การประเมินประสิทธิภาพของตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็งเพื่อเก็บรักษาผักระหว่างค้าปลีกที่ตลาดสด

Performance evaluation of an ice-cooled display cabinet for vegetable preservation during retailing at wet markets

กันต์พจน์ โกศัลลวัฒน์

ณัฐสิษฐ์ จิตต์สุภาพ

ภัครพล ศรีธรรมศักดิ์

สตกมลวรรณ ครุธาโรจน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Performance evaluation of an ice-cooled display cabinet for vegetable preservation during retailing at wet markets

Kanphot Kosanlawat

Nuttasit Chitsuphap

Pakkaraphon Srithammasak

Satakamolwan Krutharoj

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PAARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2565

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประเมินประสิทธิภาพของตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็งเพื่อเก็บรักษาผักระหว่างค้าปลีกที่ตลาดสด

Performance evaluation of an ice-cooled display cabinet for vegetable preservation during retailing at wet markets

ผู้จัดทำ

1. กันต์พจน์	โกศัลลวัฒน์	รหัสประจำตัว 62010049
2. ณัฐสิษฐ์	จิตต์สุภาพ	รหัสประจำตัว 62010296
3. ภัครพล	ศรีธรรมศักดิ์	รหัสประจำตัว 62010677
4. สตกมลวรรณ	ครุธาโรจน์	รหัสประจำตัว 62010907

..... หัวหน้าภาควิชา

(ผศ.ดร.เจษฎา ชัยโฉม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.ณัฐวุฒิ ชาวเมือง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงาน	การประเมินประสิทธิภาพของตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็งเพื่อเก็บรักษาผักระหว่างค้าปลีกที่ตลาดสด
นักศึกษา	กันต์พจน์ โกศัลลวัฒน์ ณัฐสิษฐ์ จิตต์สุภาพ ภัครพล ศรีธรรมศักดิ์ สตกมลวรรณ ครุธาโรจน์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ณัฐวุฒิ ชาวเมือง
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้สร้างต้นแบบตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็งเพื่อใช้สำหรับเก็บรักษาผักระหว่างค้าปลีกที่ตลาดสด ตู้แช่แสดงสินค้านี้มีโครงสร้างที่เรียบง่ายและใช้น้ำแข็งเป็นแหล่งให้ความเย็น โดยถาดใส่น้ำแข็งออกแบบให้อยู่ด้านบนของตู้เพื่อทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ การศึกษาเริ่มต้นจากการประเมินลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในตู้แบบมีและไม่มีฝาปิดที่ด้านหน้าของตู้ เมื่อถาดใส่น้ำแข็งติดตั้งที่ความสูง 3 ระดับ (50 75 และ 100 cm) จากนั้นเลือกระดับความสูงของถาดน้ำแข็งที่ให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้ต่ำสุดมาใช้ประเมินประสิทธิภาพการการเก็บรักษาผัก ในการศึกษานี้ใช้ผักคะน้า (*Brassica oleracea*) เป็นกรณีศึกษา สมบัติทางกายภาพที่ศึกษา ประกอบด้วย การสูญเสียมวล สี เนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏ โดยวัดก่อนและหลังการแช่ในตู้แช่แสดงสินค้าเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และทุก ๆ 2 วันระหว่างเก็บรักษาในตู้เย็นเป็นเวลา 5 วัน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความสูงของถาดใส่น้ำแข็งต่ำลง อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในตู้แบบมีฝาปิดลดลงอย่างชัดเจน แต่แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีของตู้แบบไม่มีฝาปิด ที่ความสูง 50 cm อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในตู้แบบมีและไม่มีฝาปิดมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเท่ากับ 11.5 °C และ 2.2 °C ตามลำดับ จากผลการประเมินประสิทธิภาพการเก็บรักษาผักพบว่า ผักคะน้าที่แช่ไว้ในตู้แช่แสดงสินค้าสูญเสียมวลน้อยกว่าผักคะน้าที่วางไว้ภายใต้อุณหภูมิบรรยากาศ ในขณะที่สมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเก็บรักษาผักไว้ที่อุณหภูมิต่ำแม้ในช่วงเวลาสั้น ๆ สามารถลดการสูญเสียมวลลงได้ และตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็งนี้สามารถเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยรักษาคุณภาพผักไว้ระหว่างการค้าปลีกในตลาดสดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	Performance evaluation of an ice-cooled display cabinet for vegetable preservation during retailing at wet markets
Students	Kanphot Kosanlawat Nuttasit Chitsuphap Pakkaraphon Srithamasak Satakamolwan Krutharoj
Project Advisor	Dr. Nattawut Chaomuang
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Food Engineering
Academic Year	2022

ABSTRACT

In this study, an ice-cooled display cabinet was fabricated for vegetable preservation during retailing at wet markets. The cabinet has a simple structure and ice as a cold medium. An ice tray was installed at the top of the cabinet to induce heat transfer by natural convection. Firstly, temperature distributions in the cabinet with and without a front cover were investigated when the ice tray was installed at 3 heights (50, 75, and 100 cm). The cabinet with the tray height that provides the lowest average air temperature in the cabinet was further evaluated for its vegetable preservation performance. This study used Chinese kale (*Brassica oleracea*) as a case study. The quality attributes (weight loss, color, texture, and visual appearance) were evaluated before and after storage in the display cabinet for 5 h and every 2 days during storage in a refrigerator for 5 days. The results showed that the average air temperature in the cabinet with the front cover decreased when the tray height was lower. However, it did not change in the case of the cabinet without the cover. The average air temperatures in the cabinet with and without the front cover were around 11.5 °C and 2.2 °C lower than the ambient temperatures, respectively. Regarding the quality preservation, the results showed that the Chinese kales kept in the cabinet exhibited less mass loss, compared to those stored under ambient condition. Insignificant differences were detected for the other quality attributes. These findings suggested that storage at low temperatures even for a short period can minimize the product mass loss. Moreover, the ice-cooled display cabinet can be a viable alternative for persevering vegetable quality during retailing at wet markets.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้เป็นอย่างดีจากการช่วยเหลือของ ดร.ณัฐวุฒิ ชาวเมือง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่าง ๆ รวมถึงการตรวจสอบ แก้ไขข้อผิดพลาดพลาดต่าง ๆ ตลอดจนเป็นกำลังใจให้คณะผู้จัดทำตลอดการทำโครงงานศึกษานี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ชี้แนะแนวทางในการศึกษาค้นคว้า และสร้างแรงผลักดันตลอดระยะเวลา 4 ปีที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน และให้คำปรึกษาด้านต่าง ๆ

ขอขอบคุณ ธนัช เนื่องจำนงศ์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาและให้กำลังใจในการจัดทำปริญญานิพนธ์ตลอดจนความห่วงใยและกำลังใจที่มีให้กันเสมอมาทั้งในวันที่สำเร็จและในวันที่ยากลำบาก

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัตาราง.....VI

สารบัญรูปภาพ.....VII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 หลักการ เหตุผล และที่มาของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....2

1.3 ขอบเขตการศึกษา.....2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2

บทที่ 2 ตรวจเอกสาร.....3

2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....3

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และการทดลอง 5

3.1 ชุดทดลอง.....5

3.2 วิธีการทดลอง.....6

3.2.1 การประเมินประสิทธิภาพการรักษาอุณหภูมิภายในตู้เปล่า.....6

3.2.2 การคำนวณหาค่าภาระทางความร้อน.....8

3.2.3 การประเมินประสิทธิภาพเก็บรักษาสมบัติทางกายภาพ.....14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลกาทดลอง.....17

4.1 การประเมินประสิทธิภาพในการรักษาอุณหภูมิ.....17

4.2 ประสิทธิภาพการเก็บรักษาผัก.....20

4.2.1 อุณหภูมมิที่ตำแหน่งเหนือผัก.....20

4.2.2 การสูญเสียมวล.....21

4.2.3 การเปลี่ยนแปลงสีสี.....23

4.2.4 เนื้อสัมผัส.....26

4.2.5 ลักษณะปรากฏ.....27

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 29

5.1 สรุปผลการวิจัย.....29

5.2 ข้อเสนอแนะ.....29

บรรณานุกรม.....30

ภาคผนวก ก.....32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ขนาดผนังของตู้แช่แสดงสินค้า 12

ตารางที่ 2 สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Çengel and Ghajar, 2020) 13

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการรักษาอุณหภูมิของตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง 19

ตารางที่ 4 ภาระทางความร้อนของตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 แผนภาพของตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง 5

(ก) กรณีมีฝาปิดและ (ข) กรณีไม่มีฝาปิด

รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล (a) มุมมองด้านหน้าและ (b) มุมมองด้านบน 7

รูปที่ 3 ตำแหน่งการวางผลิตภัณฑ์ (a) กรณีควบคุมและ (b) ตู้แช่แสดงสินค้า 7

รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในตู้แช่แสดงสินค้า (มีผลิตภัณฑ์) 8

รูปที่ 5 แผนภาพแสดงภาระทางความร้อนของตู้แช่แสดงสินค้า 8

รูปที่ 6 ตำแหน่งการวัดสี 14

รูปที่ 7 ตำแหน่งการวัดเนื้อสัมผัส 15

รูปที่ 8 สนามอุณหภูมิบนระนาบกลางตามแนวขวาง 17

(x = 300 mm) และแนวยาว (y= 450 mm) ของตู้แช่แสดงผลแบบเปิดที่

ระดับความสูงที่แตกต่างกัน (a) 500 mm (b) 750 mm (c) 1000 mm

อุณหภูมิแวดล้อมอยู่ในช่วง 26-27 °C และอุณหภูมิน้ำแข็งอยู่ที่ 0.1 °C

รูปที่ 9 สนามอุณหภูมิบนระนาบกลางตามแนวขวาง 18

(x = 300 mm) และแนวยาว (y= 450 mm) ของตู้แช่แสดงผลแบบปิดที่

ระดับความสูงที่แตกต่างกัน (a) 500 mm (b) 750 mm (c) 1000 mm

อุณหภูมิแวดล้อมอยู่ในช่วง 26-27 °C และอุณหภูมิน้ำแข็งอยู่ที่ 0.1 °C

รูปที่ 10 อุณหภูมิของอากาศและผลิตภัณฑ์ภายในและภายนอกของตู้แช่แสดงสินค้า 20

แบบไม่มีฝาปิด (a) การทดลองครั้งที่ 1 (b) การทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 11 อุณหภูมิของอากาศและผลิตภัณฑ์ภายในและภายนอกของตู้แช่แสดงสินค้า แบบมีฝาปิด (a) การทดลองครั้งที่ 1 (b) การทดลองครั้งที่ 2 20

รูปที่ 12 ร้อยละการสูญเสียมวลของตัวอย่างจัดเก็บในตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิด และกรณีควบคุม 21

รูปที่ 13 ร้อยละการสูญเสียมวลของตัวอย่างจัดเก็บในตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิด และกรณีควบคุม 22

รูปที่ 14 ค่า L* a* และ b* ของผลิตภัณฑ์ที่จัดเก็บในตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิด และกรณีควบคุม (a) การทดลองครั้งที่ 1 (b) การทดลองครั้งที่ 2 23

รูปที่ 15 ค่า L* a* และ b* ของผลิตภัณฑ์ที่จัดเก็บในตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิด และกรณีควบคุม (a) การทดลองครั้งที่ 1 (b) การทดลองครั้งที่ 2 24

รูปที่ 16 แรงสูงสุดที่ใช้ในการเจาะตัวอย่าง ที่จัดเก็บในตู้แช่แสดงสินค้า (a) เงื่อนไขแบบไม่มีฝาปิด (b) เงื่อนไขแบบมีฝาปิด 26

รูปที่ 17 ลักษณะปรากฏของตัวอย่างเงื่อนไขตู้แบบไม่มีฝาปิด (a) ภายในตู้ (b) กรณีควบคุม 27

รูปที่ 18 ลักษณะปรากฏของตัวอย่างเงื่อนไขตู้แบบมีฝาปิด (a) ภายในตู้ (b) กรณีควบคุม 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการ เหตุผล และที่มาของปัญหา

ตลาดสดมีอยู่ทั่วไปในประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ส่วนใหญ่ รวมถึงประเทศไทย แม้ว่าจะมีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ และการแพร่กระจายของร้านค้าปลีกสมัยใหม่ (เช่น ซูเปอร์มาเก็ต) แต่ตลาดสดแบบดั้งเดิมก็ยังคงเป็นที่แพร่หลายทั่วไปประเทศ (Ortiz-Gonzalo et al., 2021) ในปี 2559 ตลาดสดมียอดขายคิดเป็น 54% ของยอดขายทั้งหมดในประทศไทย (Poapongsakorn et al., 2019)

ในตลาดสดผักและผลไม้มักถูกวางขายที่อุณหภูมิแวดล้อม (ประมาณ 30-35 °C ในช่วงกลางวัน) อุณหภูมิสูงเช่นนี้ทำให้เป็นการกระตุ้นการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และเร่งการเสื่อมคุณภาพของผักและผลไม้ทำให้เน่าเสียและสูญเสียอาหารในที่สุด การใช้ตู้แช่เย็นที่ใช้กันทั่วไปในซูเปอร์มาเก็ตจะเป็นทางออกที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหานี้ แต่อาจจะไม่เหมาะกับพ่อค้าแม่ค้าในตลาดสด เนื่องจากต้นทุนที่สูงและมีค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น ค่าไฟฟ้า นอกจากนี้พื้นที่หน้าร้านยังมีจำกัดและมีเคาน์เตอร์ที่ติดตั้งถาวรอยู่แล้วจึงมีพื้นที่ไม่เพียงพอที่จะติดตั้งตู้แช่เย็น นวัตกรรมในการทำความเย็นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่สามารถช่วยลดขยะจากการเน่าเสียของอาหารระหว่างการขายปลีกในตลาดสดได้

ในการศึกษานี้จึงเสนอตู้แช่แสดงสินค้าที่ทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง ซึ่งตู้มีโครงสร้างที่เรียบง่ายทำให้ง่ายต่อการติดตั้งบนเคาน์เตอร์ที่ตลาดสด และใช้น้ำแข็งเป็นตัวกลางในการให้ความเย็นเพราะสามารถหาได้ง่าย โดยใช้น้ำแข็งใส่ในภาชนะรองรับและติดตั้งด้านบนของตู้ ด้วยวิธีนี้ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนตามธรรมชาติและการไหลเวียนของอากาศจากความหนาแน่นที่ต่างกัน จึงเพิ่มความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในตู้

ในทางทฤษฎี ช่องว่างในกล่องปิดจะมีการแบ่งชั้นของอุณหภูมิคงที่และการไหลของอากาศจะนิ่งเมื่อผนังแนวนอนด้านล่างเย็นและผนังด้านอื่นร้อนหรือมีฉนวนสมบูรณ์ (อะเดียแบติก) และเมื่อผนังแนวนอนด้านบนเย็นการไหลของอากาศที่ไม่เสถียรจะเกิดขึ้นเนื่องจากมีการไล่ระดับความหนาแน่นเนื่องจากอุณหภูมิ ในที่สุดการไหลของอากาศก็จะคงที่และมีลักษณะเหมือนเซลลูลาร์ที่สภาวะสมดุล และเมื่อผนังด้านข้างแนวตั้งเย็นการไหลจะเป็นวงกลมที่แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งจะคล้ายกับที่มักพบในตู้เย็นที่ใช้กันทั่วไป เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วเครื่องระเหยจะถูกแทรกเข้าไปในผนังด้านหลังแนวตั้ง (Laguerre, 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อสร้างต้นแบบตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็งเพื่อเก็บรักษาผักระหว่างการค้าปลีกที่ตลาดสด
2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็งในด้านของการรักษาอุณหภูมิ และด้านการรักษาคุณภาพผัก

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1) ต้นแบบตู้แช่แสดงสินค้ามีความกว้าง 0.98 m ความลึก 0.68 m และความสูงสูงสุด 1.0 m ผนังด้านบนของตู้ทำเป็นถาดบรรจุน้ำแข็ง
2) ตัวกลางทำความเย็นที่ใช้ในตู้คือ น้ำแข็งบด
3) ผักที่ใช้เป็นกรณีศึกษาคือ คะน้าที่ซื้อจากตลาดสด
4) กรณีตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิดด้านหน้าศึกษาภายใต้สภาวะปิดเท่านั้น
5) ประสิทธิภาพของตู้แช่แสดงสินค้าพิจารณาเฉพาะด้านความสามารถในการรักษาอุณหภูมิและการเก็บรักษาคุณภาพของผัก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้ต้นแบบตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็งเพื่อเก็บรักษาผักระหว่างการค้าปลีกที่ตลาดสด ซึ่ง ถือเป็นการยกระดับมาตรฐานแผงขายผักในตลาดสดในเชิงคุณภาพของสินค้าที่ดีขึ้นและในเชิงความมั่นคง อาหารที่การสูญเสียอาหารลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ตรวจเอกสาร

2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การพาความร้อน (Convection) คือการถ่ายเทพลังงานระดับโมเลกุล เมื่อของไหลมาสัมผัสกับพื้นผิววัตถุที่เป็นของแข็ง เช่น พื้นผิวของผนัง เป็นต้น การแลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างของแข็งกับของไหล เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิของของแข็งและของไหล โดยการถ่ายเทความร้อนนั้นจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหลของของไหล ชนิดของของไหลและความขรุขระของผิวของวัตถุ) พื้นที่ของวัตถุที่ตั้งฉากกับการถ่ายเทความร้อนและความแตกต่างของอุณหภูมิของวัตถุและของไหล โดยจะแบ่งการพาความร้อนได้ 2 ลักษณะคือ 1. การพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Free or natural convection) 2. การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ซึ่งการพาความร้อนแบบอิสระจะเป็นการใช้หลักการความแตกต่างของความหนาแน่นซึ่งของไหลที่มีความหนาแน่นน้อยจะไหลขึ้นข้างบนและของไหลที่มีความหนาแน่นน้อยจะไหลลงข้างล่างสลับกันเป็นวงจร และการพาความร้อนแบบบังคับจะมีการใช้อุปกรณ์ภายนอกมาช่วยในการไหล เช่น ปั๊มหรือพัดลม

การพาความร้อนแบบอิสระ เป็นหลักการความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลซึ่งของไหลที่มีความหนาแน่นน้อยจะไหลขึ้นด้านบนและของไหลที่มีความหนาแน่นมากจะไหลลงด้านล่าง ตัวอย่างเช่น การวางวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงในห้องที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าวัตถุ อุณหภูมิภายนอกวัตถุหรือผิววัตถุจะต่ำลงและอุณหภูมิของอากาศที่ติดกับผิววัตถุจะสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของอากาศส่วนที่ติดกับผิววัตถุสูงขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของอากาศส่วนที่ติดกับผิววัตถุต่ำลง มีการแทนที่ด้วยอากาศที่มีความหนาแน่นมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material, PCM) คือวัสดุที่สามารถดูดซับหรือคายพลังงานความร้อนปริมาณมากในขณะที่เปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่งระหว่าง แก๊ส ของเหลวและของแข็ง โดยส่วนใหญ่มักเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งและของเหลว เมื่ออุณหภูมิภายนอกถึงจุดหลอมเหลวของวัสดุเปลี่ยนสถานะ วัสดุในสถานะของแข็งจะเริ่มดูดความร้อนเข้าไปและเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิคงที่ เช่นเดียวกับในกรณีที่วัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอยู่ในสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดแข็งตัวก็จะมีการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งและคายพลังงานความร้อนออกมา

กล่องฉนวนสามารถเก็บความเย็นไว้ที่ 7-9 °C เป็นเวลาประมาณ 13 ชั่วโมง และที่ -2-0 °C เป็นเวลาประมาณ 14 ชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากล่องฉนวนกันความร้อนสำหรับการจัดเก็บหลายอุณหภูมิที่ออกแบบมาเป็นอุปกรณ์การขนส่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับการขนส่งแบบรักษาอุณหภูมิ (Xiaofeng and Xuelai, 2020)

ตำแหน่งการให้ความร้อนหรือความเย็นในแนวดิ่งมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการพาความร้อน ความเร็วของของไหลและอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในภาชนะ โดยอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีค่ามากขึ้นเมื่อ Grashof number, ความเป็นรูพรุน และ Darcy number มากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะลดลงเมื่ออัตราส่วนความกว้างและความสูงเพิ่มขึ้น (Bhuvaneswari, et al., 2011)

ผลของวัสดุเปลี่ยนสถานะชนิด trans critical CO_2 ต่อความแปรปรวนของอุณหภูมิในตู้แช่ของร้านสะดวกซื้อ พบว่าเมื่อ วัสดุเปลี่ยนสถานะอยู่ในตำแหน่งด้านหลังของตู้แช่ทำให้มีความแปรปรวนของอุณหภูมิมากกว่า วัสดุเปลี่ยนสถานะอยู่ที่ตำแหน่งชั้นวางของตู้แช่ ในด้านพลังงาน วัสดุเปลี่ยนสถานะที่ตำแหน่งด้านหลังของตู้แช่มีการใช้พลังงานมากกว่า วัสดุเปลี่ยนสถานะที่วางไว้ที่ตำแหน่งชั้นวางของตู้แช่ ดังนั้นตำแหน่งการวาง PCM นั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการใช้พลังงาน (Yilmaz et at., 2020)

ถ้ามีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของกล่องน้อย (AR = 1 และ 2) กระแสการไหลของอากาศที่แยกออกจากกระแสหลัก จะเกิดขึ้นที่ระหว่าง Rayleigh number (Ra) = 10^7 และ 2×10^7 และมีความยาวของกระแสประมาณ H/2 โดยขนาดจะลดลงเมื่อ Ra เพิ่มขึ้น (ที่ Ra = 1.5×10^8 จะมีความยาวกระแส H/4) และที่อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของกล่องมาก ก็จะมีพื้นที่ว่างที่จำกัดสำหรับการไหลของอากาศที่แยกออกจากกระแสหลัก โดยเมื่อ AR เพิ่มขึ้น ไม่เพียงแต่ใช้ Ra ที่สูงในการเกิดกระแสที่แยกออกจากกระแสหลัก แต่ยังพัฒนาให้ไม่มีกระแสการไหลของอากาศที่แยกออกจากกระแสหลักได้ (Xin and Le Que´re, 2005)

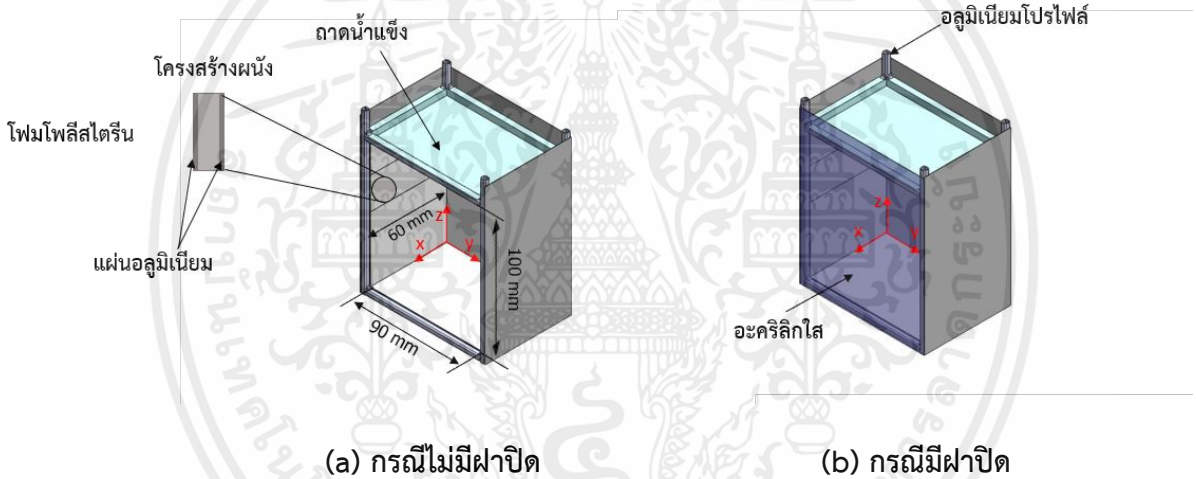
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และการทดลอง

3.1 ชุดทดลอง

ต้นแบบตู้แช่แสดงสินค้า แสดงดังรูปที่ 1 ใช้อลูมิเนียมโปรไฟล์เป็นโครงสร้าง และโฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene foam) ที่ปิดด้วยแผ่นอลูมิเนียมเป็นผนังด้านซ้าย ขวา ล่าง และด้านหลังตู้ ในขณะที่ด้านหน้าของตู้ปิดด้วยแผ่นอะคริลิกใส ถาดสังกะสีใช้เป็นภาชนะรองรับน้ำแข็งที่เป็นตัวกลางให้ความเย็น โดยน้ำแข็งจะส่งความเย็นผ่านถาดสังกะสีด้วยหลักการการนำความร้อน ไปยังอากาศด้านล่างของตู้ด้วยหลักการการพาความร้อนแบบธรรมชาติ



รูปที่ 1 แผนภาพของตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง (a) กรณีไม่มีฝาปิดและ (b) กรณีมีฝาปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การประเมินประสิทธิภาพการรักษาอุณหภูมิภายในตู้เปล่า

การวัดอุณหภูมิภายในตู้เปล่าใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด ที (Thermocouple T-type) ความแม่นยำ ±0.5 °C เส้นผ่านศูนย์กลางหัววัด (Probe) 0.3 mm เทอร์โมคัปเปิลจำนวน 9 เส้นติดตั้งกับเสาที่เลื่อนได้ โดยขนาดระยะห่างระหว่างสายเทอร์โมคัปเปิลแต่ละเส้นคือ 60 95 และ 120 mm เมื่อถาดอยู่ที่ความสูง 500 750 และ 1000 mm ตามลำดับ เทอร์โมคัปเปิลติดตั้งไว้ที่ด้านล่างของถาดและภายในถาดเพื่อวัดอุณหภูมิที่พื้นผิวของถาดและอุณหภูมิน้ำแข็ง ตามลำดับ เทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดเชื่อมต่อกับระบบบันทึกข้อมูล (Keysight Technologies DAQ970A/DAQM901A) เพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิภายในตู้ใช้วิธีการเลื่อนเสาจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งบนระนาบกึ่งกลางตามแนวยาวแนวกว้างของตู้ การวัดเริ่มต้นที่ 30 นาทีหลังจากใส่น้ำแข็งในถาด การวัดแต่ละครั้งใช้เวลา 5 นาที แล้วจึงเลื่อนเสาเพื่อวัดจุดต่อไปเรื่อยๆ โดยเก็บค่าอุณหภูมิทุก ๆ 10 วินาที เป็นเวลา 5 นาที ค่าเฉลี่ยตลอด 5 นาที ได้มาสร้างแผนภาพการกระจายอุณหภูมิโดยใช้โปรแกรม MATLAB การทดลองทั้งหมดดำเนินการในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะอากาศแวดล้อมที่อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 26-27 °C และ 60-70 %RH ตามลำดับ ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ สำหรับตู้แบบมีฝาปิดและไม่มีฝาปิด

การประเมินประสิทธิภาพการรักษาอุณหภูมิพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิภายในตู้ และการกระความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Non-uniformity) (Qiet al, 2022) คำนวณได้จาก

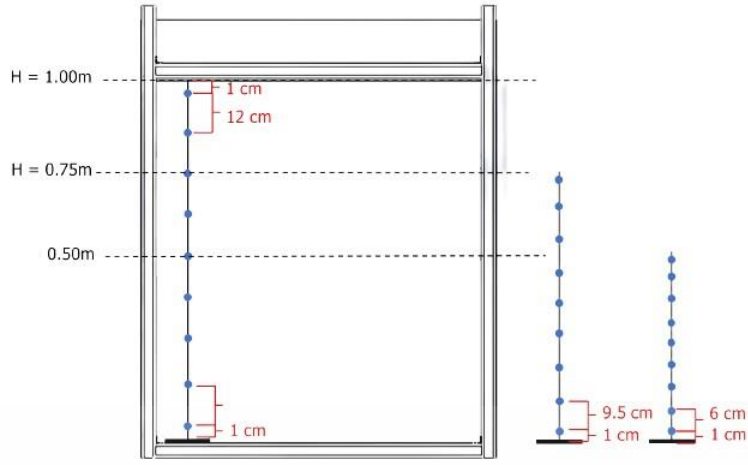
$$I_U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(T_j - T_m)^2}}{T_m} \quad (1)$$

โดย I_U คือ ค่าความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิโดยค่าน้อยแสดงถึงการกระจายอุณหภูมิที่มีความสม่ำเสมอมาก [-]

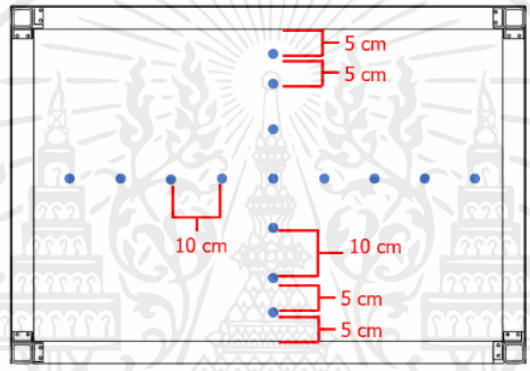
T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของทุกตำแหน่งที่วัดทั้งหมด [°C หรือ K]

T_j คือ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง j [°C หรือ K]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

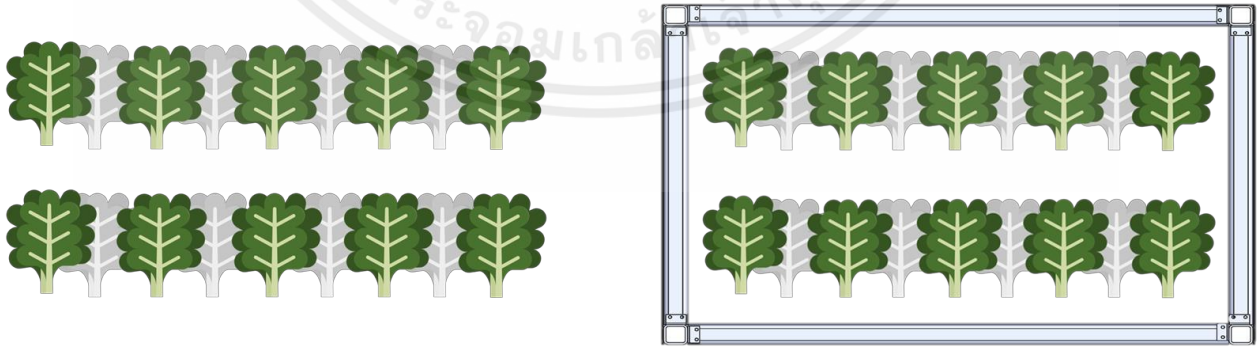


(a) มุมมองด้านหน้า



(b) มุมมองด้านบน

รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล (a) มุมมองด้านหน้าและ (b) มุมมองด้านบน

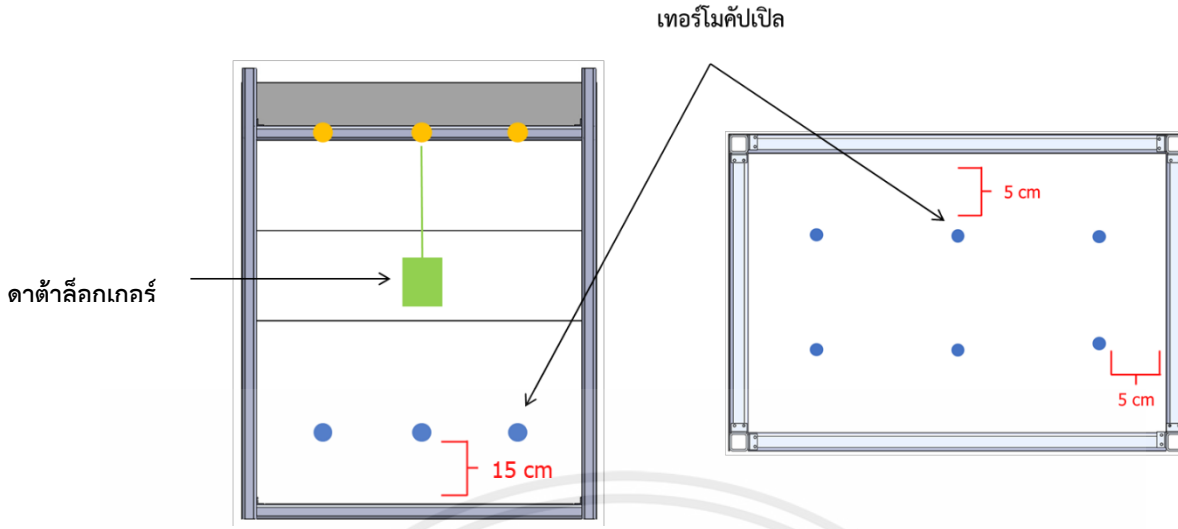


(a) กรณีควบคุม

(b) ตู้แช่แสดงสินค้า

รูปที่ 3 ตำแหน่งการวางผลิตภัณฑ์ (a) กรณีควบคุมและ (b) ตู้แช่แสดงสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

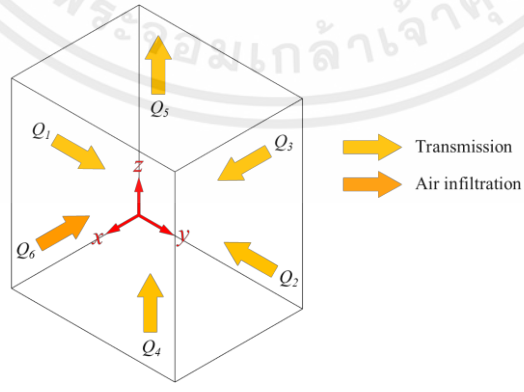


รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในตู้แช่แสดงสินค้า (มีผลิตภัณฑ์)

3.2.2 การคำนวณภาระทางความร้อน

ภาระทางความร้อนในตู้แช่แสดงสินค้า ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) ความร้อนจากการส่งผ่านความร้อนผ่านผนัง (Heat transmission) และ (2) ความร้อนจากการไหลเข้ามาของอากาศภายนอก (Air infiltration) แสดงดังรูปที่ 6 ดังนี้ ผลรวมของภาระทางความร้อนทั้งหมด หาจาก

$$Q_T = \sum_{i=1}^{6} Q_i \quad (2)$$



รูปที่ 5 ภาระทางความร้อนของตู้แช่แสดงสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณหาค่าภาระทางความร้อนในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1) ความร้อนจากการส่งผ่านความร้อนผ่านผนัง

อัตราการส่งผ่านความร้อนผ่านผนังแต่ละด้าน คำนวณจาก

$$Q_j = U_j A_{s,j}(T_{ext} - T_{int}) \quad (3)$$

โดย U_j คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) ของผนังด้านที่ j เมื่อ $j \in [1,6]$

$A_{s,j}$ คือพื้นที่ผิว (Surface area, m^2) ของผนังด้านที่ j

T_{ext} และ T_{int} คืออุณหภูมิของอากาศภายนอกและภายในตู้แช่ (°C หรือ K) ตามลำดับ

เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่ได้พิจารณาการเปิดและปิดฝาปิดด้านหน้าของตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิด ดังนั้น ภาระทางความร้อนในตู้แช่แบบนี้เกิดจากการส่งผ่านความร้อนผ่านผนังทั้งหมด นั่นคือ $j \in [1,6]$ ในขณะที่ตู้แช่แบบไม่มีฝาปิด ภาระทางความร้อนที่เกิดจากการส่งผ่านความร้อนผ่านผนังด้านที่ 1-5 เท่านั้น นั่นคือ $j \in [1,5]$

สำหรับตู้แช่แสดงสินค้าทั้งสองแบบ ผนังด้านที่ 1 ถึง 3 มีโครงสร้างเหมือนกันคือ ฉนวนกันความร้อนชนิดพอลิสไตรีน (Expanded Polystyrene, EPS) ความหนาแน่น 32 $kg \cdot m^3$ ความหนา 40 mm ประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียม ความหนา 0.5 mm ทั้งสองด้านของฉนวน ส่วนผนังด้านที่ 4 (พื้น) ฉนวนกันความร้อนปิดด้วยแผ่นอลูมิเนียม ความหนา 0.5 mm เฉพาะด้านบน ผนังด้านที่ 5 คือ ถาดใส่น้ำแข็งทำจากเหล็กเคลือบสังกะสี ความหนา 2 mm สำหรับตู้แช่แบบมีฝาปิด (ผนังด้านที่ 6) ฝาปิดทำจากแผ่นอะคริลิค ความหนา 2 mm

ข้อมูลโครงสร้างผนังนี้สามารถสร้างเป็นสมการวงจรความต้านทานความร้อนเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังแต่ละด้านได้ดังนี้

ผนังด้านที่ 1 ถึง 3

$$U_j = \frac{1}{\frac{1}{h_{ext}} + \frac{2e_{al}}{k_{al}} + \frac{e_{eps}}{k_{eps}} + \frac{1}{h_{int}}} \qquad \text{เมื่อ } j \in [1,3] \quad (4)$$

ผนังด้านที่ 4

$$U_j = \frac{1}{\frac{e_{al}}{k_{al}} + \frac{e_{eps}}{k_{eps}} + \frac{1}{h_{int}}} \qquad \text{เมื่อ } j \in [4] \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนังด้านที่ 5

$$U_j = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{e_{st}}{k_{st}}} \qquad \text{เมื่อ } j \in [5] \tag{6}$$

ผนังด้านที่ 6 (สำหรับตู้แบบมีฝาปิด)

$$U_j = \frac{1}{\frac{1}{h_{ext}} + \frac{e_{ac}}{k_{ac}} + \frac{1}{h_{int}}} \qquad \text{เมื่อ } j \in [6] \tag{7}$$

โดย e_{ac} คือ ความหนาของอะคริลิก [mm]

e_{al} คือ ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม [mm]

e_{eps} คือ ความหนาของโฟม [mm]

e_{st} คือ ความหนาของเหล็กชุบสังกะสี [mm]

h_{ext} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกตู้แช่แสดงสินค้า [W·m^{-2}·K^{-1}]

h_{int} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในตู้แช่แสดงสินค้า [W·m^{-2}·K^{-1}]

k_{al} คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอลูมิเนียม [W·m^{-1}·K^{-1}]

k_{eps} คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโฟม [W·m^{-1}·K^{-1}]

k_{st} คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กชุบสังกะสี [W·m^{-1}·K^{-1}]

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอก (External convective heat transfer coefficient, h_{ext}) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10 W·m^{-2}·K^{-1} (ASHRAE, 2018) ในขณะที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายใน (Internal convective heat transfer coefficient, h_{int}) สำหรับการไหลที่มีผิวเย็นด้านบน ในช่วง $10^5 < Ra < 10^{11}$ คำนวณจาก (Çengel and Ghajar, 2020)

$$Nu = \frac{h\left(\frac{A_s}{p}\right)}{k} = 0.27Ra^{\frac{1}{4}} \tag{8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_s - T_{int})\left(\frac{A_s}{p}\right)^3}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2} \cdot \frac{c_p \mu}{k} \quad (9)$$

โดย Nu คือ Nusselt number [-]

Ra คือ Rayleigh number [-]

Pr คือ Prandtl number [-]

Gr คือ Grashof number [-]

A_s คือ พื้นผิวของผนังเย็น [m^2]

p คือเส้นรอบวงของผนังเย็น [m]

β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของอากาศ [K^{-1}]

c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก [9.81 $m \cdot s^{-2}$]

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ [$kg \cdot m^{-3}$]

μ คือ ความหนืดพลวัตของอากาศ [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]

T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิวเย็น [°C หรือ K]

2) ความร้อนจากการไหลเข้ามาของอากาศภายนอก

ความร้อนจากการรั่วเข้าของอากาศภายนอก คำนวณจาก

$$Q_{inf} = \dot{m}_{inf}(H_{ext} - H_{int}) \quad (10)$$

โดย H_{ext} และ H_{int} คือเอนทัลปีของอากาศภายนอกและภายในตู้แช่ [$J \cdot kg^{-1}$] หาจาก

$$H = c_p T \quad (11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการรั่วเข้าของอากาศภายนอกตอนเปิดประตู ($\dot{m}_{inf}$ หน่วย kg/s) ประมาณได้จากสมการของ Gosney and Olama (1975) ดังนี้

$$\dot{m}_{inf} = 0.221 \cdot (W \cdot H) \cdot (gH)^{0.5} \cdot \rho_{int} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{ext}}{\rho_{int}}\right)^{0.5} \quad (12)$$

โดย W และ H คือความกว้างและความสูงของช่องเปิด [m]

ρ_{int} และ ρ_{ext} คือความหนาแน่นของอากาศภายในและภายนอกตู้แช่ [kg·m^{-3}]

ขนาดผนังของตู้แช่แสดงสินค้าและสมบัติทางความร้อนของวัสดุสรุปในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ขนาดผนังของตู้แช่แสดงสินค้า

ผนัง	ความกว้าง [m]	ความสูง [m]	พื้นที่ [m^2]
ผนังด้านที่ 1 และ 2	0.6	0.5	0.6
	0.6	0.75	0.9
	0.6	1.0	1.2
ผนังด้านที่ 3 และ 6	0.9	0.5	0.9
		0.75	1.35
		1.0	1.82
ผนังด้านที่ 4 และ 5	0.6	0.9	1.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 สมบัติทางความร้อนของวัสดุ

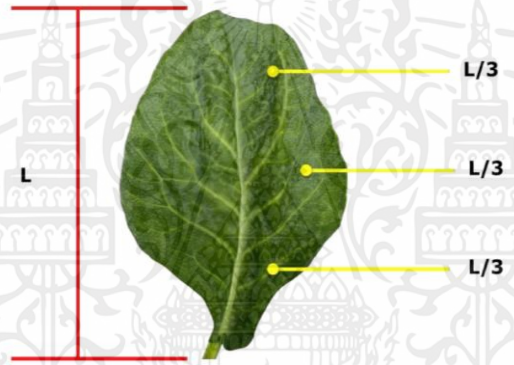
วัสดุ	ρ [kg·m^{-3}]	c_p [J·kg^{-1}·K^{-1}]	k [W·m^{-1}·K^{-1}]
น้ำแข็ง (0.1 °C)	920	2040	1.88
เหล็กชุบสังกะสี	7800	470	52
โฟมพอลิสไตรีน	16	1200	0.04
อลูมิเนียม	2770	875	177
อะคริลิค	1190	1465	0.19
อากาศ (15 °C) μ = 1.802 × 10^{-5} kg·m^{-1}·s^{-1} Pr = 0.7323 β = 3.5 × 10^{-3} K^{-1}	1.225	1007	0.02746
อากาศ (25 °C) μ = 1.849 × 10^{-5} kg·m^{-1}·s^{-1} Pr = 0.7296 β = 3.38 × 10^{-3} K^{-1}	1.184	1007	0.02551

(Çengel and Ghajar, 2020)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การประเมินประสิทธิภาพการเก็บรักษาคุณภาพของผัก

ตู้แช่แสดงสินค้าที่มีความสูงของถามิเฉลี่ยต่ำสุดและมีความสม่ำเสมอสูงสุดทั้งแบบเปิดและแบบปิด ได้นำมาประเมินประสิทธิภาพการเก็บรักษาผักโดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผักคะน้า *(Brassica oleracea)* ตัวอย่างซื้อมาจากตลาดสดใกล้ห้องปฏิบัติการ (ลาดกระบัง กรุงเทพฯ ประเทศไทย) ตัวอย่างคัดแยกตามความสม่ำเสมอของน้ำหนักอยู่ระหว่าง 140-150 g ความยาวลำต้น 250-350 mm และลักษณะที่ปรากฏ (ไม่มีข้อบกพร่องหรือโรค) โดยจะเตรียมผักทั้งหมด 20 กลุ่ม ผักจำนวน 10 กลุ่มแช่ไว้ในตู้แช่ (ดังรูปที่ 3) และอีก 10 กลุ่ม แช่ไว้นอกตู้ภายใต้สภาวะบรรยากาศ จากนั้นสุ่มตัวอย่าง กลุ่มละ 2 ต้น เพื่อวัดสีใบที่ใหญ่ที่สุดของก้านนั้นโดยใช้เครื่องวัดสี (Miniscan EZ) ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ที่ตำแหน่งบนสุดของใบ กลางใบ และปลายใบ โดยวัดให้ห่างจากก้านเป็นระยะ 1 cm ค่าสีที่ได้จะอยู่ในรูปของค่า L*, a* และ b*



รูปที่ 6 ตำแหน่งการวัดสี

นำตัวอย่างที่คัดแยกตามความสม่ำเสมอของน้ำหนักอยู่ระหว่าง 140-150 g มาจัดเป็นกลุ่มชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของแต่ละกลุ่ม โดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.01 g (Shimadzu UX-3200G) โดยจะเตรียมผักทั้งหมด 20 กลุ่ม ผักจำนวน 10 กลุ่มแช่ไว้ในตู้แช่ และอีก 10 กลุ่ม แช่ไว้นอกตู้ภายใต้สภาวะบรรยากาศ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการขายสินค้าในตลาดสด) นำข้อมูลไปคำนวณหาร้อยละการสูญเสียมวลตามสมการที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%ML = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100 \quad (13)$$

โดย $\%ML$ คือ ร้อยละการสูญเสียมวล [%]

M_0 คือ มวลเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ [g]

M คือ มวลของผลิตภัณฑ์ [g]

คัดตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางก้านประมาณ 1 cm จาก 10 กลุ่มแช่ไว้ในตู้แช่ และอีก 10 กลุ่มแช่ไว้นอกตู้ภายใต้สภาวะบรรยากาศ กลุ่มละ 5 ตัวอย่าง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิว TA-XT plus ความเร็ว 3 มิลลิเมตร/วินาที ความละเอียดของแรงคือ 0.01 นิวตัน ความแม่นยำคือ 0.025% การทดสอบการเจาะทะลุของตัวอย่างในแนวรัศมีโดยใช้หัวโพรบสแตนแลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ที่ตำแหน่ง 3 cm โดยวัดจากโคนก้าน และพารามิเตอร์ถูกคำนวณโดยใช้ซอฟต์แวร์ Exponent

รูปที่ 7 ตำแหน่งการวัดเนื้อสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างการจัดเก็บในตู้แช่แสดงสินค้า เทอร์โมคัปเปิล 9 เส้นจะถูกใส่เข้าไปในกลุ่มตัวอย่างในตู้แช่แสดงสินค้า (6 กลุ่ม) และกรณีควบคุม (ผลิตภัณฑ์ที่สภาวะบรรยากาศ 3 กลุ่ม) เพื่อวัดอุณหภูมิของตัวอย่าง และมีเทอร์โมคัปเปิลที่ติดไว้เหนือผัก 1 cm เพื่อวัดอุณหภูมิอากาศที่อยู่ใกล้ตัวอย่าง มีการวัดความชื้นสัมพัทธ์ทั้งภายในและภายนอกของตู้ด้วยไฮโกรมิเตอร์ (Testo 176H1, ความแม่นยำ +-3 %RH ที่ช่วง 2 ถึง 98 %RH) และระหว่างการแช่ตู้แช่เย็นจะติดไฮโกรมิเตอร์ (Testo 174H, ความแม่นยำ +-2 %RH ที่ช่วง 2 ถึง 98 %RH) ที่ชั้นบน กลางและล่างของตู้เพื่อดูอุณหภูมิอากาศว่ามีอุณหภูมิสม่ำเสมอทุกชั้น

มีการถ่ายภาพตัวอย่างเพื่อให้มองเห็นภาพรวม จากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดใส่ตะกร้า คลุมถุงพลาสติกและเก็บไว้ในตู้แช่เย็นสำหรับห้องปฏิบัติการ (Accuplus Smart i250) ที่อุณหภูมิ 8 °C (จำลองตามการเก็บในครัวเรือน) จากนั้นจะวัดคุณภาพแบบเดิมทุกๆ 2 วัน เป็นเวลา 5 วัน

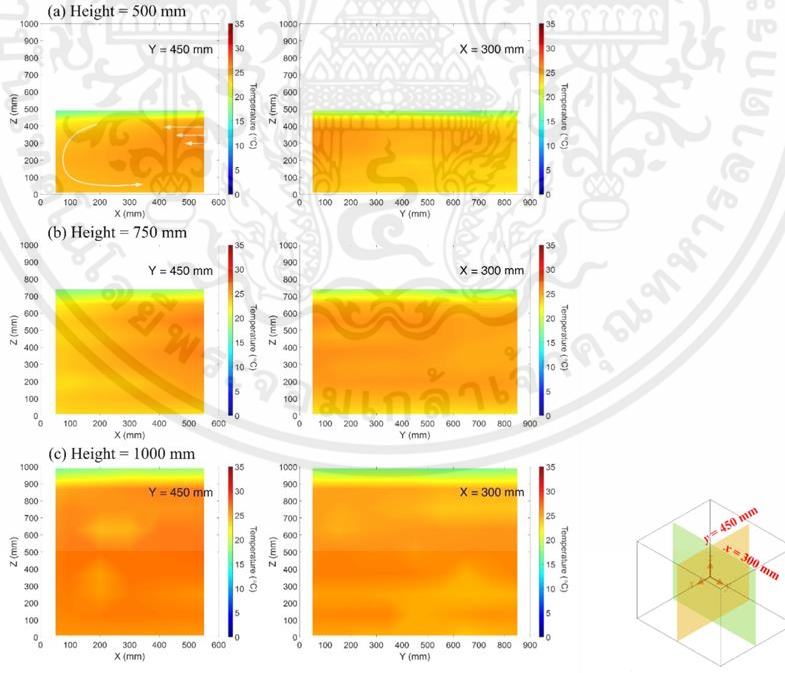
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผล

4.1 การประเมินประสิทธิภาพในการรักษาอุณหภูมิ

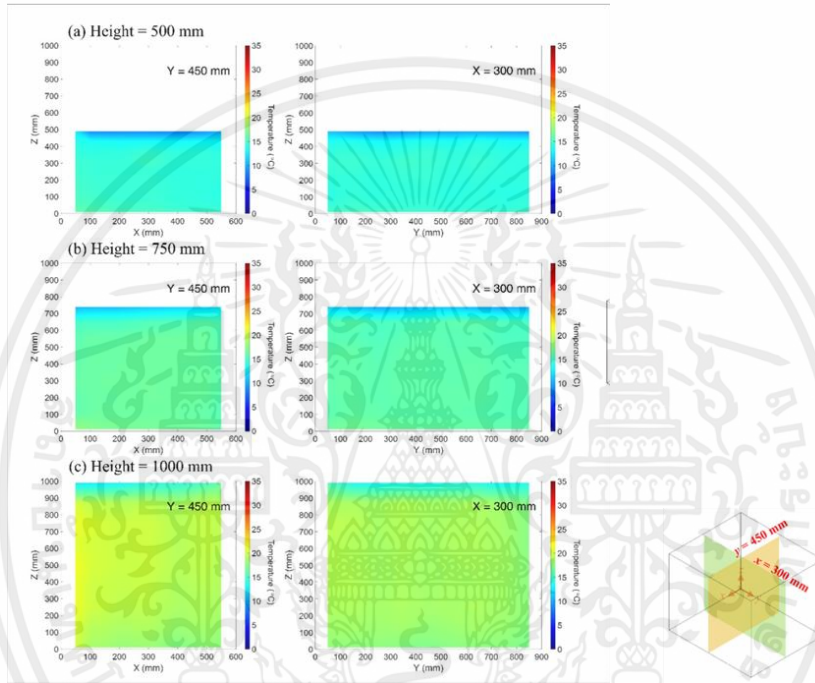
การกระจายอุณหภูมิบนระนาบกึ่งกลางตามแนวกว้าง (x = 300 mm) และตามแนวยาว (y = 450 mm) ในตู้แช่แสดงสินค้าที่ไม่ปิดฝาและความสูงของถาดอยู่ที่ 500 750 และ 1000 mm แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าอากาศที่ระยะ 100 mm จากใต้ถาดมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับอากาศที่ระยะห่างออกไป อากาศที่ระยะมากกว่า 100 mm จากใต้ถาดมีอุณหภูมิที่แตกต่างกับอุณหภูมิแวดล้อมน้อยมาก (ประมาณ 1-3 ℃) เมื่อพิจารณาอากาศด้านซ้ายและด้านขวาของตู้พบว่าอุณหภูมิไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน (น้อยกว่า 1 ℃) ซึ่งแปลว่าการกระจายอุณหภูมิมีความสมมาตรกัน อย่างไรก็ตามอุณหภูมิอากาศด้านหน้าและด้านหลังแตกต่างกันประมาณ 1-2 ℃ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความสูงของถาดต่ำ ซึ่งอธิบายได้จากการไหลของอากาศเนื่องจากการพาความร้อนตามธรรมชาติและการแทนที่ของอากาศภายนอก กล่าวคืออากาศเย็นจากด้านบนไหลไปด้านล่างโดยการแทนที่ของอากาศร้อนจากช่องเปิดด้านหน้า



รูปที่ 8 สนามอุณหภูมิบนระนาบกลางตามแนวขวาง (x = 300 mm) และแนวยาว (y= 450 mm) ของตู้แช่แสดงผลแบบเปิดที่ระดับความสูงที่แตกต่างกัน (a) 500 mm (b) 750 mm (c) 1000 mm อุณหภูมิแวดล้อมอยู่ในช่วง 26-27 ℃ และอุณหภูมิน้ำแข็งอยู่ที่ 0.1 ℃

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิดดังรูปที่ 9 พบว่าอากาศที่ระยะ 100 mm จากใต้ถาดมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับอากาศที่ระยะห่างออกไป อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่วัดได้ในตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิดนั้นต่ำกว่าที่วัดได้ในตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิด ที่ความสูงของถาด 500 mm เมื่ออุณหภูมิของอากาศภายในต่ำกว่าอุณหภูมิแวดล้อม (26-27 °C โดยเฉลี่ย) อย่างน้อย 10 °C เมื่อที่ถาดมีความสูงมากขึ้นอุณหภูมิอากาศภายในก็สูงขึ้นด้วยเนื่องจากพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้น การกระจายอุณหภูมิมีความสมมาตรทั้งบนระนาบตามแนวกว้างและตามแนวยาวของตู้ เนื่องจากการแทนที่ของอากาศภายนอกน้อยลงเพราะมีฝาปิด



รูปที่ 9 สนามอุณหภูมิบนระนาบกลางตามแนวขวาง (x = 300 mm) และแนวยาว (y= 450 mm) ของตู้แช่แสดงผลแบบมีฝาปิดที่ระดับความสูงที่แตกต่างกัน (a) 500 mm (b) 750 mm (c) 1000 mm อุณหภูมิแวดล้อมอยู่ในช่วง 26-27 °C และอุณหภูมิน้ำแข็งอยู่ที่ 0.1 °C

โดยทั่วไปผักที่วางขายในตลาดมักวางทับกันสูงไม่เกิน 300 mm เพื่อหลีกเลี่ยงการช้ำเนื่องจากการกดทับ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและค่าความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิจึงคำนวณจากจุดวัดจากฐาน (z = 0 mm) จนไปถึงความสูงนี้ (z < 300 m) การคำนวณสรุปในตารางที่ 3 พบว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเมื่อถาดสูง 500 mm (24.2 °C) และ 750 mm (24.4 °C) มีค่าที่เกือบเท่ากัน อย่างไรก็ตามค่าความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิจะลดลง เมื่อถาดอยู่ต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการรักษาอุณหภูมิของตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง

เงื่อนไข	ความสูงของถาด [mm]	อุณหภูมิแวดล้อม [°C]	อุณหภูมิเฉลี่ย [°C]	ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิ [-]
ไม่มีฝาปิด	500	26.4	24.2	0.032
	750	27.1	24.4	0.044
	1000	27.4	25.3	0.026
มีฝาปิด	500	26.0	14.5	0.029
	750	26.2	16.2	0.026
	1000	27.3	18.5	0.046

เมื่อพิจารณาภาระทางความร้อนที่เกิดขึ้นพบว่าตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง มีภาระทางความร้อนที่น้อยที่สุดเมื่อถาดน้ำแข็งอยู่ที่ความสูง 500 mm เนื่องจากพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศน้อยกว่าความสูงอื่น ๆ (750 และ 1000mm) ในขณะที่ตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็งที่มีฝาปิดมีภาระทางความร้อนน้อยกว่าแบบที่ไม่มีฝาปิดเนื่องจากอากาศภายนอก ไหลเข้ามาในตู้น้อยกว่า จากผลลัพธ์ที่ได้ ความสูงของถาดที่ 500 mm จึงนำไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการเก็บรักษาผักต่อไป

ตารางที่ 4 ภาระทางความร้อนของตู้แช่แสดงสินค้า

เงื่อนไข	ความสูง [mm]	ภาระทางความร้อน [W]
มีฝาปิด	500	29.4
	750	36.5
	1000	33.7
ไม่มีฝาปิด	500	113.5
	750	260.6
	1000	329.8

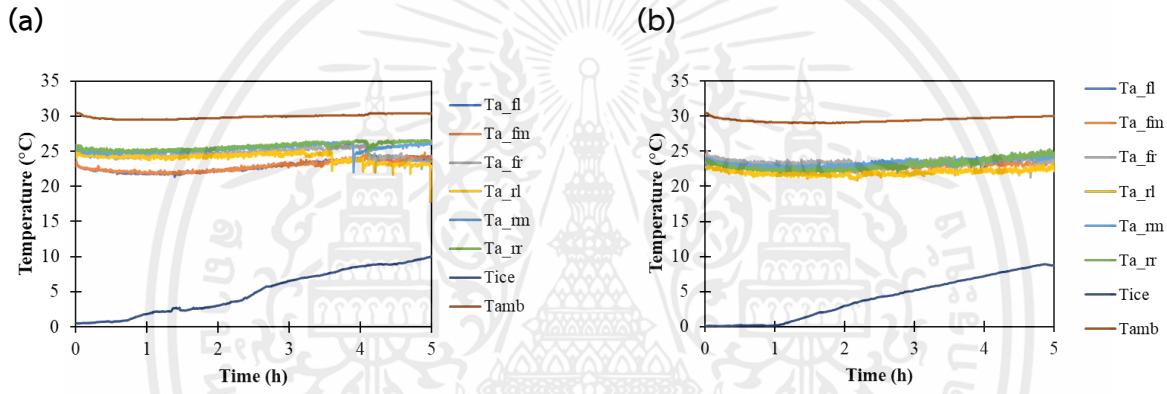
การทำซ้ำทั้ง 2 ครั้งพบว่ามีผลเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

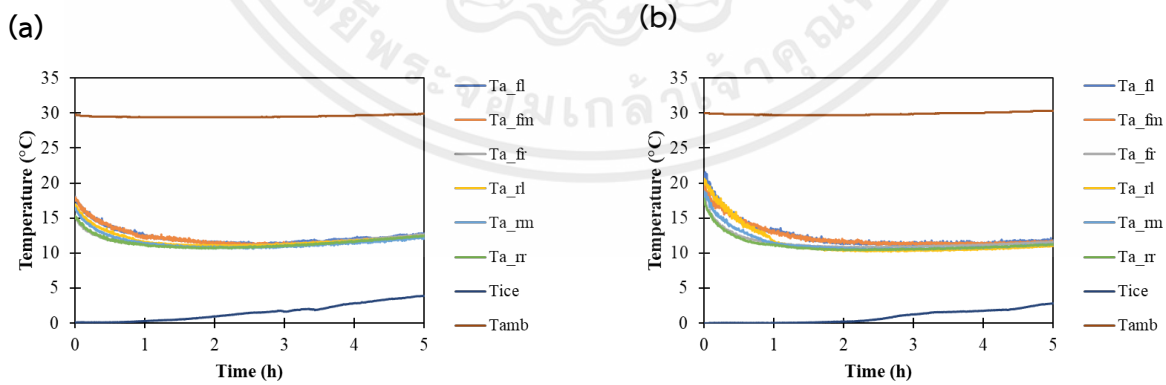
4.2 ประสิทธิภาพการเก็บรักษาผัก

ประสิทธิภาพการเก็บรักษาผักของตู้แช่แสดงสินค้าพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพของผักคะน้า (การสูญเสียมวล สี เนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏ) หลังจากการเก็บในตู้แช่แสดงสินค้า การศึกษาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เก็บนอกตู้แช่แสดงสินค้า (กรณีควบคุม) ในกรณีตู้แช่แสดงสินค้าที่มีฝาปิดและไม่มีฝาปิดทำการทดลองแบบอิสระซ้ำ 2 ครั้ง รูปที่ 10 และ 11 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศและผลิตภัณฑ์ทั้งในและนอกตู้แช่แสดงสินค้าของทั้งสองกรณี

4.2.1 อุณหภูมิภายในตู้



รูปที่ 10 อุณหภูมิของอากาศและผลิตภัณฑ์ภายในและภายนอกของตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิด (a) การทดลองครั้งที่ 1 (b) การทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 11 อุณหภูมิของอากาศและผลิตภัณฑ์ภายในและภายนอกของตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิด (a) การทดลองครั้งที่ 1 (b) การทดลองครั้งที่ 2

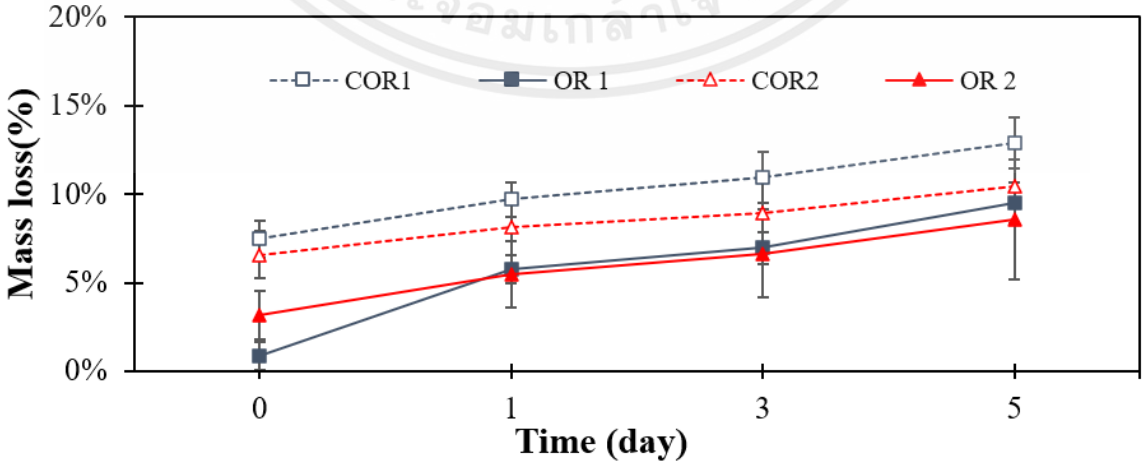
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 10a ผลิตภัณฑ์ในตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิดมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศเหนือผลิตภัณฑ์ (ประมาณ 10 mm) ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิ 21.7±1.0 °C ขณะที่อากาศภายในตู้แช่แสดงสินค้ามีอุณหภูมิอยู่ที่ 24.4±1. °C อุณหภูมิแวดล้อม 30.0±0.3 °C หลังจากการทดลอง 5 ชั่วโมงน้ำแข็งเหลือ 0.4 kg จาก 15 kg (97% ของน้ำแข็งละลาย) รูปที่ 10b ผลิตภัณฑ์ในตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิดมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศเหนือผลิตภัณฑ์ (ประมาณ 10 mm) ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิ 20.9±0.2 °C ขณะที่อากาศภายในตู้แช่แสดงสินค้ามีอุณหภูมิอยู่ที่ 23.5±0.5 °Cอุณหภูมิแวดล้อม 29.64±0.5 °C หลังจากการทดลอง 5 ชั่วโมงน้ำแข็งเหลือ 0.6 kg จาก 15 kg (96% ของน้ำแข็งละลาย)

จากรูปที่ 11a ผลิตภัณฑ์ในตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิดมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศเหนือผลิตภัณฑ์ (ประมาณ 10 mm) ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิ 13.0±1.0 °C ขณะที่อากาศภายในตู้แช่แสดงสินค้ามีอุณหภูมิอยู่ที่ 12.1±0.3 °C อุณหภูมิแวดล้อม 29.63±0.3 °C หลังจากการทดลอง 5 ชั่วโมงน้ำแข็งเหลือ 3.2 kg จาก 15 kg (79% ของน้ำแข็งละลาย) รูปที่ 11b ผลิตภัณฑ์ในตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิดมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศเหนือผลิตภัณฑ์ (ประมาณ 10 mm) ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิ 12.1±0.9 °C ขณะที่อากาศภายในตู้แช่แสดงสินค้ามีอุณหภูมิอยู่ที่ 11.9±1.1 °Cอุณหภูมิแวดล้อม 30.06±0.4 °C หลังจากการทดลอง 5 ชั่วโมงน้ำแข็งเหลือ 3.0 kg จาก 15 kg (80% ของน้ำแข็งละลาย)

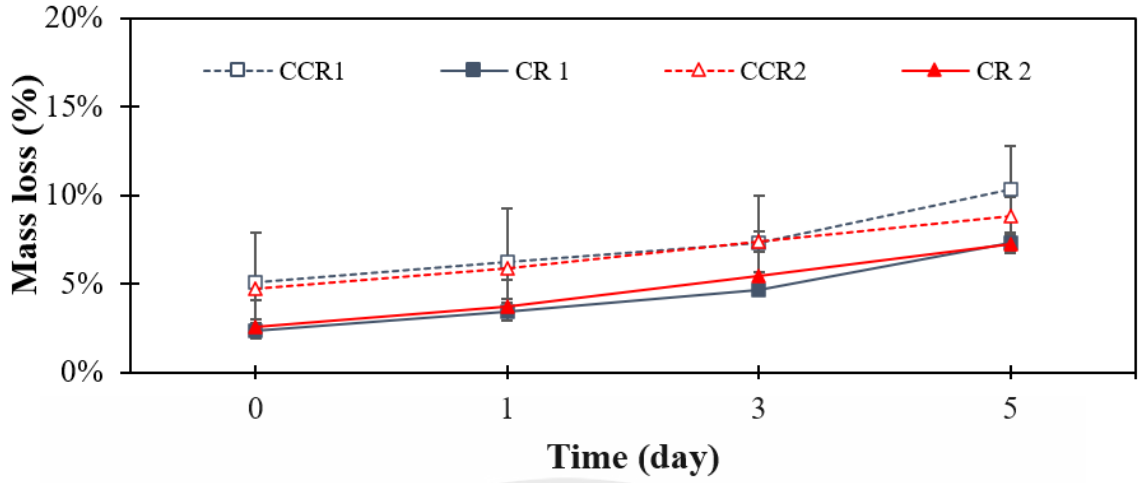
แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เหมือนกันระหว่างน้ำแข็ง อากาศ และผลิตภัณฑ์พบได้ในตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิด กล่าวคือ อุณหภูมิของอากาศและผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้ากว่าน้ำแข็ง สามารถอธิบายได้โดย ความเฉื่อยทางความร้อนของถาดน้ำแข็งซึ่งทำให้เกิดความล่าช้าในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและส่งผลให้อากาศภายในและผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างเล็กน้อย

4.2.2 การสูญเสียมวล



รูปที่ 12 ร้อยละการสูญเสียมวลของตัวอย่างที่จัดเก็บในตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิดและกรณีควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



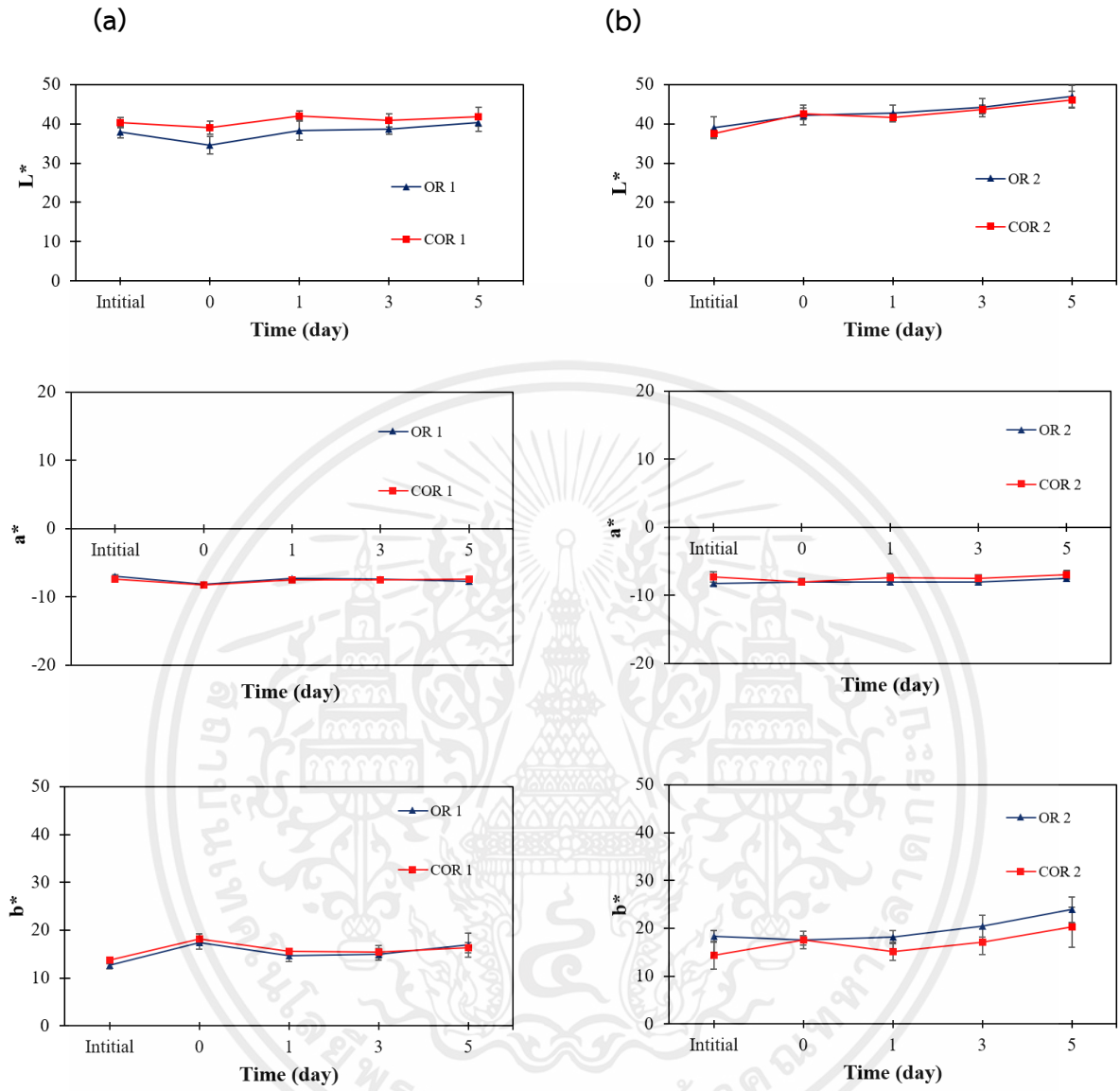
รูปที่ 13 ร้อยละการสูญเสียมวลของตัวอย่างที่จัดเก็บในตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิดและกรณีควบคุม

การสูญเสียมวลพบได้หลังจากตัวอย่างถูกนำออกจากตู้แช่แสดงสินค้าทั้งแบบมีฝาปิดและไม่ฝาปิด จากรูปที่ 12 พบว่าตัวอย่างจากการทดลองครั้งที่ 1 (OR1) ภายในตู้แบบไม่มีฝาปิด มีค่าร้อยละการสูญเสียมวลจากเริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ประมาณ 9.5 % และตัวอย่างควบคุมของการทดลองครั้งที่ 1 (COR1) ประมาณ 12.3 % และตัวอย่างการทดลองที่ 2 (OR2) ภายในตู้แบบไม่มีฝาปิด มีค่าร้อยละการสูญเสียมวลจากเริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ประมาณ 9 % และตัวอย่างควบคุมของการทดลองครั้งที่ 2 (COR2) ประมาณ 12 % และ จากรูปที่ 13 พบว่าตัวอย่างการทดลองที่ 1 (CR1) ภายในตู้แบบมีฝาปิด มีค่าร้อยละการสูญเสียมวลจากเริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ประมาณ 7.3 % และตัวอย่างควบคุมของการทดลองครั้งที่ 1 (CCR1) ประมาณ 10.3 % และตัวอย่างการทดลองที่ 2 (CR2) ภายในตู้แบบไม่มีฝาปิด มีค่าร้อยละการสูญเสียมวลจากเริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ประมาณ 7.2 % และตัวอย่างควบคุมของการทดลองครั้งที่ 2 (CCR2) ประมาณ 9.5 %

ผลิตภัณฑ์ที่นำมาทำการทดลองเป็นตัวอย่างที่ซื้อมาคนละวัน การสูญเสียมวลของตัวอย่างในกรณีที่มีฝาปิดและไม่มีฝาปิดจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้เนื่องจากมีความแปรปรวนทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ ร้อยละการสูญเสียมวลมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่มีฝาปิดเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีฝาปิด ทุกกลุ่มของตัวอย่างถูกจัดเก็บไว้ในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 8.6±0.7 °C และ 87.7±5.4 %RH ตามลำดับ การสูญเสียมวลของกลุ่มตัวอย่างทุกกลุ่มมีอัตราที่สูงขึ้นเท่า ๆ กัน (ประมาณ 1-2% ทุก ๆ 2 วัน) อย่างไรก็ตาม ร้อยละการสูญเสียมวลของตัวอย่างที่อยู่ภายในตู้แช่แสดงสินค้าต่ำกว่าตัวอย่างที่อยู่ภายนอกตู้แช่แสดงสินค้าเสมอ

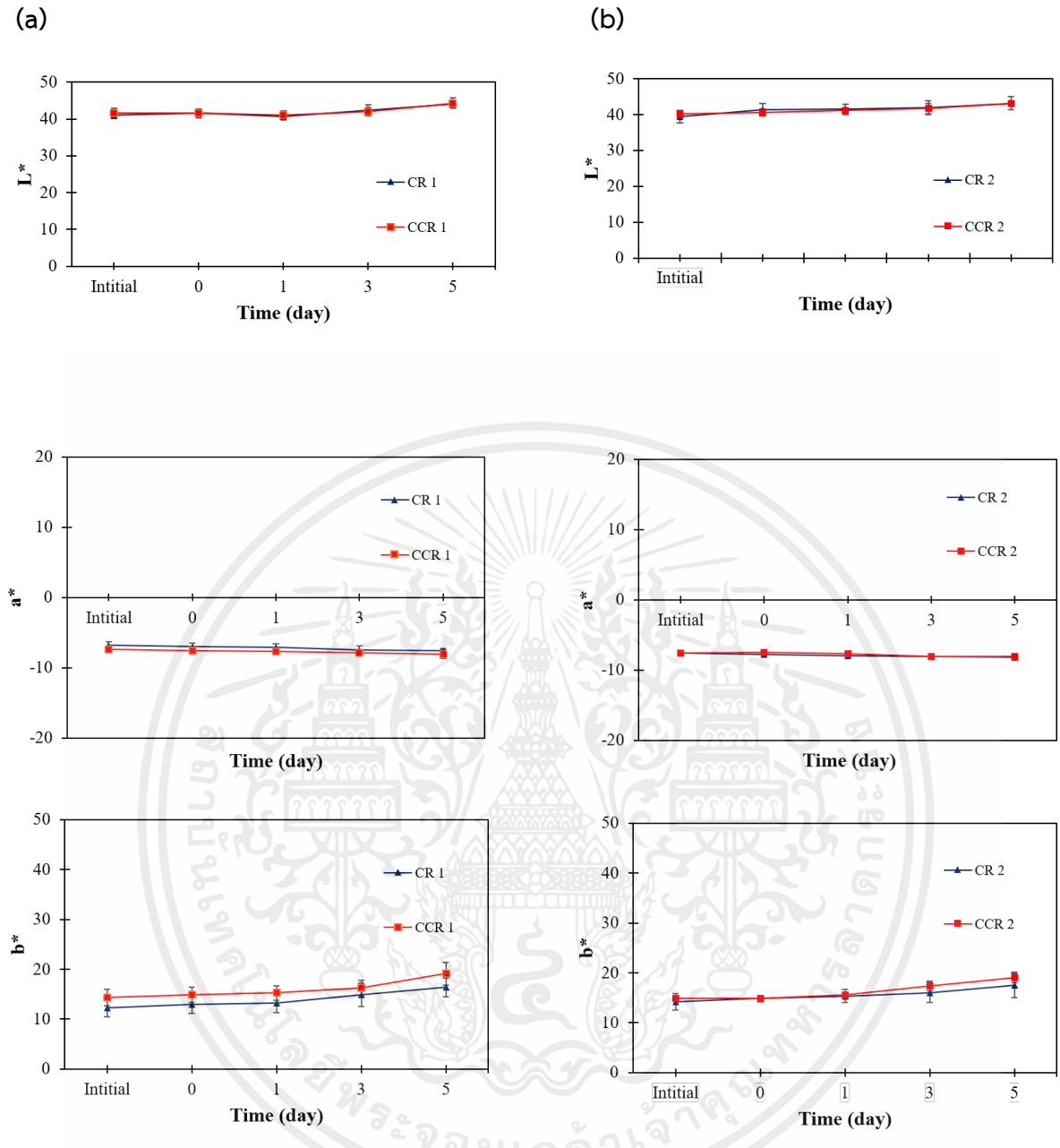
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การเปลี่ยนแปลงสี



รูปที่ 14 ค่า L* a* และ b* ของผลิตภัณฑ์ที่จัดเก็บในตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิดและกรณีควบคุม (a) การทดลองครั้งที่ 1 (b) การทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 ค่า L* a* และ b* ของผลิตภัณฑ์ที่จัดเก็บในตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิดและกรณีควบคุม (a) การทดลองครั้งที่ 1 (b) การทดลองครั้งที่ 2

จากรูปที่ 14a กรณีตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิดของการทดลองที่ 1 ค่าความสว่าง (L*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้ (OR1) และตัวอย่างควบคุม (COR1) มีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 6% และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3% ตามลำดับ ค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้และตัวอย่างควบคุมมีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 11% และ 0% ตามลำดับ ค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้และตัวอย่างควบคุมมีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 33% และ 19% ตามลำดับ และจากรูปที่ 14b กรณีตู้แช่แสดงสินค้าแบบไม่มีฝาปิดของการทดลองที่ 2 ค่าความสว่าง (L*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้และตัวอย่างควบคุมมีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 21% และ 23% ตามลำดับค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้และตัวอย่างควบคุมมีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 9% และ 5% ตามลำดับ ค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้และตัวอย่างควบคุมมีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 30% และ 42% ตามลำดับ

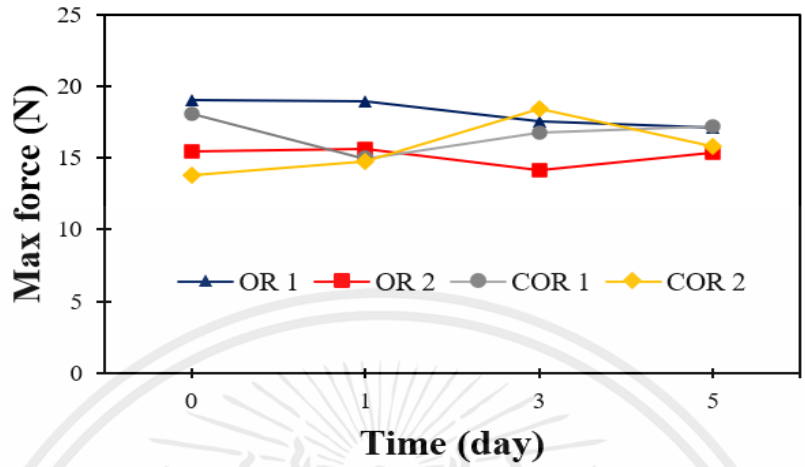
จากรูปที่ 15a กรณีตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิดการทดลองที่ 1 ค่าความสว่าง (L*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้ (CR1) และตัวอย่างควบคุม (CCR1) มีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 7% และ 7% ตามลำดับ ค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้และตัวอย่างควบคุมมีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 12% และ 9% ตามลำดับ ค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้และตัวอย่างควบคุมมีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 33% และ 34% ตามลำดับ และจากรูปที่ 15b กรณีตู้แช่แสดงสินค้าแบบมีฝาปิดการทดลองที่ 1 ค่าความสว่าง (L*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้และตัวอย่างควบคุมมีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 9% และ 7% ตามลำดับ ค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้และตัวอย่างควบคุมมีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 8% และ 7% ตามลำดับ ค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b*) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ตัวอย่างภายในตู้และตัวอย่างควบคุมมีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงไป 24% และ 28% ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่าใบของผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่างมีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่าความเป็นสีเขียวหรือแดงลดลงเล็กน้อยและค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงินมีเพิ่มอย่างเห็นได้ชัดส่งผลให้ใบมีความเป็นสีเหลืองมากขึ้น

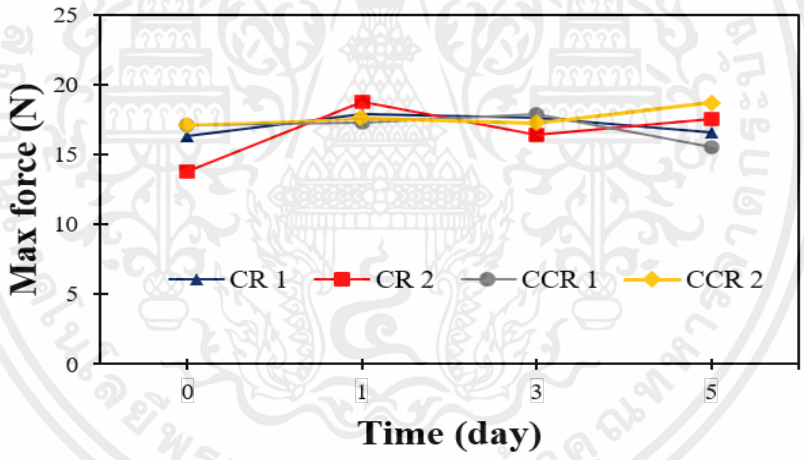
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 เนื้อสัมผัส

a)



b)



รูปที่ 16 แรงสูงสุดที่ใช้ในการเจาะตัวอย่าง ที่จัดเก็บในตู้แช่แสดงสินค้า
(a) เงื่อนไขแบบไม่มีฝาปิด (b) เงื่อนไขแบบมีฝาปิด

จากรูปที่ 16 พบว่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการเจาะทะลุตัวอย่างที่อยู่ในตู้และกรณีควบคุม มีแนวโน้มใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ลักษณะปรากฏ

a)

b)

รูปที่ 17 ลักษณะปรากฏของตัวอย่างเงื่อนไขตู้แบบไม่มีฝาปิด (a) ภายในตู้ (b) กรณีควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a)

b)

รูปที่ 18 ลักษณะปรากฏของตัวอย่างเงื่อนไขตู้แบบมีฝาปิด(a) ภายในตู้ (b) กรณีควบคุม

เริ่มแรกใบของผักคะน้ามีความเขียวและสด ดังที่แสดงในรูปที่ 17 และ 18 หลังจากผ่านไป 5 ชั่วโมง ผักคะน้าที่เป็นตัวอย่างควบคุมของทั้งสองชุดการทดลองมีลักษณะเหี่ยวเล็กน้อยในขณะที่ตัวอย่างที่อยู่ภายในตู้แช่แสดงสินค้ายังคงความสดไว้ รอยเหี่ยวเริ่มเห็นได้ชัดขึ้นในวันที่ 1 และ3 ขณะที่เก็บไว้ในตู้เย็นสำหรับผักคะน้าที่อยู่ภายในตู้แช่แสดงสินค้าที่มีฝาปิดและไม่มีฝาปิด ตามลำดับ ใบของผักคะน้าบางใบในตัวอย่างควบคุมเริ่มกลายเป็นสีเหลืองในวันที่ 3 ขณะที่ผักคะน้าที่อยู่ภายในตู้แช่แสดงสินค้าจะเริ่มกลายเป็นสีเหลืองในวันที่ 5 การกลายเป็นสีเหลืองบ่งบอกให้ถึงการลดลงของจำนวนคลอโรฟิลด์ (Wang et al., 2021) ซึ่งสามารถชะลอได้โดยการเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (Koukounaras et al., 2007) โดยรวมแล้วผักคะน้าที่เคยเก็บไว้ในตู้แช่แสดงสินค้ามีคุณภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับผักคะน้าที่อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อม ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการรักษาคุณภาพของตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ในการศึกษานี้ ได้มีการเสนอ ให้ใช้ตู้แช่เย็นสำหรับเก็บผักระหว่างการขายปลีกที่ตลาดสดในประเทศไทย ประสิทธิภาพด้านอุณหภูมิขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในตู้ที่ทำได้และความสม่ำเสมอของอุณหภูมิจากการทดลองภายใต้เงื่อนไขทั้งแบบเปิดและแบบปิด เพื่อศึกษาอิทธิพลของความสูงของถาดน้ำแข็งต่อประสิทธิภาพด้านอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่าความสูงของถาดที่ 500 mm สามารถทำอุณหภูมิได้ดีที่สุดสำหรับผักทั้งสองแบบ เมื่อเทียบกับความสูงของถาดอื่น ๆ (750 และ 1,000 mm) ที่ความสูงของถาดระดับนี้ อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในตู้แช่แสดงสินค้าแบบเปิดและปิดต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกประมาณ 6 °C และ 17 °C ตามลำดับ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการเก็บรักษาของตู้แช่แสดงสินค้าด้วยการประเมินคุณภาพของคะน้า ได้แก่ ร้อยละการสูญเสียมวล สี เนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏหลังจากจัดเก็บ 5 ชั่วโมงในตู้แช่แสดงสินค้าทั้งสองแบบและนาน 5 วันในตู้เย็น พบว่าร้อยละการสูญเสียมวลของตัวอย่างที่อยู่ในตู้แบบมีฝาปิดน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม ด้านสีตัวอย่างที่อยู่ภายในตู้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีเหลืองน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม เช่นเดียวกับลักษณะปรากฏที่บ่งบอกว่า ตัวอย่างที่อยู่ในตู้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีเหลืองน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม และเนื้อสัมผัสของตัวอย่างภายในตู้ และตัวอย่างควบคุมมีแนวโน้มแรงสูงสุดที่ใช้กดตัวอย่างใกล้เคียงกัน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่เก็บไว้ในตู้แบบมีฝาปิดมีคุณภาพดีกว่าตัวอย่างที่เก็บภายใต้สภาพแวดล้อม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็งว่าสามารถรักษาคุณภาพของผักระหว่างการขายปลีกที่ตลาดสดได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ตู้แช่แสดงสินค้าในการทดลองนี้เป็นเพียงต้นแบบ หากต้องการกำจัดปัญหาน้ำที่ควบแน่นที่พื้นผิวถาดจำเป็นต้องติดตั้งแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความชันไม่เท่ากันเพื่อให้หยดน้ำไหลไปสู่จุดระบายน้ำ
2. ติดตั้งพัดลมขนาดเล็กเพื่อให้อากาศภายในตู้ไหลเวียนได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

จริงแท้ ศิริพานิช. (2538). **สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ ลมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ธนวฏิฐ์ แก้วมณีนพโชติ. (2560). **ผลของการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศร่วมกับบรรจุภัณฑ์แอคทีฟต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของคะน้าฮ่องกง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุนิสา ประไพตระกูล. (2551). **พืชตระกูลกระหล่ำ (คะน้า ผักกาดกวางตุ้ง): คู่มือนักวิชาการส่งเสริมการเกษตร**. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมการเกษตร สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร.

ASHRAE. (2018). **Refrigeration Handbook**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, USA.

Bhuvaneswari, M., Sivasankaran, S., & Kim, Y.J. **Effect of aspect ratio on convection in a porous enclosure with partially active thermal walls**. Computers and Mathematics with Applications, 62, 3844-3856

Çengel, Y.A., Ghajar, A.J., 2020. **Heat and mass transfer : fundamentals and applications.** Mcgraw-Hill Education, New York, NY.

Ferrante, A. & Maggiore, T. (2007). **Chlorophyll a fluorescence measurement to evaluate storage time and temperature of of Valeriana leafy vegetables.** Postharvest Biology and Technology, 45, 73-80.

Gosney, W.B., Olama, H.A.L., 1975. **Heat and enthalpy gains through cold room doorways, Proceedings Institute of Refrigeration**, pp. 31-41.

Koukounaras, A., Siomos, A.S., Sfakiotakis, E. (2007). **Postharvest CO2 and ethylene production and quality of rocket (Eruca sativa Mill.) leaves as affected by leaf age and storage temperature.** Postharvest Biology and Technology 46, 167-173.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Laguerre, O. (2010). **Heat transfer and air flow in a domestic refrigerator, in: Farid, M. (Ed.)**, Mathematical Modeling of Food Processing. CRC Press, Boca Raton, pp. 453-482.

Ortiz-Gonzalo, D., Ørtenblad, S.B., Larsen, M.N., Suebpongsang, P., Bruun, T.B., (2021). **Food loss and waste and the modernization of vegetable value chains in Thailand.** Resources, Conservation and Recycling 174, 105714.

Poapongsakorn, N., Chokesomritpol, P., Pantakua, K. (2019). **Development of Food Value Chains in Thailand, in: Kusano, E. (Ed.), Food value chain in ASEAN: Case studies focusing on local producers**. Economic Research Institute for ASEAN and East Asia, pp. 8-51.

Wang, L., Wu, S., Huang, H., Chen, F., Ye, M., Yin, J., Luo, Z., Qi, Y., Chen, M., Chen, Y. (2021). **High oxygen atmospheric packaging treatment regulates the postharvest changes of Chinese kale (Brassica oleracea var. alboglabra) during storage**. Journal of Food Science 86, 3884-3895.

Xiaofeng, X. and Xuelai, Z. (2020). **Simulation and experimental investigation of a multi-temperature insulation box with phase change materials for cold storage.** Journal of Food Engineering, 292, 110286

Xin, S. and Que´re, L. P. (2006). **Natural-Convection Flows in Air-Filled, Differentially Heated Cavities with Adiabatic Horizontal Walls**. Numerical Heat Transfer Applications, 437-466

Yilmaz, D el at. (2020). **Experimental investigation of PCM location in a commercial display cabinet cooled by a transcritical CO2 system.** International Journal of Refrigeration, 120, 396–405

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-1 ภาพตู้แช่แสดงสินค้าทำความเย็นด้วยน้ำแข็ง

รูปที่ ก-2 ภาพแสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-3 ถาดสังกะสีรองรับน้ำแข็งที่เป็นตัวให้ความเย็น

รูปที่ ก-4 การประเมินประสิทธิภาพอุณหภูมิภายในตู้แช่แสดงสินค้า (มีผลิตภัณฑ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-5 กรณีควบคุม (ผลิตภัณฑ์ที่สภาพแวดล้อม)

รูปที่ ก-6 จำลองการค้าปลีกที่ตลาดสด 5 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-7 จำลองตามการเก็บในครัวเรือนเป็นเวลา 5 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้