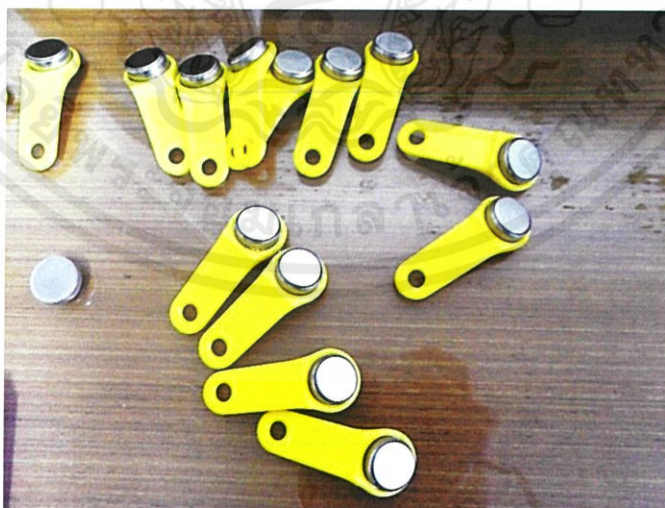
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

ก.1 อุปกรณ์เก็บรักษาความเย็น



รูปที่ ก.1 อุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นที่ใช้ศึกษา (A) ตู้เย็นสองประตูที่มีช่องแช่แข็งด้านบน และ (B) ถังน้ำแข็งพลาสติก

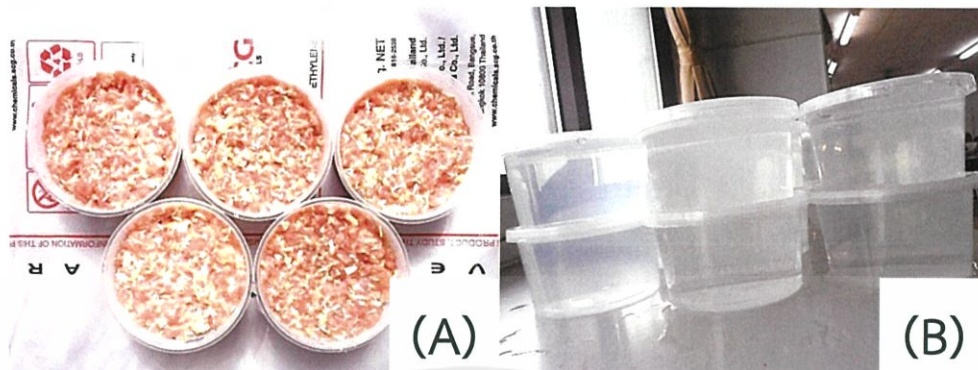
ก.2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ



รูปที่ ก.2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิบันทึกค่าอัตโนมัติ iBotton DS1921G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 โหลดบรรจุอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็น



รูปที่ ก.3 โหลดบรรจุอุปกรณ์ (A) เนื้อไก่บดและ (B) น้ำบริสุทธิ์
บรรจุด้วยพลาสติกขนาด 425 มิลลิลิตร

ก.3 แบบสอบถามการสำรวจ

No. of Surveys:	Date:	Time:
Characteristics of Food Stores: <input type="checkbox"/> Order <input type="checkbox"/> Ready to Eat <input type="checkbox"/> Grocery		
Characteristics of Domestic Refrigerator:		
<input type="checkbox"/> R01 <input type="checkbox"/> R02 <input type="checkbox"/> R03 <input type="checkbox"/> R04 <input type="checkbox"/> R05 <input type="checkbox"/> R06		
Brand:	Size (ft ³):	H (m): L (m): W (m):
Defrosting Type: <input type="checkbox"/> manual <input type="checkbox"/> semi-auto <input type="checkbox"/> automatic		
Use Condition: <input type="checkbox"/> Indoor <input type="checkbox"/> Outdoor <input type="checkbox"/> Partial		
Record		
Ambient Temperature (°C):	Period of Testing Time (min):	
Air Temperature Inside the Refrigerator		
Code of Data logger: #Top #Middle #Bottom		
File Names:		
Frequency of Door Opening (time/period of testing time):		
Remark:		

No. of Surveys:	Date:	Time:
Characteristics of Food Stores: <input type="checkbox"/> Order <input type="checkbox"/> Ready to Eat <input type="checkbox"/> Grocery		
Characteristics of Ice Box: <input type="checkbox"/> Plastic B01 <input type="checkbox"/> Metal B02 <input type="checkbox"/> Foam B03 <input type="checkbox"/> Others		
Brand:	Size (ft ³):	H (m): L (m): W (m):
Use Condition: <input type="checkbox"/> Indoor <input type="checkbox"/> Outdoor <input type="checkbox"/> Partial		
Record		
Ambient Temperature (°C):	Period of Testing Time (min):	
Amount of Ice inside the box (m ³):		
Type of Ice: <input type="checkbox"/> Tube Ice <input type="checkbox"/> Block Ice <input type="checkbox"/> Crushed Ice		
Air Temperature Inside the Box		
Code of Data logger: #Top #Middle #Left #Right		
File Names:		
Frequency of Door Opening (time/period of testing time):		
Remark:		

รูปที่ ก.4 ตัวอย่างแบบสอบถามการสำรวจการใช้งานอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นของแผงค้ำอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการสำรวจ

ข.1 ชนิดตู้เย็นจากการสำรวจ



R06

รูปที่ ข.1 ลักษณะตู้เย็นชนิดต่างๆ จากการสำรวจ

หมายเหตุ R01: หนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบน (Single door top freezer) R02: สองประตูช่องแช่แข็งด้านบน (Double door top freezer) R03: สองประตูช่องแช่แข็งด้านล่าง (Double door bottom freezer) R04: หนึ่งประตูกระจก (One glass door) R05: สองประตูกระจก (Double glass door) และ R06: อื่นๆ เช่น 2 ประตูช่องแช่แข็งด้านข้าง

ข.2 ตารางบันทึกผลการสำรวจ

การสำรวจวัดอุณหภูมิภายในตู้เย็นสุ่มเลือกมา 20 ตู้ จากตู้เย็นทั้งหมด 46 ตู้ และถังน้ำแข็งวัดอุณหภูมิทั้งหมด 23 ถังจากถังน้ำแข็งทั้งหมด 41 ถัง

ตารางที่ ข.1 อุณหภูมิภายในตู้เย็นชนิดหนึ่งประตูช่องแช่แข็งด้านบน (One door top freezer: R01) จากการสำรวจ

No. of surveys	No. of samples	Size (L)	Thermostat setting (portion of full setting)	Temperature (°C)				
				Ambient	Top	Middle	Bottom	Overall
1	15	88.6	0.8	30.90 ± 0.21	9.70 ± 2.46	-	13.50 ± 1.28	11.60 ± 2.69
2	15	149.4	0.5	31.00 ± 0.00	12.40 ± 0.95	12.00 ± 0.88	14.30 ± 0.50	12.90 ± 1.23
3	15	67.9	0.6	32.60 ± 1.32	8.27 ± 1.07	10.80 ± 1.02	12.90 ± 1.00	10.70 ± 2.32
4	15	86.7	0.4	32.40 ± 0.16	16.70 ± 1.79	19.20 ± 1.44	20.00 ± 1.16	18.60 ± 1.72
5	15	100.8	0.5	34.50 ± 0.00	10.90 ± 0.50	14.30 ± 4.50	19.10 ± 0.20	14.80 ± 4.12
6	15	94.5	0.8	28.70 ± 0.50	3.03 ± 1.16	4.50 ± 0.95	10.80 ± 1.19	6.11 ± 4.13
Average				31.68 ± 1.96	10.17 ± 4.54	12.16 ± 5.36	15.10 ± 3.65	12.44 ± 4.20

ตารางที่ ข.2 อุณหภูมิภายในตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านล่าง (Two doors bottom freezer: R03) จากการสำรวจ

No. of surveys	No. of samples	Size (L)	Thermostat setting (portion of full setting)	Temperature (°C)				
				Ambient	Top	Middle	Bottom	Overall
1	15	316.4	0.6	31.37 ± 0.23	13.87 ± 0.52	-	16.40 ± 0.43	15.10 ± 1.79
2	15	146.6	0.6	30.27 ± 0.32	4.90 ± 1.64	14.00 ± 0.91	13.10 ± 0.76	10.70 ± 5.01
Average				30.82 ± 0.78	9.39 ± 6.34	14.00 ± 0.00	14.75 ± 2.33	12.90 ± 3.16

ตารางที่ ข.3 อุณหภูมิภายในตู้เย็นชนิดสองประตูช่องแช่แข็งด้านบน (Two doors top freezer: R02) จากการสำรวจ

No. of surveys	No. of samples	Size (L)	Thermostat setting (portion of full setting)	Temperature (°C)				
				Ambient	Top	Middle	Bottom	Overall
1	15	229.2	0.6	32.20 ± 0.24	12.30 ± 1.52	11.70 ± 2.73	10.10 ± 2.15	11.4 ± 1.14
2	15	302.0	0.8	32.33 ± 0.41	7.53 ± 2.19	6.90 ± 1.64	7.33 ± 1.76	7.30 ± 0.32
3	15	208.8	0.9	31.53 ± 0.40	5.60 ± 0.97	5.27 ± 1.44	4.90 ± 1.23	5.30 ± 0.35
4	15	212.9	0.5	32.33 ± 0.62	12.27 ± 2.49	-	11.9 ± 2.89	12.10 ± 0.26
5	15	188.2	0.7	30.40 ± 1.09	9.27 ± 3.08	-	7.23 ± 3.60	8.30 ± 1.44
6	15	176.8	0.7	35.80 ± 1.39	9.57 ± 1.31	14.07 ± 0.92	0.13 ± 1.72	7.90 ± 7.11
7	15	144.9	0.5	34.27 ± 0.59	9.37 ± 1.71	8.23 ± 1.46	10.43 ± 1.31	9.30 ± 1.10
8	15	74.3	0.5	31.07 ± 0.73	9.07 ± 1.31	12.97 ± 0.90	10.80 ± 1.19	10.90 ± 1.95
9	15	93.6	0.4	33.47 ± 0.13	18.83 ± 1.00	23.20 ± 0.73	22.57 ± 0.88	21.5 ± 2.36
10	15	112.8	0.5	32.50 ± 0.60	11.60 ± 1.98	10.83 ± 2.02	6.93 ± 1.96	9.80 ± 2.50
Average				32.59 ± 1.58	10.54 ± 3.58	11.65 ± 5.56	9.23 ± 5.81	10.37 ± 4.43

ตารางที่ ข.4 อุณหภูมิภายในตู้เย็นชนิดsoหนึ่งประตูกระจก (One glass door: R04) จากการสำรวจ

No. of surveys	No. of samples	Size (L)	Thermostat setting (portion of full setting)	Temperature (°C)				
				Ambient	Top	Middle	Bottom	Overall
1	15	253.4	-	31.13 ± 0.35	7.50 ± 1.28	2.87 ± 0.97	3.57 ± 0.75	4.60 ± 2.50
Average				31.13 ± 0.00	7.50 ± 0.00	2.87 ± 0.00	3.57 ± 0.00	4.60 ± 0.00

ตารางที่ ข.5 อุณหภูมิภายในตู้เย็นชนิดอื่น (ช่องแช่แข็งด้านข้าง) (Others: R06) จากการสำรวจ

No. of surveys	No. of samples	Size (L)	Thermostat setting (portion of full setting)	Temperature (°C)				
				Ambient	Top	Middle	Bottom	Overall
1	15	391.9	0.4	35.10 ± 0.54	18.56 ± 0.99	25.33 ± 0.62	22.87 ± 0.44	22.20 ± 3.44
Average				35.10 ± 0.00	18.56 ± 0.00	25.33 ± 0.00	22.87 ± 0.00	22.20 ± 0.00

ตารางที่ ข.6 อุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งพลาสติก จากการสำรวจ

No. of surveys	No. of samples	Size (L)	Amount of ice (portion of box volume)	Temperature (°C)					
				Ambient	Top	Middle	Left	Right	Overall
1	15	175.50	0.18	32.80 ± 0.32	20.07 ± 8.21	2.77 ± 0.37	1.30 ± 0.37	10.00 ± 7.56	8.50 ± 8.58
2	15	208.94	0.13	30.07 ± 0.18	24.07 ± 1.84	9.00 ± 4.08	11.53 ± 3.56	9.57 ± 3.46	13.60 ± 7.10
3	15	160.82	0.54	31.20 ± 0.78	16.03 ± 136	1.27 ± 0.26	1.07 ± 0.18	5.93 ± 0.50	6.10 ± 7.01
4	15	93.06	0.11	31.23 ± 0.26	21.97 ± 1.55	4.83 ± 2.33	3.33 ± 1.91	2.67 ± 1.40	8.20 ± 9.22
5	15	126.76	0.51	28.00 ± 0.00	17.00 ± 1.87	6.40 ± 2.41	2.07 ± 1.72	9.13 ± 2.66	8.70 ± 6.28
6	15	138.60	0.43	32.07 ± 0.56	23.60 ± 2.18	9.43 ± 2.31	9.73 ± 2.83	2.10 ± 1.21	11.20 ± 8.98
7	15	157.32	0.39	30.47 ± 0.13	19.30 ± 1.08	4.00 ± 0.63	1.33 ± 0.75	4.43 ± 0.98	7.30 ± 8.14
8	15	155.61	0.37	31.50 ± 0.00	30.33 ± 0.24	8.40 ± 1.58	4.60 ± 1.56	6.10 ± 1.43	12.40 ± 12.08
9	15	157.32	0.22	29.50 ± 0.00	24.73 ± 0.68	7.60 ± 2.08	7.60 ± 2.35	12.53 ± 1.32	13.10 ± 8.09
10	15	176.79	0.23	28.00 ± 0.00	24.07 ± 0.46	13.90 ± 0.63	5.00 ± 1.25	2.67 ± 0.24	11.40 ± 9.73
11	15	111.07	0.27	31.33 ± 0.24	18.77 ± 1.46	3.97 ± 1.38	5.23 ± 1.73	1.30 ± 0.49	7.30 ± 7.81
12	15	157.32	0.43	36.77 ± 0.26	19.20 ± 0.98	3.20 ± 0.62	6.57 ± 0.46	2.57 ± 0.62	7.90 ± 7.75
13	15	178.22	0.13	36.00 ± 0.00	20.93 ± 0.92	5.10 ± 0.60	9.63 ± 0.94	5.23 ± 0.59	10.20 ± 7.44

ตารางที่ ข.6 (ต่อ) อุณหภูมิภายในถังน้ำแข็งพลาสติก

No. of surveys	No. of samples	Size (L)	Amount of ice (portion of box volume)	Temperature (°C)					
				Ambient	Top	Middle	Left	Right	Overall
14	15	162.54	0.67	32.00 ± 0.00	17.03 ± 0.88	4.00 ± 0.46	2.98 ± 0.35	4.03 ± 0.13	7.00 ± 6.70
15	15	195.22	0.50	33.00 ± 0.00	18.63 ± 1.13	4.70 ± 1.22	3.30 ± 1.03	2.83 ± 0.75	7.40 ± 7.55
16	15	124.20	0.63	35.90 ± 0.21	16.20 ± 1.49	3.77 ± 1.29	8.50 ± 0.95	6.33 ± 1.48	8.70 ± 5.36
17	15	141.75	0.24	34.00 ± 0.00	25.17 ± 0.94	5.17 ± 0.94	8.77 ± 3.46	8.50 ± 1.34	11.90 ± 9.00
18	15	267.12	0.43	31.73 ± 0.26	26.63 ± 0.94	9.43 ± 1.31	17.67 ± 0.88	4.03 ± 1.14	14.40 ± 9.87
19	15	287.28	0.21	33.10 ± 0.43	23.00 ± 1.35	4.43 ± 2.48	9.97 ± 2.81	10.97 ± 0.91	12.10 ± 7.82
20	15	157.32	0.38	30.80 ± 0.54	18.50 ± 1.28	6.67 ± 0.84	2.00 ± 0.92	12.43 ± 0.98	9.90 ± 7.15
21	15	162.93	0.30	31.70 ± 0.46	25.33 ± 1.22	9.57 ± 6.61	5.20 ± 2.37	10.60 ± 2.78	12.70 ± 8.76
22	15	110.88	0.23	30.50 ± 0.00	26.10 ± 0.507	0.90 ± 0.28	17.23 ± 0.82	8.47 ± 0.72	13.20 ± 10.90
23	15	82.99	0.10	30.50 ± 0.00	22.47 ± 0.13	7.47 ± 0.35	6.17 ± 0.31	19.50 ± 0.00	13.90 ± 8.285
Average				31.83 ± 2.26	21.70 ± 3.81	5.91 ± 3.09	6.56 ± 4.64	7.04 ± 4.42	10.30 ± 2.60

ตารางที่ ข.7 ปริมาตรของถังน้ำแข็ง และสัดส่วนปริมาณน้ำแข็งภายในถังน้ำแข็ง

No.	Height (cm)	Width (cm)	Length (cm)	Box volume (L)	Height of ice (cm)	Volume of ice (L)	Ice portion of box volume
1	50	75	46	172.50	9	31.05	0.18
2	52	82	49	208.94	7	28.13	0.13
3	46	76	46	160.82	25	87.40	0.54
4	44	47	45	93.06	5	10.58	0.11
5	43	67	44	126.76	22	64.86	0.51
6	42	75	44	138.60	18	59.40	0.43
7	46	76	45	157.32	18	61.56	0.39
8	45.5	76	45	155.61	17	58.14	0.37
9	46	76	45	157.32	10	34.20	0.22
10	44	82	49	176.79	10	40.18	0.23
11	44.5	64	39	111.07	12	29.95	0.27
12	46	76	45	157.32	20	68.40	0.43
13	47	79	48	178.22	6	22.75	0.13
14	42	86	45	162.54	28	108.36	0.67
15	48	83	49	195.22	24	97.61	0.50
16	40	69	45	124.20	25	77.63	0.63
17	42	75	45	141.75	10	33.75	0.24
18	53	90	56	267.12	23	115.92	0.43
19	56	90	57	287.28	12	61.56	0.21
20	45	76	46	157.32	17	59.43	0.38
21	46	77	46	162.93	14	49.59	0.30
22	44	63	40	110.88	10	25.20	0.23
23	39	56	38	82.99	4	8.51	0.10
24	25	55	40	55.00	4	8.80	0.16
25	53	83	50	219.95	18	74.70	0.34
26	46	82	48	181.06	9	35.42	0.20
27	44	74	45	146.52	9.5	31.64	0.22
28	45	78	44	154.44	33.5	114.97	0.74
29	37.5	75	45	126.56	9	30.38	0.24
30	45	76	44	150.48	30	100.32	0.67
31	45	75	46	155.25	15	51.75	0.33
32	56	90	55	277.20	34	168.30	0.61
33	46	66	49	148.76	5	16.17	0.11
34	47.5	83	49	193.18	6	24.40	0.13
35	45	47	76	160.74	21	75.01	0.47
36	48	51	49	119.95	5	12.50	0.10
37	37	66	39	95.24	33	84.94	0.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาและต้องติดต่อเจ้าของเอกสารทุกกรณีที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 (ต่อ) ปริมาตรของถังน้ำแข็งและสัดส่วนปริมาณน้ำแข็งภายในถังน้ำแข็ง

No.	Height (cm)	Width (cm)	Length (cm)	Box volume (L)	Height of ice (cm)	Volume of ice (L)	Ice portion of box volume
38	45	77	46	159.39	20	70.84	0.44
39	46	56	40	103.04	15	33.60	0.33
40	48	74	44	156.29	31	100.94	0.65
41	48	82	48	188.93	11	43.30	0.23
average	45.32	73.32	46.68	158.01	15.98	56.39	0.35*
SD	5.27	11.07	6.25	47.89	8.94	35.51	0.20
max	56.00	90.00	76.00	287.28	34.00	168.30	0.89
min	25.00	47.00	38.00	55.00	4.00	8.51	0.10

* ปริมาณการใช้น้ำแข็งจริงเฉลี่ยจากการสำรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณอายุการเก็บรักษาอาหาร

ค.1 เนื้อวัว

การคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวมีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

$$1) \text{ คำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อวัว จากสมการที่ 4.1 } t_s(T) = AF \cdot t_s(T_{ref})$$

$$\text{และ } AF \text{ คำนวณจากสมการที่ 4.2 } AF = \exp\left(E_R \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$

ค่าคงที่การคำนวณในแบบจำลองเดิมกำหนด ดังนี้ $E_R = 7720 \text{ K}$ $T_{ref} = 2^\circ\text{C}$ และ $t_s(T_{ref}) = 88 \text{ hr}$ โดย $t_s(T)$ คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิใดๆ อ้างอิงจากคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ชั่วโมง) $t_s(T_{ref})$ คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิอ้างอิง AF คือตัวเร่งปฏิกิริยา $E_R = \frac{E_a}{R}$ คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานกระตุ้น (cal/mol) กับค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 1.98 cal/mol K และ T คืออุณหภูมิจริง (K)

ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ ค.1 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อ้างอิงการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) ผ่านโปรแกรม Microsoft Excel 2011® โดยแปลงอายุการเก็บแบบจำลองเดิมให้อยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติ (Natural logarithm) ผลการวิเคราะห์ได้แบบจำลองอย่างง่าย ดังนี้

$$\ln SL_s = -0.096T + 4.654$$

หรือ

$$SL_s = 105.0 \exp(-0.096T)$$

เมื่อ SL_s คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิใดๆ (ชั่วโมง) อ้างอิงจากคุณภาพทางประสาทสัมผัส (สำหรับแบบจำลองนี้คุณภาพทางประสาทสัมผัสที่พิจารณาคือ สีของเนื้อวัวเท่านั้น) และ T คืออุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองอย่างง่าย

อุณหภูมิ (T)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อายุการเก็บแบบจำลองเดิม		อายุการเก็บแบบจำลองอย่างง่าย	
		ชั่วโมง	วัน	ชั่วโมง	วัน
องศาเซลเซียส	AF				
2	1.0000	88.0	3.7	86.6	3.6
3	0.9033	79.5	3.3	78.7	3.3
4	0.8165	71.9	3.0	71.5	3.0
5	0.7386	65.0	2.7	64.9	2.7
6	0.6687	58.8	2.5	59.0	2.5
7	0.6057	53.3	2.2	53.6	2.2
8	0.5491	48.3	2.0	48.7	2.0
9	0.4982	43.8	1.8	44.2	1.8
10	0.4522	39.8	1.7	40.2	1.7
11	0.4108	36.2	1.5	36.5	1.5
12	0.3734	32.9	1.4	33.1	1.4

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ผลการคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อวัวบดจากแบบจำลองเดิมและแบบจำลองอย่างง่าย

อุณหภูมิ (T)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อายุการเก็บแบบจำลองเดิม		อายุการเก็บแบบจำลองอย่างง่าย	
		ชั่วโมง	วัน	ชั่วโมง	วัน
13	AF	29.9	1.2	30.1	1.3
14		27.2	1.1	27.3	1.1
15		24.8	1.0	24.8	1.0
16		22.6	0.9	22.6	0.9
17		20.6	0.9	20.5	0.9
18		18.8	0.8	18.6	0.8
19		17.2	0.7	16.9	0.7

ข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อวัว แสดงในตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 (1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของแบบจำลองอย่างง่าย (เนื้อวัว)

Regression Statistics	
Multiple R	0.9999
R Square	0.9997
Adjusted R Square	0.9997
Standard Error	0.0086
Observations	18

ตารางที่ ค.2 (2) ผลการวิเคราะห์ ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	4.4755	4.4755	60233.6218	0.0000
Residual	16	0.0012	0.0001		
Total	17	4.4766			

ตารางที่ ค.2 (3) ความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	4.654	0.005	1014.714	0.000
X Variable 1	-0.096	0.000	-245.425	0.000

ค.2 เนื้อหุ

การคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อหุมีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

- 1) คำนวณปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นที่เวลาใดๆ จากสมการที่ 4.4

$$y = A \exp \left\{ -\exp \left[\frac{\mu_{\max} e}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \text{ ในช่วงอุณหภูมิ } 4 - 15 \text{ องศาเซลเซียส}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดย $\mu_{\max} = 0.0057T - 0.0026$ $\lambda = 84T^{-0.7}$ และ $A = 0.03T + 8.5$ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเปลี่ยนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ y คือปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาใดๆ (\log CFU/g) A คือปริมาณเชื้อจุลินทรีย์คงที่ที่มากที่สุด (\log CFU/g) μ_{\max} คืออัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์จำเพาะ ($1/h$) e คือค่าคงที่เท่ากับ 2.718 λ คือช่วงเวลาหน่วง (Lag phase: h) และ t คือเวลา (h)

- 2) นำปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่คำนวณได้ของแต่ละเวลาและอุณหภูมิ $y(t, T)$ คูณกับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ($4.8 \log$ CFU/g) แล้วสังเกตผลคูณที่มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับเชื้อจุลินทรีย์สูงสุด ($7.0 \log$ CFU/g) พิจารณาวลานั้นให้เป็นอายุการเก็บรักษาของเนื้อหมูที่อุณหภูมินั้น ตัวอย่างการคำนวณแสดงในตารางที่ ค.3

ตารางที่ ค.3 ตัวอย่างการคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อหมูจากแบบจำลองเดิม ที่อุณหภูมิ 10°C

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณเชื้อที่เพิ่มขึ้น (y)		ปริมาณเชื้อทั้งหมด
	\log CFU/g	CFU/g (A)	CFU/g
0			$6.31\text{E}+04^a$
1	2.55E-01	1.80E+00	$1.13\text{E}+05^b$
10	4.19E-01	2.62E+00	$1.65\text{E}+05$
20	6.71E-01	4.68E+00	$2.96\text{E}+05$
30	9.99E-01	9.97E+00	$6.29\text{E}+05$
40	1.40E+00	2.50E+01	$1.58\text{E}+06$
50	1.86E+00	7.22E+01	$4.56\text{E}+06$
57	2.21E+00	1.62E+02	$1.02\text{E}+07$

^a ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น $4.8 \log$ CFU/g = $6.31\text{E}+04$ CFU/g

^b ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ ณ เวลาใดๆ คำนวณจาก ปริมาณเชื้อเริ่มต้น \times ปริมาณเชื้อที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาใดๆ (CFU/g)

จากตารางที่ ค.3 แสดงตัวอย่างการคำนวณปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส พบว่า อายุการเก็บรักษาเนื้อหมูที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสเท่ากับ 57 ชั่วโมง คำนวณในลักษณะเช่นนี้กับทุกๆอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิ $4 - 15$ องศาเซลเซียส และเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเช่นเดียวกับเนื้อวัว ได้แบบจำลองอย่างง่ายจากผลการวิเคราะห์ ดังนี้

$$\ln SL_m = -0.9620 \ln T + 6.2649$$

หรือ

$$SL_m = 525.81T^{-0.9620}$$

เมื่อ SL_m คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิใดๆ (ชั่วโมง) อ้างอิงจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากที่สุดที่ทำให้อาหารเริ่มเสื่อมเสีย และ T คืออุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงดังตารางที่ ค.4

ตารางที่ ค.4 (1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของแบบจำลองอย่างง่าย (เนื้อหมู)

Regression Statistics	
Multiple R	0.9998
R Square	0.9996
Adjusted R Square	0.9996
Standard Error	0.0080
Observations	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างสำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 (2) ผลการวิเคราะห์ ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	1.8179	1.8179	28479.0837	0.0000
Residual	10	0.0006	0.0001		
Total	11	1.8185			

ตารางที่ ค.4 (3) ความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	6.2649	0.0126	496.6517	0.0000
X Variable 1	-0.9620	0.0057	-168.7575	0.0000

ค.3 เนื้อไก่

การคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่มีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

- 1) คำนวณอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อ *Pseudomonas* spp. จากสมการที่ 4.9

$GR = (0.0188T + 0.1093)^2$ ($\Delta \log$ CFU/h) ที่อุณหภูมิใดๆ โดย GR คืออัตราการเจริญเติบโตของเชื้อ *Pseudomonas* spp. (\log CFU/h) T คืออุณหภูมิใดๆ (องศาเซลเซียส)

- 2) นำอัตราการเจริญเติบโตที่ได้ไปคูณกับปริมาณเชื้อเริ่มต้น ($2 \log$ CFU/cm²) สอดคล้องๆทุกชั่วโมงจนกระทั่งได้ปริมาณเชื้อสูงสุดที่ทำให้เนื้อไก่เริ่มเสื่อมเสีย ($7 \log$ CFU/cm²) แล้วกำหนดให้ที่เวลา (ชั่วโมง) นั้นเป็นอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่ ตารางที่ ค.5 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณอายุเนื้อไก่ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส พบว่า

$$GR = (0.0188(10) + 0.1093)^2 = 0.08839 \Delta \log \text{ CFU/h}$$

ตารางที่ ค.5 ตัวอย่างการคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่จากแบบจำลองเดิม อัตราการเจริญเติบโตที่อุณหภูมิ 10°C

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณเชื้อ
	CFU/cm ²
0	1.00E+02 ^a
1	1.23E+02 ^b
5	2.77E+02
10	7.65E+02
20	5.86E+03
30	4.48E+04
40	3.43E+05
50	2.63E+06
57	1.09E+07

^a ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น $2 \log$ CFU/cm² = 1.00E+02 CFU/cm²

^b ปริมาณเชื้อสะสมที่อุณหภูมิใดๆ คำนวณจาก ปริมาณเชื้อเริ่มต้น (หรือปริมาณเชื้อก่อนหน้า) \times GR (CFU/cm²)

จากตารางที่ ค.5 พบว่าอายุการเก็บรักษาเนื้อไก่ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสเท่ากับ 57 ชั่วโมง (อัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับ $0.0884 \Delta \log \text{CFU/h} = 1.2257 \Delta \text{CFU/h}$) และเมื่อคำนวณในลักษณะเดียวกันที่อัตราการเจริญเติบโตที่อุณหภูมิอื่นๆ ในช่วง 0 – 25 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อนำผลการคำนวณมาวิเคราะห์การถดถอยแบบจำลองอย่างง่ายที่ได้ คือ

$$SL_m = (3.526250 \times 10^{-5})T^6 - (3.143059 \times 10^{-3})T^5 + (1.122762 \times 10^{-1})T^4 - 2.070055T^3 + 21.33323T^2 - 126.4675T + 416.3089$$

เมื่อ SL_m คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิใดๆ (ชั่วโมง) อ้างอิงจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากที่สุดที่ทำให้อาหารเริ่มเสื่อมเสียและ T คืออุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) โดยผลการวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงในตารางที่ ค.6

ตารางที่ ค.6 (1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของแบบจำลองอย่างง่าย (เนื้อไก่)

Regression Statistics	
Multiple R	0.9999
R Square	0.9997
Adjusted R Square	0.9997
Standard Error	1.8294
Observations	26

ตารางที่ ค.6 (2) ผลการวิเคราะห์ ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	6	248028.448	41338.0748	12351.4372	0.0000
Residual	19	63.5896	3.3468		
Total	25	248092.038			

ตารางที่ ค.6 (3) ความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	416.3089485	1.693765412	245.7890245	9.61807E-35
X degree 1	-126.467494	2.067982339	-61.15501661	2.77261E-23
X degree 2	21.33323143	0.775980932	27.49195315	9.17365E-17
X degree 3	-2.07005527	0.120726665	-17.14662838	5.12295E-13
X degree 4	0.112276212	0.008926405	12.57798784	1.16586E-10
X degree 5	-0.00314306	0.000311912	-10.07674784	4.65251E-09
X degree 6	3.52625E-05	4.14402E-06	8.509256649	6.62221E-08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.4 เนื้อปลา

การคำนวณอายุการเก็บรักษาเนื้อปลา มีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

- 1) จำนวนอายุการเก็บรักษาจากแบบจำลองดั้งเดิม จากสมการที่ 4.11

$$t_s = \frac{4 \ln 2 + \ln \left(\frac{N_{\max}}{N_0} - 1 \right)}{\mu_{\max}} \quad \text{โดย } N_{\max} = 7 \log CFU / g \quad N_0 = 3.5 \log CFU / g$$

$$\text{และ } \sqrt{\mu_{\max}} = 0.29 + 0.032T - 1.6 \times 10^{-3}C + 9 \times 10^{-5}TC - 9 \times 10^{-6}C^2 ; C = 50$$

เมื่อ t_s คืออายุการเก็บรักษาของเนื้อปลาคอด (ชั่วโมง) N_{\max} และ N_0 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากที่สุดที่ทำให้เนื้อปลาคอดเริ่มเสื่อมเสียและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ตามลำดับ μ_{\max} คืออัตราการเจริญเติบโตเชื้อจุลินทรีย์จำเพาะ (1/ชั่วโมง) T คืออุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) C คือร้อยละของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ (ในงานวิจัยฉบับนี้อ้างอิงที่ 50%CO₂)

- 2) นำผลการคำนวณอายุมาวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาแบบจำลองอย่างง่าย โดยแบบจำลองอย่างง่ายที่ได้คือ

$$SL_m = (2.5416 \times 10^{-4})T^6 - (1.3968 \times 10^{-5})T^5 + (3.1241 \times 10^{-1})T^4 - 3.7081T^3 + 25.897T^2 - 113.55T + 307.80$$

เมื่อ SL_m คืออายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิใดๆ (ชั่วโมง) อ้างอิงจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์มากที่สุดที่ทำให้อาหารเริ่มเสื่อมเสียและ T คืออุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) โดยผลการวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงดังตารางที่ ค.7

ตารางที่ ค.7 (1) ผลการวิเคราะห์การถดถอยของแบบจำลองอย่างง่าย (เนื้อปลา)

Regression Statistics	
Multiple R	0.99999
R Square	0.99997
Adjusted R Square	0.99996
Standard Error	0.52733
Observations	16

ตารางที่ ค.7 (2) ผลการวิเคราะห์ ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	6	99165.75	16527.63	59435.53	0.00
Residual	9	2.50	0.28		
Total	15	99168.26			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 (3) ความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	307.7992589	0.517285292	595.0280506	5.44489E-22
X degree 1	-113.548346	1.130953655	-100.4005296	4.89397E-15
X degree 2	25.89667267	0.742155128	34.89388092	6.44232E-11
X degree 3	-3.7080852	0.19627117	-18.89266364	1.49962E-08
X degree 4	0.312408978	0.024395543	12.80598582	4.4177E-07
X degree 5	-0.01396811	0.001425333	-9.799897021	4.23279E-06
X degree 6	0.00025416	3.15663E-05	8.051607999	2.10256E-05



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินทางเลือกระหว่างการใช้ตู้เย็นหรือถังน้ำแข็ง นอกจากการพิจารณาความสามารถ การถนอมอาหารของตู้เย็นและถังน้ำแข็งแล้ว ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ผลการวิเคราะห์ทาง เศรษฐศาสตร์ โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน สำหรับการ วิเคราะห์จุดคุ้มทุนเป็นกาววิเคราะห์เพื่อแสดงถึงการยอมรับการเลือกใช้ระหว่างอุปกรณ์เก็บรักษา ความเย็นทั้งสองนี้ โดยมีสมมติฐานการคำนวณ แสดงในตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 สมมติฐานค่าใช้จ่ายในการลงทุนสำหรับตู้เย็นและถังน้ำแข็ง โดยอุปกรณ์ทั้งสองมีอัตรา ผลตอบแทน 6% ต่อปี

	ตู้เย็น	ถังน้ำแข็ง
เงินลงทุนเริ่มต้น (บาท)	11990	4200
อายุการใช้งาน (ปี)	8	8
ค่าใช้จ่ายต่อวัน ³ (บาท/วัน)	22.68	40

³ ค่าใช้จ่ายของตู้เย็นคิดจากค่าไฟต่อวัน โดยกำลังงานรวมตู้เย็นเท่ากับ 189 W ทำงาน 24 ชั่วโมงและค่าไฟ 5 บาทต่อหน่วย สำหรับค่าใช้จ่ายต่อวันของถังน้ำแข็งคิดจากค่าน้ำแข็งต่อวัน โดยน้ำแข็งกระสอบละ 40 บาท (50 กิโลกรัม) ใช้วันละ 1 กระสอบ

1) การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

จากข้อมูลตารางที่ ง.1 สามารถคำนวณจุดคุ้มทุนได้ ด้วยการกำหนดให้รายรับและรายจ่ายมีค่า เท่ากันทั้งสองอุปกรณ์ ดังสมการ

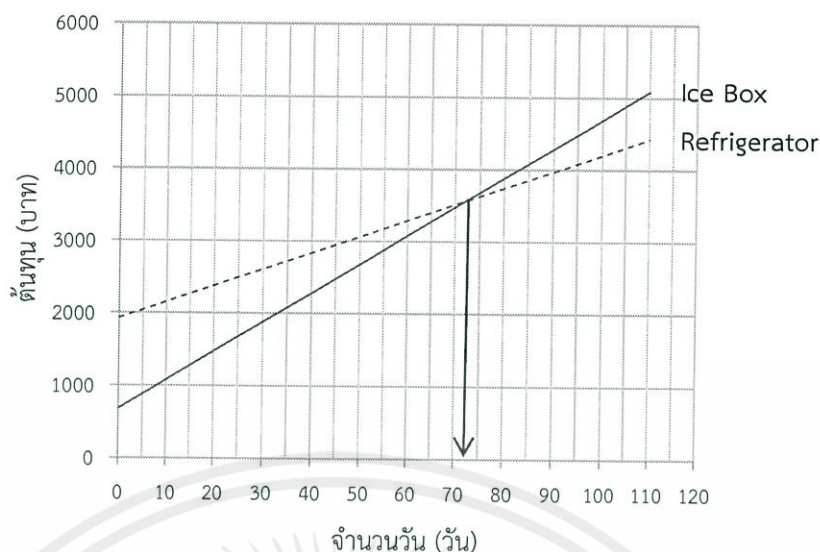
$$AW_{ref} = AW_{icebox}$$

$$-11990\left(\frac{A}{P}, 6\%, 8\right) - 22.68X = -4200\left(\frac{A}{P}, 6\%, 8\right) - 40X$$

$$X = 72.41$$

เมื่อ AW คือผลรวมค่าใช้จ่ายหรือรายรับของอุปกรณ์ X คือจุดคุ้มทุน (วัน) จากการ คำนวณด้วยการพิจารณาความสัมพันธ์ต้นทุนเชิงเส้นของอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้งสองประเภท พบว่า ช่วงระยะเวลาที่ต้นทุนของอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นทั้งสองชนิดเท่ากันคือ 73 วัน/ปี โดย ความชัน (slope) ของถังน้ำแข็งมีค่ามากกว่าตู้เย็นกล่าวคือ หากแผงค้ำอาหารเปิดขายเป็นเวลา มากกว่า 73 วัน/ปี ควรเลือกใช้ตู้เย็นเพราะมีต้นทุนรวมถูกกว่า ในทางกลับกันหากแผงค้ำอาหารเปิด ขายไม่ถึง 73 วัน/ปี ควรเลือกใช้ถังน้ำแข็งเพราะมีต้นทุนรวมถูกกว่า โดยรูปที่ ง.1 แสดงความสัมพันธ์ เชิงเส้นของอุปกรณ์ทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.1 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของต้นทุนตู้เย็นและถังน้ำแข็ง

2) การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน

การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนเป็นการประเมินเวลาที่ได้รับผลรวมของกำไรหรือผลตอบแทนการลงทุนทั้งหมด โดยสมการด้านล่างเป็นสมการการคำนวณเป็นแบบ simple payback สำหรับข้อมูลการคำนวณอ้างอิงตามตารางที่ ง.1 โดยกำหนดให้รายได้ของแผงค้าอาหารเท่ากับ 1000 บาท/วัน

$$rQ = FC + VQ$$

เมื่อ r คือรายได้ต่อวัน FC คือต้นทุนคงที่ V คือต้นทุนแปรผัน และ Q คือจำนวนวันการเปิดแผงค้าอาหาร

$$\text{ระยะเวลาคืนทุนของตู้เย็น} \quad 1000(Q) = 11990 + 22.68(Q) \quad \longrightarrow \quad Q = 12.27 \approx 13$$

$$\text{ระยะเวลาคืนทุนของถังน้ำแข็ง} \quad 1000(Q) = 4200 + 40(Q) \quad \longrightarrow \quad Q = 4.38 \approx 5$$

จากผลการคำนวณพบว่า ระยะเวลาคืนทุนของตู้เย็นช้ากว่าถังน้ำแข็งกล่าวคือ ตู้เย็นมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 13 วัน ในขณะที่ระยะคืนทุนของถังน้ำแข็งเพียง 5 วัน อย่างไรก็ตามวิธีการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนเป็นเพียงการตรวจสอบการลงทุนเบื้องต้นเท่านั้นเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน ไม่ควรนำมาใช้ในการตัดสินใจว่าควรจะเลือกอุปกรณ์เก็บรักษาความเย็นชนิดใด สมมติให้แผงค้าอาหารเปิดขายเป็นเวลา 240 วัน/ปี

$$\text{ต้นทุนต่อปีของตู้เย็น} \quad AW = 11990\left(\frac{A}{P}, 6\%, 8\right) + 22.68(240) = 7311.66 \text{ บาทต่อปี}$$

$$\text{ต้นทุนต่อปีของถังน้ำแข็ง} \quad AW = 4200\left(\frac{A}{P}, 6\%, 8\right) + 40(240) = 10276.37 \text{ บาทต่อปี}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้