



การศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกและคุณภาพของ
มะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกและ
คุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

THE EFFECT OF FREEZING ON THE OSMOTIC DEHYDRATION PROCESS AND
THE QUALITY OF OSMO-AIR-DRIED MANGOES



By
MISS Supawadee SOMKANE

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)
Department of FOOD TECHNOLOGY
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2020
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการทำแห้งด้วย
วิธีออสโมติกและคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง

โดย สุภาวดี สมคะเน

สาขาวิชา เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรากรณ์ มหาโยธี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย
ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ)

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรากรณ์ มหาโยธี)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ)

ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ดร.ภาริกา รุ่งพิชยพิเชฐ)



60403212 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : มะม่วงอบแห้ง, กระบวนการออสโมติก, การแช่เยือกแข็ง, การเก็บรักษา

นางสาว สุภาวดี สมคะเน: การศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกและคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรากรณ์ มหาโยธี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการแช่เยือกแข็ง และเวลาการเก็บรักษาในสภาวะแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการออสโมติกของมะม่วงแช่อิ่ม จลนพลศาสตร์การทำแห้งและผลต่อคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง โดยนำขึ้นมะม่วงสุกพันธุ์แก้วขมิ้นที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเท่ากับ 18.6-19.6 องศาบริกซ์ มาตัดแต่งให้มีขนาดยาว 6 ซม. กว้าง 4 ซม. หนา 1 ซม. จากนั้นแช่ในสารละลายผสมแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 และกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงนำขึ้นมะม่วงไปแช่เยือกด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง 2 วิธี ได้แก่ การแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยแช่ที่ตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสและการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว โดยใช้ตู้แช่เยือกแข็งลมเย็นที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส ทำการแช่เยือกแข็งจนกระทั่งอุณหภูมิบริเวณตรงกลางขึ้นมะม่วงเท่ากับ -18 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 วิธีไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน นำขึ้นมะม่วงแช่เยือกแข็งที่แต่ละสภาวะไปแช่ในสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้น 38 องศาบริกซ์ และทำการศึกษาผลต่อกระบวนการออสโมติก ผลของจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และทำการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพด้านเนื้อสัมผัส ค่าสี คุณภาพทางเคมี ค่าปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส และวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง พบว่าในการศึกษาผลต่อกระบวนการออสโมติกมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าและการแช่เยือกแข็งแบบเร็วแล้วนำไปแช่อิ่มทั้งนี้ใช้ระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 16 ชั่วโมง และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนขึ้นมะม่วงชุดควบคุม (ขึ้นมะม่วงที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง) ใช้เวลานานที่สุดเท่ากับ 24 ชั่วโมง ในขณะที่มะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 วิธีแล้วนำไปเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 และ 2 เดือน ส่งผลให้การเข้าสู่สมดุลในกระบวนการแช่สารออสโมติกสั้นลงเป็นเวลา 14 ชั่วโมง และมีปริมาณการสูญเสียน้ำและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขึ้นมะม่วงชุดควบคุม ในการศึกษาผลต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เกิดอัตราการแห้งที่สูงกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าใช้เวลาในการทำแห้งสั้นที่สุด โดยใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 28 ชั่วโมงและ 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยทำการกำหนดปริมาณความชื้นขึ้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งให้มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 18 และพบว่า

สมการทำแห้งชั้นบาง (thin layer) ของ Page model เหมาะสมในการทำนายจลนพลศาสตร์การทำแห้งมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง และผลของการวิเคราะห์ทัศนภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง พบว่าคุณภาพมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งจากชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วและเก็บรักษาไว้ที่ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 2 เดือน ส่งผลให้ค่าสี ค่าความสว่าง L^* ของชั้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งอยู่ในช่วง 54.03 ถึง 54.74 และ 53.83 ถึง 55.75 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความสว่างของชั้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นมะม่วงชุดควบคุมที่ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และยังส่งผลให้ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งมีค่าที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นมะม่วงชุดควบคุมโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด พบว่ามีค่าต่ำกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับชั้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่มีกระบวนการแช่ในสารละลายออสโมติกทันที และคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสพบว่าชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและเก็บรักษาไว้ที่ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 เดือน ส่งผลให้ค่าทางด้านเนื้อสัมผัสของค่าความแข็ง (hardness) มีค่าสูงที่สุด เป็น 371.37 กรัม ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Gumminess) เป็นค่า 352.95 กรัม และค่าความเคี้ยวได้ (Chewiness) เป็น 378.02 เมื่อเปรียบเทียบกับเตรียมตัวอย่างสถานะอื่นๆ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



60403212 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : dried mango osmotic dehydration freezing storage

MISS SUPAWADEE SOMKANE : THE EFFECT OF FREEZING ON THE OSMOTIC DEHYDRATION PROCESS AND THE QUALITY OF OSMO-AIR-DRIED MANGOES THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR BUSARAKORN MAHAYOTHEE

This study aimed to investigate the effect of freezing method and storage time on osmotic dehydration, drying behavior, and qualities of osmotic air-dried mango. Mangoes cv. Kaew Kamin with total soluble solids content (TSS) of 18.6 – 19.6 °Brix were peeled and cut into pieces of 6 x 4 x 1 cm. After that, they were soaked in a solution of 1% calcium chloride and 1% citric acid for 3 h. Then, the mango samples were frozen using two methods, including slow freezing by a conventional freezer (-18 °C) and quick freezing by an air-blast freezer (-40 °C), to reach the core temperature of -18 °C. The frozen mangoes from each treatment were stored at -18 °C for 1 and 2 months. Mangoes from each freezing and storage condition were soaked in an osmotic solution with TSS of 38 °Brix, and then the effects on osmotic dehydration, drying behavior and qualities of osmotic air-dried mango were investigated. Texture, color, moisture content, water activity, browning index, polyphenol oxidase and total phenolic of the osmotic air-dried mango were evaluated. For osmotic dehydration, the results showed that the frozen mango by slow freezing and quick freezing, and then soaked in an osmotic solution required 16 and 20 h to reach the equilibrium TSS, respectively. For unfrozen mango pieces (control), soaking in an osmotic solution for 24 h was required, while the frozen mangoes by two freezing methods that were stored for 1 and 2 months took only 14 h to reach the equilibrium TSS, and resulted in an increase in water loss and solid gains as compared to unfrozen mango. For the effect on drying behavior, it was found that drying at 60°C had a higher drying rate than drying at 50°C. The slow-freezing mango pieces had the shortest drying time which was 28 h and 16 h at 50 and 60 °C, respectively, when final moisture content of 18% of osmotic air-dried mango was required. The thin layer drying equation of the Page model was suitable for predicting drying behavior of osmotic air-dried mango. For the quality of osmotic air-dried mango, the results showed that the frozen mangoes that were stored at -18 °C for 1 and 2 months had the color values and L* brightness values in the range

of 54.03 to 54.74 and 53.83 to 55.75, respectively, which the brightness values were statistically significant higher ($p \leq 0.05$) when compared to unfrozen mango pieces (control) that were dried at 60 °C. Browning index and Polyphenol oxidase of osmotic air-dried mangoes that were frozen by two methods were statistically significant lower ($p \leq 0.05$) than control. The results also showed that total phenolic content was lower than osmotic air-dried mangoes that were immediately soaked in an osmotic solution. For texture analysis, the results showed that osmotic air-dried mangoes treated by quick freezing and storage at -18 °C for 2 months had the highest hardness value of 371.37 g, gumminess value of 352.95 g and chewiness value of 378.02 g, which were statistically significant different ($p \leq 0.05$) comparing to other conditions.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้เนื่องจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราการณณ์ มหาโยธี ขอกราบขอบพระคุณที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่ดี แนวความคิดในการทำงานวิจัย ตลอดจนตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ คูวิจิตรจากรู อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมเป็นอย่างดี สูงสำหรับที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง ทั้งในเรื่องการวิเคราะห์ข้อมูล และการแนะนำเรื่องการวางแผนการทดลอง

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และงานธุรการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

ขอขอบคุณพินิจ พี่ก้อย พี่พลอย เตย ฝ่าย เพียง ฟ้า น้องฝน น้องแซนด์ น้องเมย์ น้องตรีม และหลายๆ ท่านที่ไม่สามารถกล่าวได้หมด ณ ที่นี้ ที่คอยให้กำลังใจให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี และประสบการณ์การทำงานร่วมกันที่ดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ญาติที่สนิททุกคนสำหรับกำลังใจที่สำคัญที่สุดในการศึกษาเล่าเรียน การทำงานวิจัย การทำงาน การดำเนินชีวิตที่ดี และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดมา

สุภาวดี สมคะเน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ท
บทที่ 2.....	4
การตรวจเอกสาร.....	4
2.1 มะม่วง.....	4
2.2 การแช่เยือกแข็ง.....	6
2.2.1 การเกิดผลึกน้ำแข็ง.....	8
2.2.2 การละลายน้ำแข็ง (Thawing).....	10
2.3 การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก (osmotic dehydration).....	11
2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติก.....	13
2.4 การอบแห้ง.....	14
2.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการทำแห้งด้วยสมการแบบชั้นบาง.....	15
2.4.2 กลไกการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้อบแห้ง.....	17
2.5 ผลของการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็ง.....	19
บทที่ 3.....	25
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1 วัตถุประสงค์.....	25

3.2 สารเคมี.....	26
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ	26
3.4 วิธีการทดลอง.....	28
3.4.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	28
3.4.2 ขั้นตอนในการแช่เยือกแข็ง	29
3.4.3 การเตรียมสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 38 องศาบริกซ์	30
3.4.4 วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของมะม่วงสด.....	30
3.4.5 การศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการออสโมติกของมะม่วงแช่อิ่ม	33
3.4.6 การศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งของมะม่วงแช่อิ่มแห้ง	34
3.4.7 การศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของมะม่วง แช่อิ่มแห้ง	35
3.4.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	35
บทที่ 4	37
ผลการทดลองและวิจารณ์.....	37
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมะม่วงสุกที่ใช้ศึกษา	37
4.2 ผลของการแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการออสโมติกของมะม่วงแช่อิ่ม	41
4.3 ผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง.....	49
4.4 ผลของการแช่เยือกแข็งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง	55
4.4.1 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้.....	55
4.4.2 ลักษณะปรากฏและค่าสี	57
4.4.3 ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (Browning Index)	72
4.4.5 ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส	78
4.4.6 ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (Total Phenolic Content).....	82
บทที่ 5	85

สรุปผลการทดลอง..... 85

รายการอ้างอิง..... 91

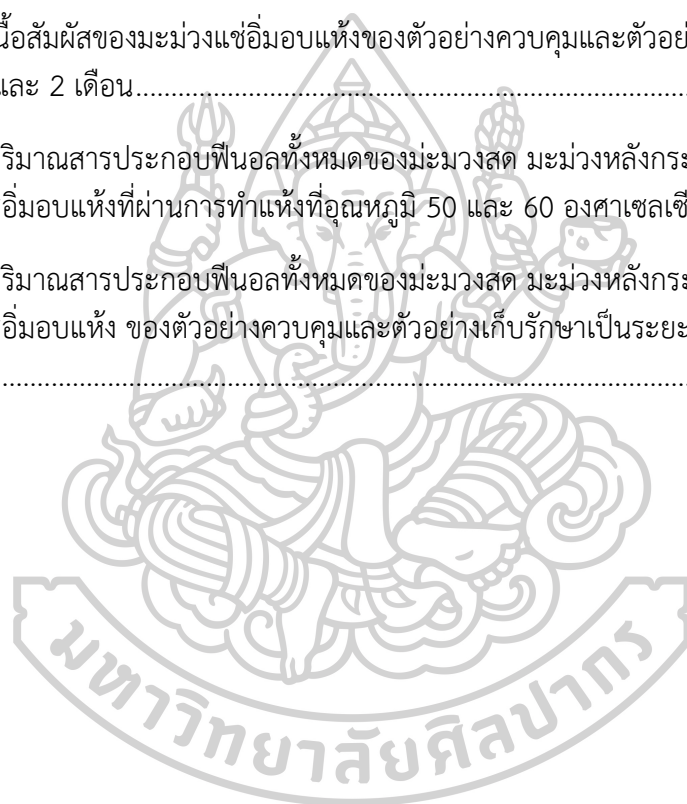
ประวัติผู้เขียน..... 99



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 งานวิจัยที่ศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลในมะม่วง	5
ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นและจุดเยือกแข็งของอาหาร	7
ตารางที่ 3 รายละเอียดมะม่วงที่ใช้ในการศึกษา.....	25
ตารางที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงแช่อิ่ม	35
ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมะม่วงสุกก่อนการทำการศึกษา	39
ตารางที่ 6 เวลาที่เข้าสู่สมดุลของกระบวนการออสโมติกของการแช่อิ่มขึ้นมะม่วงและที่ผ่านการแช่..	44
ตารางที่ 8 ปริมาณความชื้น และระยะเวลาในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ของขึ้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างที่แตกต่างกัน.....	50
ตารางที่ 9 ค่าทางสถิติที่ได้จากการสร้างสมการทำแห้งมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งแบบขึ้นบางด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	53
ตารางที่ 10 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของขึ้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการเตรียม	55
ตารางที่ 11 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของขึ้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการเตรียม	57
ตารางที่ 12 ลักษณะปรากฏของขึ้นเนื้อมะม่วงสดและมะม่วงก่อนและหลังการทำแห้งที่ได้จากการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ผ่านการเตรียม	59
ตารางที่ 13 คุณภาพด้านสีของขึ้นเนื้อมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ได้จากการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ผ่านการเตรียมตัวอย่างที่แตกต่างกัน	61
ตารางที่ 14 ลักษณะปรากฏของขึ้นเนื้อมะม่วงสดขึ้นมะม่วงก่อนและหลังการทำแห้งของขึ้นมะม่วงที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน และทำแห้ง.....	65
ตารางที่ 15 คุณภาพด้านสีของขึ้นเนื้อมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ตัวอย่างควบคุมและขึ้นมะม่วงที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน และทำแห้งที่อุณหภูมิ.....	67
ตารางที่ 16 ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และมะม่วง	73

ตารางที่ 17 ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และมะม่วง	74
ตารางที่ 18 กิจกรรมของเอนไซม์ PPO ของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และ	76
ตารางที่ 19 กิจกรรมของเอนไซม์ PPO ของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และ มะม่วงแช่อบแห้ง ของตัวอย่างควบคุมและเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน	77
ตารางที่ 20 เนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่อบแห้งที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศา เซลเซียส	79
ตารางที่ 21 เนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่อบแห้งของตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่เก็บรักษาเป็น ระยะเวลา 1 และ 2 เดือน	81
ตารางที่ 22 ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และมะม่วงแช่อบแห้งที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส	83
ตารางที่ 23 ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และมะม่วงแช่อบแห้ง ของตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน	84



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการแช่เยือกแข็งของอาหารผ่านช่วงวิกฤติ	9
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิระหว่างการแช่เยือกแข็ง	9
ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจากการละลาย.....	11
ภาพที่ 4 การถ่ายโอนมวลสารระหว่างการออสโมติกในผักและผลไม้.....	13
ภาพที่ 5 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์.....	18
ภาพที่ 6 การเตรียมตัวอย่างขึ้นมะม่วงสำหรับการศึกษา	28
ภาพที่ 7 การแช่ขึ้นมะม่วงในตู้แช่เยือกแข็งแบบช้าและตู้แช่เยือกแข็งแบบเร็ว	29
ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการแช่เยือกแข็งระหว่าง (ก) การแช่เยือกแข็งแบบช้า และ (ข) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว.....	29
ภาพที่ 9 ขึ้นมะม่วงแช่ในสารละลายออสโมติก.....	34
ภาพที่ 10 การเรียงขึ้นมะม่วงแช่อิ่มสำหรับการทำแห้งและเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด	34
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS, องศาบริกซ์) ของสารละลาย	42
ภาพที่ 12 ผลของการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งต่อปริมาณการสูญเสียน้ำและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นโดยใช้เวลาในการเก็บรักษาที่แตกต่างกันที่ (ก) ที่ระยะเวลาเริ่มต้น (ข) เก็บไว้ที่ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 เดือนและ (ค) 2 เดือน.....	46
ภาพที่ 13 ผลของการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งต่อค่าความแน่นเนื้อของขึ้นมะม่วงระหว่างการแช่ในสารละลายออสโมติกโดยใช้เวลาในการเก็บรักษาที่ต่างกัน (ก) ที่ระยะเวลาเริ่มต้น (ข) เก็บรักษาขึ้นมะม่วงที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 เดือนและ (ค) 2 เดือน.....	48
ภาพที่ 14 พฤติกรรมการทำแห้งของขึ้นมะม่วงแช่อิ่มที่เตรียมตัวอย่างที่แตกต่างกันและทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่ (ก) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ (ข) 60 องศาเซลเซียส	50
ภาพที่ 15 อัตราการทำแห้งของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบ	51

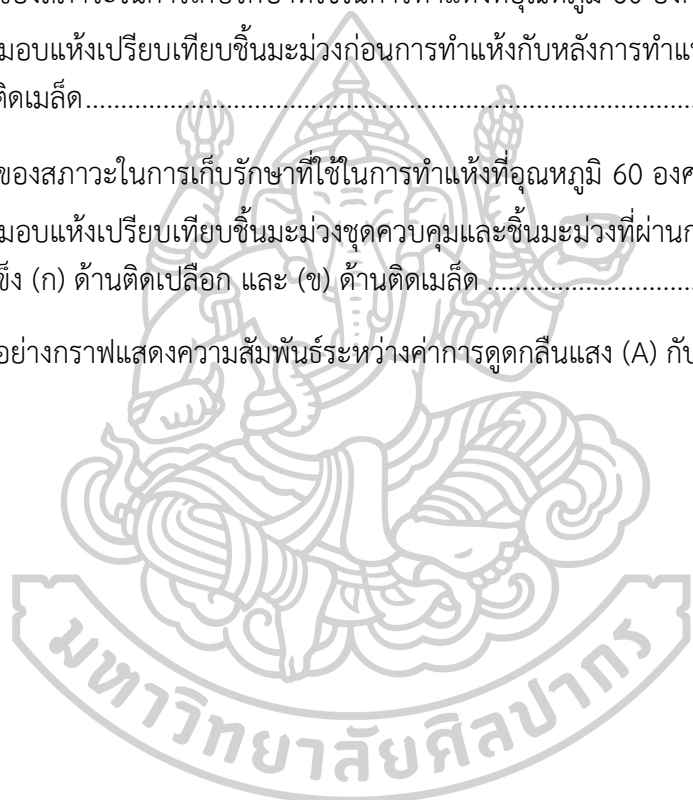
ภาพที่ 16 ตัวอย่างอัตราส่วนความชื้นของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิการทำแห้ง 60 องศาเซลเซียสโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ก) ตัวอย่างควบคุม (ข) ชื้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า และ 54

ภาพที่ 17 ผลของความแตกต่างของอุณหภูมิและสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดต่อค่า ΔE ในชั้นเนื้อมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งเปรียบเทียบตัวอย่างก่อนการทำแห้งและหลังการทำแห้ง (ก) ด้านติดเปลือก และ (ข) ด้านติดเมล็ด..... 62

ภาพที่ 18 ผลของสภาวะในการเก็บรักษาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสต่อค่า ΔE ในมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งเปรียบเทียบชั้นมะม่วงก่อนการทำแห้งกับหลังการทำแห้ง (ก) ด้านติดเปลือก และ (ข) ด้านติดเมล็ด..... 69

ภาพที่ 19 ผลของสภาวะในการเก็บรักษาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสต่อค่า ΔE ในมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งเปรียบเทียบชั้นมะม่วงชุดควบคุมและชั้นมะม่วงที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็ง (ก) ด้านติดเปลือก และ (ข) ด้านติดเมล็ด 71

ภาพที่ 20 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (A) กับค่าความเข้มข้นของ 89



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีการผลิตและส่งออกมะม่วงอบแห้งเป็นอันดับ 3 ของโลก ในปี พ.ศ. 2561-2562 ประเทศไทยมีการส่งออกมะม่วงอบแห้ง 4,296 ตัน คิดเป็นมูลค่าการส่งออก 1005 ล้านบาท ซึ่งตลาดส่งออกหลักได้แก่ สหรัฐอเมริกา จีน และฟิลิปปินส์ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2561; กรมศุลกากร, 2561) มะม่วงพันธุ์ที่นิยมใช้ในการอบแห้งได้แก่ มะม่วงแก้ว แก้วขมื่น น้ำดอกไม้ โชคอนันต์ พิมเสน และแก้วเขียว (กองบรรณาธิการนิตยสารเทคโนโลยีชาวบ้าน, 2559) โดยฤดูกาลให้ผลผลิตของมะม่วงอยู่ในระหว่างเดือนมกราคม-เดือนพฤษภาคม (มนตรี, 2554) ซึ่งจากการที่มะม่วงเป็นผลไม้ตามฤดูกาลนี้ ทำให้โดยทั่วไปโรงงานอุตสาหกรรมผู้ผลิตมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งมีการเก็บรักษาขึ้นมะม่วงเพื่อลดต้นทุนของวัตถุดิบและใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์นอกฤดูกาล ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้ในการเก็บรักษาขึ้นมะม่วงได้แก่ การแช่ขึ้นมะม่วงในสารละลายที่มีส่วนผสมของสารประกอบแคลเซียม กรดซิตริก และการเติมวัตถุเจือปนอาหารกลุ่มซัลไฟต์ (วิไล, 2559) แต่สารกลุ่มเมตาไบซัลไฟต์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต จัดเป็นหนึ่งในสารก่อโรคมะเร็งแพ้อาหาร (food allergen) ที่มีมาตรฐานและข้อกำหนดในการใช้ สำหรับมาตรฐานหรือข้อกำหนดในการใช้วัตถุเจือปนอาหารในผลไม้แห้ง ตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 581 พ.ศ. 2563 เรื่องวัตถุเจือปนอาหาร ฉบับที่ 2 กำหนดให้ในพืชผักผลไม้ชนิดแห้ง ใช้สารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่เกิน 500 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม เช่นเดียวกับ (EU Annex II, 2011) หากมีการเติมสารต้องระบุในฉลาก จากการที่มีคนแพ้สารซัลไฟต์ทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้ขึ้นมะม่วงที่เก็บรักษาด้วยการแช่ในสารละลายที่มีองค์ประกอบของสารประกอบซัลไฟต์ ที่มะม่วงอบแห้งแบบธรรมชาติไม่มีการเติมสารต่างๆ มีการผลิตมากขึ้นในการผลิตมะม่วงอบแห้งแบบธรรมชาติ ดังนั้นการศึกษาหาวิธีการเก็บรักษาขึ้นมะม่วงให้สามารถเก็บเพื่อผลิตมะม่วงนอกฤดูกาลได้จึงเป็นสิ่งที่มีความน่าสนใจ

วิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการเก็บรักษาขึ้นมะม่วงก่อนการนำไปแปรรูปเป็นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง ได้แก่ การแช่เยือกแข็ง Alfaro และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาการเตรียมตัวอย่างผลบลูเบอร์รี่ ทำการเตรียมตัวอย่างโดยแช่ด้วยไนโตรเจนเหลวก่อนการทำแห้งด้วยสารละลายออสโมติก แช่ในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำบลูเบอร์รี่แช่ลงในสารละลายซูโครสที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 60 องศาบริกซ์ อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง พบว่าเกิดการสูญเสียน้ำมากขึ้น (water loss) และมีการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (solids gain) ในระหว่างการแช่ในสารละลายออสโมติก การใช้ไนโตรเจนเหลวร่วมกับการออสโมติกส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำที่เวลา 4 ชั่วโมงเป็นร้อยละ 40.88 และส่งผลให้ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 22.79 ที่เวลา 8 ชั่วโมง โดยผลทั้งหมดในการใช้ไนโตรเจนเหลวส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลของสารละลายเพิ่มมากขึ้น เนื้อสัมผัสของผลบลูเบอร์รี่มีลักษณะแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ใน

การแช่สารละลายออสโมติก Flourey และคณะ (2008) ทำการศึกษาการแช่เยือกแข็งขึ้นมะม่วงก่อนการแช่ในสารละลายออสโมติก เพื่อศึกษาการทำแบบจำลองการถ่ายโอนน้ำและน้ำตาลในขึ้นมะม่วงแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส หลังการหั่นทันที เตรียมสารละลายออสโมติกที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 40 และ 50 องศาบริกซ์ พบว่าโครงสร้างเนื้อเยื่อหลังการแช่แข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื้อเยื่อเป็นผลให้เกิดการซึมผ่านของน้ำตาลในเซลล์เนื้อเยื่อเพิ่มขึ้น ทางด้านโครงสร้างสำหรับการแช่แข็งเนื้อเยื่อมีลักษณะฉีกขาด มีรูปร่างเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ Chung และคณะ (2013) ศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งหลังการเก็บเกี่ยวผลแอปพริคอตญี่ปุ่นเพื่อทำการสกัดน้ำโดยใช้การแช่ในสารละลายออสโมติก นำผลแอปพริคอตญี่ปุ่นทั้งผลทำการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส และ -50 องศาเซลเซียส เก็บเป็นเวลา 7 วัน และนำผลแอปพริคอตญี่ปุ่นใส่ลงในสารละลายซูโครส เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 วัน พบว่าอัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ช้ากว่าอัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส เป็น 2.6 เท่า ส่งผลให้ร้อยละการสูญเสียของเหลว (% drip loss) มากกว่าและโครงสร้างการมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการแช่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้กระบวนการแช่เยือกแข็งสำหรับการเก็บรักษาขึ้นมะม่วงสำหรับการแช่อิ่มอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งขึ้นมะม่วงก่อนนำไปแปรรูปผลไม้อบแห้งยังมีอยู่จำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็ง และระยะเวลาการเก็บรักษาขึ้นมะม่วงแช่แข็งต่อกระบวนการออสโมซิสและคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ไม่มีการเติมสารเมตาไบโซลไฟต์

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการออสโมติกของมะม่วงแช่อิ่ม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง

1.3 สมมติฐาน

- 1.3.1 การแช่เยือกแข็งแบบช้ามีผลต่อกระบวนการออสโมติกของมะม่วงแช่อิ่ม โดยการแช่เยือกแข็งแบบช้าส่งผลให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ทำให้โครงสร้างเซลล์มีช่องว่างโดยทำให้การแช่ออสโมติกเกิดขึ้นได้เร็ว
- 1.3.2 การทำแห้งที่สภาวะการเตรียมตัวอย่างต่างกันมีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งมะม่วงแช่อิ่มแห้ง โดยที่การแช่เยือกแข็งแบบช้าส่งผลให้มีอัตราการระเหยน้ำในตัวอย่างมากขึ้นและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง
- 1.3.3 การแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะช่วยในการเก็บรักษามะม่วงและช่วยรักษาคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งในการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสี ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล และปริมาณ

สารประกอบฟีนอลทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบกับสารแข่เยือกแข็งแบบช้า เนื่องจากการแข่เยือกแข็งแบบเร็วเป็นการถนอมอาหารที่ทำให้ผลึกน้ำแข็งภายในโครงสร้างเซลล์มีขนาดเล็กน่าจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลดลง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 มะม่วงที่ใช้ในการศึกษาเป็นมะม่วงพันธุ์แก้วขมิ้น ผลดิบแก่มาทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่ง TSS อยู่ในช่วง 18.6-19.6 องศาบริกซ์

1.4.2 ศึกษาการแช่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1 กักรดซิทริกร้อยละ 1 เป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนการแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการออสโมซิสและคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง

1.4.3 ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส ต่อกระบวนการออสโมซิสและคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง

1.4.4 ศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาชิ้นมะม่วงในการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 2 เดือน เริ่มตั้งแต่ 1 เดือนและ 2 เดือนเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ต่อกระบวนการออสโมซิสและคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง

1.4.5 ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงโดยการทำแห้งชิ้นมะม่วงที่มี ความกว้าง 4 เซนติเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร และความหนา 1 เซนติเมตร ทำการอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่

1.4.6 การศึกษาการอบแห้งมะม่วงโดยใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

1.4.7 คุณภาพของมะม่วงที่ศึกษาครั้งนี้ได้แก่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ (titratable acidity) ปริมาณความชื้น สี เนื้อสัมผัส ปริมาณค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (Browning index, BI) การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenol oxidase (PPO activity) และสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (Total Phenolic Content)

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 มะม่วง

มะม่วง (*Mangifera indica* Linn.) เป็นผลไม้เมืองร้อนที่ได้รับความนิยมทั่วโลก ประกอบด้วยสารแคโรทีนอยด์ และวิตามินซี (Guiamba และคณะ, 2016; Wang และคณะ, 2007) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) มะม่วงแก้วขมิ้น ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นิยมใช้ในการแปรรูปเป็นมะม่วงดอง มะม่วงกระป๋อง มะม่วงแผ่น และมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง มะม่วงควรเก็บเกี่ยวเมื่อมีความบริบูรณ์หรือความแก่ที่ 85 ถึงร้อยละ 90 การหาดัชนีความบริบูรณ์ หรือเรียกอีกอย่างว่าดัชนีการเก็บเกี่ยวในหลายๆ ลักษณะจึงได้ถูกนำมาทดลองเพื่อให้สามารถบอกความแก่ของมะม่วงได้อย่างถูกต้อง การใช้การจม/ลอยน้ำ เป็นการใช้วิธีจากการจมและลอยในน้ำของผลมะม่วง โดยผลมะม่วงที่มีอายุต่างกันจะมีลักษณะการจมและลอยน้ำที่ต่างกัน เพราะความถ่วงจำเพาะต่างกัน โดยที่ผลที่แก่จัดมักจะจมน้ำและผลที่อ่อนจะลอยน้ำ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับความถ่วงจำเพาะของผลมะม่วงเมื่ออายุมากขึ้น และมีช่องว่างระหว่างเมล็ดกับเปลือกหุ้มเมล็ดชั้นนอกน้อย ในการจม/ลอยน้ำแสดงให้เห็นถึงระหว่างความถ่วงจำเพาะการจมน้ำ และช่องว่างระหว่างเมล็ดกับเปลือกหุ้มเมล็ดชั้นนอกที่แข็ง หากช่องว่างดังกล่าวน้อยผลมะม่วงจะลอยน้ำ ความถ่วงจำเพาะที่วัดได้จะน้อยกว่า 1 แต่หากช่องว่างดังกล่าวมากผลมะม่วงจะจมน้ำ ความถ่วงจำเพาะที่วัดได้จะมากกว่า 1 ในตัวอย่างมะม่วง ทั้งนี้เมื่อทดสอบการลอย-จม ในน้ำ และลอย-จมในน้ำเกลือร้อยละ 1 และ 2 ค่าของมะม่วงน้ำดอกไม้ พบว่าผลที่มีความแก่ร้อยละ 80 ลอยน้ำ และผลที่มีความแก่ร้อยละ 85 จมน้ำแต่ลอยในน้ำเกลือร้อยละ 1 สำหรับผลที่มีความแก่ร้อยละ 90 จมในน้ำเกลือร้อยละ 1 แต่ลอยในน้ำเกลือร้อยละ 2 ดังนั้นการคัดเลือกความบริบูรณ์โดยการลอย-จมในน้ำ และลอย-จมในน้ำเกลือร้อยละ 1 และร้อยละ 2 จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ยั่งยืนสำหรับเกษตรกรและผู้ซื้อในการนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง (อภิธา บุญศิริ และ จรุงแท้ ศิริพานิช, 2550) มะม่วงเป็นผลไม้ที่มีรสชาติเข้มข้น กลิ่นหอม น่าหลงใหลและมีสารประกอบออกฤทธิ์ทางชีวภาพจำนวนมาก ประกอบด้วยเบต้า-แคโรทีน β -carotene จำนวนมาก และสารต่อต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด ได้แก่ mangiferin, anthocyanin, quercetin, gallic acid, protocatechuic acid, catechin, p-coumaric acid, chlorogenic acid, caffeic acid, epicatechin, syringic acid, vanillic acid, ferulic acid, sinapinic acid, rutin และ rosmarinic acid สารประกอบฟีนอลิกจัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ได้รับจากภายนอก และพบมากในธรรมชาติ เช่น พืชผัก ผลไม้ ชาเขียว ชาดำ และไวน์แดง เป็นต้น สารประกอบฟีนอลิกในมะม่วงมีความสำคัญมาก เนื่องจากมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านการอักเสบ ต้านไวรัส ต้านการแพ้ และมีความสามารถในการสลายลิ้มเลือด รวมไปถึงป้องกันโรคหัวใจและเป็นสารต้านการก่อมะเร็ง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Sarkar และคณะ, 2020; ศิริธร ศิริอมรรพวรรณ และนเรศ มีโส, 2552) สารประกอบฟีนอลิกเป็นกลุ่มของสารที่มีหมู่ฟีนอล ซึ่งเป็นวงเบน

ซินที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) มาเกาะ จำนวนมากในโมเลกุล สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารกลุ่มใหญ่ที่มีในธรรมชาติ พบทั่วไปในผักและผลไม้ มีมากมายหลายชนิดซึ่งสามารถจำแนกได้ตามลักษณะของจำนวนคาร์บอนอะตอม และโครงสร้างพื้นฐาน Polyphenol จัดเป็นสารกลุ่มใหญ่ที่มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานในโมเลกุล ประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (HO) มาเกาะ เป็นสารประกอบจำพวกโพลีฟีนอลิก มีอยู่ในธรรมชาติในรูปอะไกลโคไซด์ หรือจับกับน้ำตาลเป็นไกลโคไซด์ หรือจับกับน้ำตาลที่เป็น ไกลโคไซด์มี โครงสร้าง 2 ส่วน คือ C6 และ C3-C6 พบได้ในทุกส่วนของพืช โดยพบว่ากรดแกลลิกเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่พบมากที่สุด ในผลมะม่วง (Cheema และ Sommerhalter, 2015; Zhao และคณะ, 2016; ศิริธร ศิริอมรพรรณ และนเรศ มีโส, 2552) พบสารประกอบฟีนอลิกที่สำคัญในมะม่วง คือ Gallic acid, quercetin และ sinapic acid เช่นเดียวกับการศึกษา (Liu และคณะ, 2013) พบกรดแกลลิกและเคอควิซินเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่สำคัญที่มีอยู่ในมะม่วงของประเทศจีนทั้ง 4 สายพันธุ์

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดในมะม่วงในส่วนเนื้อเปลือก และผลิตภัณฑ์มะม่วง เช่น น้ำมะม่วง และมะม่วงแช่เยือกแข็ง มะม่วงอบแห้ง มะม่วงผง เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 งานวิจัยที่ศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลในมะม่วง

การเตรียมตัวอย่าง	ตัวทำละลายที่ใช้สกัด	ปริมาณสารประกอบฟีนอล	ที่มา
มะม่วงแก้วผลดิบ มะม่วงแก้วผลสุก	เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 100	3.05±0.23 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่างแห้ง 5.58±1.13 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่างแห้ง	(ศิริธร ศิริอมรพรรณ และนเรศ มีโส, 2552)
น้ำมะม่วงสุก	เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95	192 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัม ของน้ำหนัสด	(เปียตา อาร์ และ วิชนี มีโต, 2560)
เปลือกมะม่วงสุก	อะซิโตนความเข้มข้นร้อยละ 80	54.67 ± 1.5 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่างแห้ง	(Ajila และคณะ, 2007)
เนื้อมะม่วง	เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 80	51.90 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัม ของน้ำหนัสด	(Robles-Sánchez และคณะ, 2009)
เนื้อมะม่วงสุก	เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 34 ผสมกับน้ำร้อยละ 17	70.1 ± 4.61 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่างแห้ง	(Kim และคณะ, 2010)

การเตรียมตัวอย่าง	ตัวทำละลายที่ใช้สกัด	ปริมาณสารประกอบฟีนอล	ที่มา
เนื้อมะม่วงสด	เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 80	32.06–139.71 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัม ของน้ำหนัสด	(Liu และคณะ, 2013)
มะม่วงที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง มะม่วงที่ผ่านการอบแห้งแบบลมร้อน	เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 80	1725.2 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัม ตัวอย่างแห้ง 1050 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัม ตัวอย่างแห้ง	(Sogi และคณะ, 2015)
มะม่วงสด มะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง	เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 100	22 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัม ของน้ำหนัสด 16 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัม ของน้ำหนัสด	(Zhao และคณะ, 2016)
การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน การตากแดด	เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 80	4.7 ± 0.05 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่างแห้ง 4.1 ± 0.03 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่างแห้ง	(Sarkar และคณะ, 2020)
ผงเนื้อมะม่วง	เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90	180–501 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่างแห้ง	(Patiño-Rodríguez และคณะ, 2020)

2.2 การแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งเป็นกรรมวิธีการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง โดยส่วนของน้ำจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นผลึกน้ำแข็ง การตรึงน้ำกับน้ำแข็งและผลจากการเข้มข้นขึ้นของตัวละลายในน้ำที่ยังไม่แข็งตัวจะทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของอาหารลดลง (Fell, 2016; วิลโล รังสาดทอง, 2546) วัตถุประสงค์หลักของการแช่เยือกแข็ง คือ การเก็บรักษาความสดให้คงอยู่นานขึ้น ยับยั้งการเสื่อมเสียทางด้านคุณภาพและช่วยเก็บรักษาคุณค่าทางอาหาร โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการ อุณหภูมิและเวลาในการแช่เยือกแข็งมีความสำคัญมาจะช่วยลดการเสื่อมเสียของผักและผลไม้ได้ โดยทั่วไปอาหารแช่เยือกแข็งจะสามารถคงคุณภาพที่ดีได้นานเป็นปีถ้าควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ -18 องศาเซลเซียส (จิ่งแท้ ศิริพานิช, 2549; วิลโล

รังสาดทอง, 2546) แต่อย่างไรก็ตาม การแช่เยือกแข็งแบบช้าๆ โดยการใช้อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมในระหว่างการเก็บแช่แข็งและการละลายสามารถทำให้คุณภาพของอาหารเสียหายได้ (Fell, 2016) วิธีการแช่เยือกแข็งที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นการแบ่งประเภทการแช่เยือกแข็งมีได้หลายรูปแบบ ทั้งแบ่งตามชนิดของตัวกลางให้ความเย็นแบบโดยตรงและโดยอ้อม หรือแบ่งตามลักษณะการผลิตอาหารเป็นแบบต่อเนื่องหรือแบบกะ โดยจะแบ่งตามประเภทของวิธีการแช่แข็งตามลักษณะระบบแช่แข็ง โดยในการศึกษาเป็นวิธีการแช่แข็งโดยใช้อากาศสัมผัสกับอาหาร ซึ่งทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำโดยการสัมผัสกับคอยด์เย็น เมื่ออากาศเย็นสัมผัสกับอาหารที่มีอุณหภูมิสูงกว่า อากาศจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากอาหาร ในที่นี้การแช่แข็งโดยใช้อากาศเย็นนิ่ง (still air freezing หรือ sharp freezing) จะใช้อากาศเย็นที่อุณหภูมิตั้งระหว่าง -18 ถึง -40 องศาเซลเซียส อากาศมีการเคลื่อนที่อย่างช้าๆ หรืออาจไม่มีการเคลื่อนที่เลย ทำให้ใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งนาน (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558)

Jha และคณะ (2019) พบว่าในระหว่างการแช่เยือกแข็งอุณหภูมิและเวลาจะสัมพันธ์กับอัตราการแช่เยือกแข็ง โดยอัตราการแช่เยือกแข็งเป็นตัวกำหนดขนาดของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ ปัจจัยการเก็บรักษาในการแช่เยือกแข็ง เช่น อุณหภูมิการเก็บรักษา ความผันผวนของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษา มีผลต่อคุณภาพของผลไม้และผักแช่แข็ง อุณหภูมิการแช่เยือกแข็งที่ต่ำกว่าจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ เช่น มีการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -24 องศาเซลเซียสในถั่วและกะหล่ำดอก ยืดอายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นเป็น 30 เดือนและ 18 เดือน เปรียบเทียบกับ 24 เดือนและ 12 เดือน ที่อุณหภูมิการแช่เยือกแข็งเป็น -18 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้แต่ละชนิดแตกต่างกันมาก (จรัสแท้ ศิริพานิช, 2549)

การแช่เยือกแข็งต้องมีการคำนึงถึงองค์ประกอบภายในเซลล์ของอาหาร ซึ่งประกอบด้วยตัวถูกละลาย เช่น คาร์โบไฮเดรต เกลือ และสารประกอบอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อวิธีการแช่เยือกแข็ง ในเนื้อเยื่อของสัตว์หรือในเนื้อเยื่อของผักมีน้ำเป็นองค์ประกอบทั้งภายในและภายนอกเซลล์ของเหลวภายนอกเซลล์มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำกว่าภายในเซลล์ ซึ่งอาหารแต่ละชนิดจะมีปริมาณความชื้น และมีจุดเยือกแข็งที่ต่างกันแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นและจุดเยือกแข็งของอาหาร

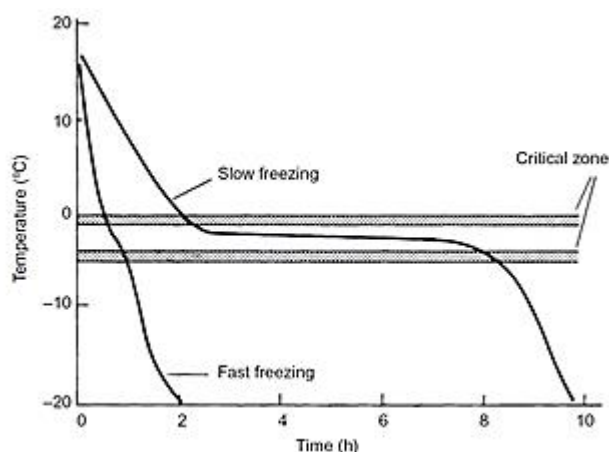
ชนิดอาหาร	ปริมาณความชื้น (%)	จุดเยือกแข็ง (°C)
ผลไม้	87-95	-0.9 ถึง -2.7
นม	87	-0.5
ผัก	78-92	-0.8 ถึง -2.8
ไข่	74	-0.5
ปลา	65-81	-0.6 ถึง -2.0
เนื้อสัตว์	55-70	-1.7 ถึง -2.2

ที่มา: Fell (2016)

ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย โดยการเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลายในระหว่างการแช่เยือกแข็งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า pH ความหนืด ความตึงผิวและปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิลดลงตัวละลายแต่ละตัวจะไปถึงจุดอิ่มตัวและตกผลึก โดยตัวถูกละลายที่ต่างกันก็จะมีอุณหภูมิที่สถานะสมดุลในการตกผลึกต่างกัน ซึ่งจะสมดุลกับของเหลวส่วนที่ไม่แข็งตัวและส่วนที่แข็งตัวกลายเป็นของแข็งหรือน้ำแข็ง เช่น สำหรับน้ำตาลกลูโคส -5 องศาเซลเซียส น้ำตาลซูโครส -14 องศาเซลเซียส สารละลายโซเดียมคลอไรด์ -21.13 องศาเซลเซียส และแคลเซียมคลอไรด์ -55 องศาเซลเซียส แต่ในการแช่เยือกแข็งจะเลือกระบุอุณหภูมิแต่ละอุณหภูมิในองค์ประกอบที่เข้าชั้นของอาหารไม่ได้ จึงมีการเลือกอุณหภูมิที่ต่ำสุดของอุณหภูมิตัวทำละลายของอาหารเป็นอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็ง (Fell, 2016) การแช่แข็งทำให้เกิดช่องว่างภายในระหว่างเซลล์มากกว่าในผลไม้สดและรายงานว่าการแช่แข็งส่งผลต่อค่าสีเป็นเหตุทำให้เกิดปฏิกิริยา browning และพบว่าหลังการแช่แข็งส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มมากขึ้นในแอปเปิ้ล (Chassagne-Berces และคณะ, 2010)

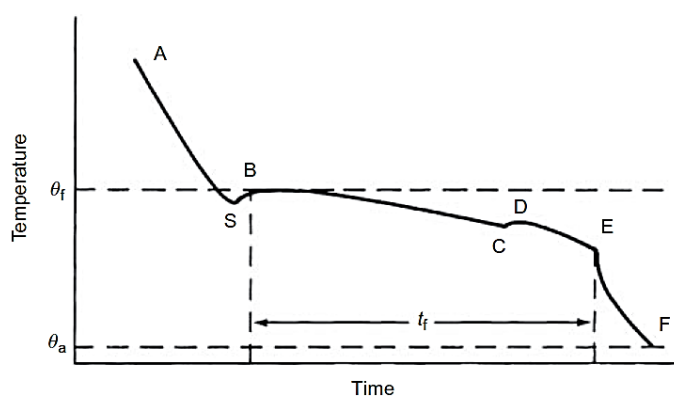
2.2.1 การเกิดผลึกน้ำแข็ง

จุดเยือกแข็งของอาหาร คืออุณหภูมิที่มีผลึกน้ำแข็งเล็กๆ ในปริมาณที่สมดุลกับน้ำที่อยู่รอบๆ ก่อนที่จะเกิดผลึกน้ำแข็งต้องมีนิวเคลียส (nucleus) ของโมเลกุลน้ำก่อน จึงมีการเกิดนิวเคลียสหรือเรียกว่า นิวคลีเอชัน (nucleation) ก่อนการเกิดผลึกน้ำแข็ง ซึ่งนิวคลีเอชันมี 2 แบบ คือแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous) และแบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous) ซึ่งเป็นการเกิดนิวเคลียสรอบๆ อนุภาคแขวนลอยหรือที่ผนังเซลล์ ซึ่งในเนื้อเยื่อของสัตว์หรือของพืชมีน้ำเป็นองค์ประกอบทั้งภายในเซลล์และภายนอกเซลล์ ของเหลวภายนอกเซลล์มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำกว่า และผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นที่บริเวณภายนอกเซลล์ก่อน อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งนิวเคลียสจำนวนมากขึ้นและการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กจำนวนมากสิ่งนี้มีส่วนช่วยในการรักษาคุณภาพอาหาร อัตราการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่ในช่วงการแช่เยือกแข็งเป็นตัวกำหนดการเติบโตของผลึกน้ำแข็ง อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำที่เคลื่อนที่ไปยังผลึกที่โตขึ้นและของสารละลายเคลื่อนที่ออกจากผลึก เวลาที่อุณหภูมิของอาหารใช้เคลื่อนผ่านช่วงวิกฤต ดังภาพที่ 1 จึงเป็นตัวกำหนดทั้งขนาดและจำนวนของผลึกน้ำแข็ง อย่างไรก็ตามพบความแตกต่างอย่างมากในขนาดของผลึกน้ำแข็งที่อัตราการแช่เยือกแข็งที่คล้ายคลึงกันเนื่องจากความแตกต่างขององค์ประกอบในอาหาร และถึงแม้ว่าจะเป็นอาหารที่คล้ายคลึงกันก็อาจจะมีการเตรียมตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกัน (Fell, 2016; วิลโล รังสาตทอง, 2546)



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการแช่เยือกแข็งของอาหารผ่านช่วงวิกฤติ
ที่มา: Fell (2016)

หากมีการติดตามอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของอาหาร (จุดที่เย็นช้าที่สุด) ขณะที่ความร้อนถูกกำจัดไปจะได้เส้นกราฟที่มีลักษณะเฉพาะแบ่งได้เป็น 6 ช่วง ดังภาพที่ 2 ดังนี้



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิระหว่างการแช่เยือกแข็ง
ที่มา: Fell (2016)

ช่วง AS อุณหภูมิของอาหารจะลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (θ_f) ซึ่งนอกจากน้ำบริสุทธิ์แล้วจะต่ำกว่า 0°C เสมอ ที่จุด S น้ำจะยังเป็นของเหลวอยู่แม้ว่าจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการทำให้เย็นยิ่งยวด (Supercooling) ซึ่งบางครั้งอาจต่ำกว่าจุดเยือกแข็งถึง 10°C และเป็นช่วงที่เริ่มเกิดนิวเคลียส ระยะเวลาของช่วงการทำให้เย็นยิ่งยวดขึ้นอยู่กับประเภทของอาหารและอัตราการถ่ายเทความร้อนออก

ช่วง SB อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดเยือกแข็งในขณะที่เริ่มมีผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้น และมีการปล่อยความร้อนแฝงสำหรับการตกผลึก

ช่วง BC มีการกำจัดความร้อนออกจากอาหารในอัตราเร็วกว่าเดิม เกิดน้ำแข็งขึ้นในขณะที่มีการกำจัดความร้อนแฝงออกไป แต่อุณหภูมิยังคงค่อนข้างคงที่ที่จุดเยือกแข็ง จุดเยือกแข็งจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่ยังไม่แข็งตัวเพิ่มขึ้นและมีน้ำแข็งเกิดขึ้นมากในช่วงนี้ อุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อย เมื่อนิวเคลียสที่เสถียรเกิดขึ้นก็จะเกิดการโตอย่างต่อเนื่อง ในช่วงนี้จะเกิดส่วนสำคัญของน้ำแข็ง

ช่วง CD สารละลายหนึ่งจะเกิดการอึดตัวยิ่งยวดและตกผลึกออกมา ความร้อนแฝงของการตกผลึกถูกปล่อยออกมา อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิยูเทคติก (eutectic) สำหรับสารละลายนั้นๆ

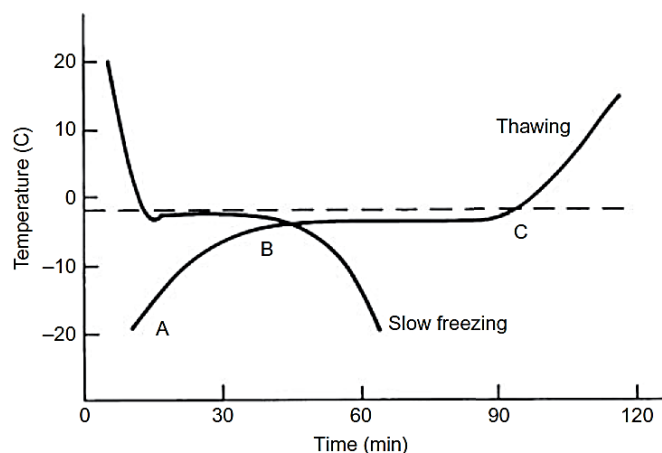
ช่วง DE การตกผลึกของน้ำและตัวถูกละลายยังคงดำเนินต่อไป กำหนดเวลาทั้งหมด t_f (freezing plateau) ได้โดยอัตราการกำจัดความร้อน ขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทมวลของเฟสน้ำไปยังนิวเคลียสและอัตราที่ความร้อนถูกกำจัดออก อุณหภูมิของส่วนผสมน้ำ น้ำแข็ง ลดลงสู่อุณหภูมิของเครื่องแช่เยือกแข็ง มีน้ำส่วนหนึ่งจะยังไม่แข็งตัวที่อุณหภูมิที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งระดับอุตสาหกรรม ซึ่งปริมาณน้ำดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของอาหารและอุณหภูมิของอาหารแช่เยือกแข็ง เช่น ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส มีน้ำแข็งร้อยละ 88 ในเนื้อแกะร้อยละ 91 ในปลา และร้อยละ 93 ในอัลบูมินของไข่

ช่วง EF หากการแช่เยือกแข็งยังคงต่ำกว่าการแช่เยือกแข็งระดับอุตสาหกรรม การเกิดขึ้นของน้ำแข็งและความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะดำเนินต่อไปจนกว่าจะไม่มีน้ำที่สามารถเป็นน้ำแข็งได้อีก อุณหภูมิจะลดลงเมื่อมีความร้อนถูกกำจัดออกจากน้ำแข็ง อุณหภูมิ (θ_a) ที่จุด F เรียกว่า "อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะเป็นแก้ว" ของสารละลายเข้มข้นอสัณฐาน เมื่อถึงจุดวิกฤติ ความเข้มข้นขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย สถานะทางกายภาพของของเหลวที่ไม่เป็นน้ำแข็งจะถูกเปลี่ยนจากของเหลวที่มีความหนืดเป็นของแข็งที่มีความเปราะบางและไม่มีรูปร่าง (Fell, 2016; วิลโล รังสาดทอง, 2546)

2.2.2 การละลายน้ำแข็ง (Thawing)

น้ำแข็งที่ผิวหน้าของอาหารจะละลายกลายเป็นชั้นน้ำในการละลายน้ำแข็งในอากาศหรือในน้ำมีค่าการนำความร้อนและการแพร่ความร้อนต่ำกว่าน้ำแข็ง อัตราการนำความร้อนของผิวหน้าสู่น้ำแข็งด้านในของอาหารจึงลดลง ผลการเป็นฉนวนนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นของอาหารที่น้ำแข็งละลายแล้วในอาหารนี้หนาขึ้น ในทางกลับกันเมื่อชั้นน้ำแข็งนี้หนาขึ้นในระหว่างการแช่เยือกแข็งจะเป็นการเร่งการถ่ายเทความร้อน การละลายจึงเป็นกระบวนการที่ใช้เวลานานกว่าการแช่เยือกแข็งเมื่อใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิหรือสภาวะอื่นๆ คล้ายคลึงกัน (วิลโล รังสาดทอง, 2546)

เมื่ออาหารแช่แข็งละลายโดยใช้อากาศหรือน้ำ พื้นผิวน้ำแข็งจะละลายจากชั้นของน้ำ น้ำมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าและมีการแพร่กระจายความร้อนต่ำกว่าน้ำแข็งและพื้นผิวที่เป็นชั้นน้ำจึงช่วยลดอัตราการรวมกับการถ่ายเทความร้อนไปยังชั้นน้ำแข็งด้านใน ผลของความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออาหารเกิดการละลายที่หนาขึ้น (ในทางตรงกันข้ามระหว่างการแช่แข็ง ความหนาของน้ำแข็งจะเพิ่มขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนเร่งขึ้นเนื่องจากการนำความร้อนของน้ำแข็งสูงขึ้น)



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างการละลาย
ที่มา: Fell (2016)

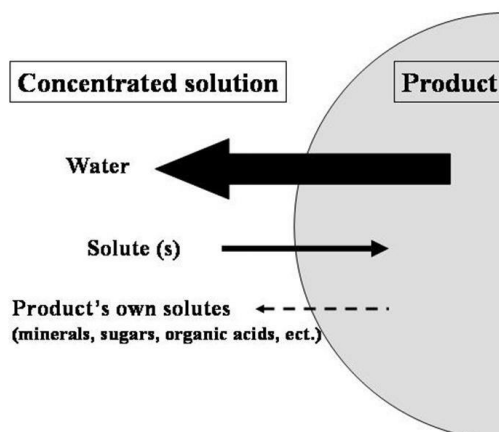
ระหว่างการละลาย จากภาพที่ 3 อุณหภูมิ (AB) ที่เริ่มต้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเกิดจากการที่ไม่มีชั้นน้ำที่สำคัญอยู่รอบๆ อาหาร จากนั้นจะมีช่วงที่ยาวนานเมื่ออุณหภูมิของอาหารใกล้เคียงกับการละลายน้ำแข็ง (BC) ในช่วงเวลานี้อาจเกิดความเสียหายของเซลล์เป็นสาเหตุมาจากการแช่เยือกแข็งแบบช้าหรือการตกผลึกซ้ำทำให้องค์ประกอบภายในเซลล์ละลายน้ำออกมาและเกิดการสูญเสียสารอาหารที่ละลายน้ำได้

2.3 การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก (osmotic dehydration)

การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกหรือการแช่อิ่มเป็นการกำจัดน้ำออกจากผักหรือผลไม้โดยการให้อาหารสัมผัสกับน้ำตาลทรายหรือใช้น้ำเชื่อมความเข้มข้นสูง ทำการออสโมติกจนน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำหนักเดิม แล้วจึงแช่เยือกแข็งหรืออบแห้งต่อไป ในการทำแห้งผลไม้เมืองร้อนด้วยวิธีออสโมติกพบว่า สามารถกำจัดน้ำได้ถึงร้อยละ 40 ของวัตถุดิบ สำหรับมะม่วงสุกใช้เวลา 4 ชั่วโมง การแช่อิ่มทั้งการแช่อิ่มแบบเร็วและการแช่อิ่มแบบช้า ซึ่งการแช่อิ่มแบบช้าเป็นการแช่อิ่มแบบค่อยๆ เพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลเป็นวิธีที่ดีกว่าการแช่อิ่มแบบเร็วเพราะจะทำให้ผักหรือผลไม้ไม่หดตัวมาก ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะดูสวยกว่า เก็บได้นาน ในการผลิตโดยทั่วไป น้ำเชื่อมที่ใช้ครั้งแรกจะเข้มข้นปานกลางประมาณร้อยละ 30 ถ้าความเข้มข้นสูงกว่านี้จะทำให้ผักหรือผลไม้เกิดการเหี่ยวจน ควรเพิ่มน้ำตาลลงไปทีละน้อยประมาณร้อยละ 10 ทำซ้ำกันทุกวัน จนกระทั่งน้ำเชื่อมข้นแต่ไม่เกินร้อยละ 65 สามารถเติมกรดซิตริกร้อยละ 0.1 เพื่อไม่ให้น้ำเชื่อมตกผลึก เมื่อผลไม้หรือผักอิมตัวด้วยน้ำตาลแล้วให้นำไปอบให้แห้ง การทำจะต้องค่อยๆ เพิ่มความหวาน (เติมน้ำตาลทีละน้อย) ในการแช่อิ่ม โดยการถายน้ำเชื่อมที่แช่อิ่มมาเคี้ยวใหม่ เติมน้ำตาลแล้วนำกลับไปแช่อิ่ม ทำเช่นนี้หลายๆ ครั้งจนกว่าน้ำตาลจะซึมเข้าไปในเนื้อผลไม้ การแช่ด้วยสารละลายออสโมติกจะเกิดน้ำตาลอินเวอร์ทขึ้นในระหว่างการแช่อิ่ม น้ำตาลอินเวอร์ทช่วยให้เนื้อสัมผัสของผักและผลไม้แช่อิ่มดีขึ้น ไม่แห้ง เหนียวและแข็งจนเกินไป นอกจากนี้ยังทำให้ผลิตภัณฑ์มีรสหวาน เพราะฟรุกโทสมีความหวาน อาจมีการเติมกรดลงไปในน้ำเชื่อมเพื่อเปลี่ยนซูโครสเป็นน้ำตาลอิน

เวอร์ท การเปลี่ยนซูโครสเป็นน้ำตาลอินเวอร์ทขึ้นกับความเข้มข้นต่างลดลงและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลสูงถึงร้อยละ 67.5 หรือมากกว่านั้นในการแช่หมักหรือผลไม้ อาจส่งผลให้เกิดการตกผลึกของน้ำตาล ป้องกันการตกผลึกนี้ได้โดยการเติมน้ำเชื่อมกลูโคสที่ความเข้มข้นร้อยละ 35-50 ถ้าใช้ปริมาณมากเกินไป ผิวของผลิตภัณฑ์จะเหนียวเหนอะ ส่วนการทำให้ผักหรือผลไม้มีเนื้อแน่นขึ้น สามารถใช้สารเคมีประเภทเกลือของแคลเซียม เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) แคลเซียมไบซัลเฟต [$\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$] แต่นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์มากที่สุด ก่อนนำผักหรือผลไม้ไปแช่น้ำเชื่อมจะต้องนำผักผลไม้ไปให้ความร้อนเสียก่อน การให้ความร้อนทำได้โดยการลวกหรือนึ่งด้วยไอน้ำ ซึ่งจะช่วยให้น้ำตาลแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อวัตถุดิบง่ายขึ้นและไม่เกิดการเหี่ยวยุบ ผลิตภัณฑ์ใช้ชื่อผลิตภัณฑ์ว่าแช่หมัก แต่มีความเข้มข้นของน้ำตาลต่ำกว่าที่กำหนดในมาตรฐานผลไม้แช่หมักคือต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 (วิไล รังสาทอง, 2546)

การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกเป็นการเตรียมตัวอย่างก่อนการทำแห้ง โดยเฉพาะกับผลิตภัณฑ์ที่ไวต่ออุณหภูมิ เช่น ผลไม้ ซึ่งเป็นการแช่ผลิตภัณฑ์ในสารละลายเข้มข้นที่ละลายได้ เช่น น้ำตาลเกลือ ที่เกิดการคายน้ำและการดูดซับปริมาณสารละลายของตัวผลิตภัณฑ์ การศึกษาการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกมีการศึกษาอย่างแพร่หลายในผลไม้หลายชนิด เช่น มะม่วง แอปเปิ้ล มะละกอ ฝรั่ง มะเขือเทศ และสับปะรด (Guiamba และคณะ, 2016) โดยทั่วไปการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกเพื่อต้องการรักษารสชาติ กลิ่นและโครงสร้างของผลไม้ การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกเกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำออกจากเนื้อเยื่อผลไม้ โดยการจุ่มผลไม้ลงในสารละลายออสโมติก โดยอาศัยความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างสารละลายออสโมติกกับผลไม้เป็นแรงดันในการกำจัดน้ำ เป็นกระบวนการลดค่าแอกติวิตีของน้ำและปริมาณน้ำลงด้วยการใช้หลักการ ออสโมติก หรือการแพร่ผ่านของน้ำในชั้นอาหารออกสู่ภายนอก ส่วนสารละลายออสโมติกจะเข้าไปภายในเนื้อเยื่อเซลล์ของชั้นอาหาร แสดงการถ่ายโอนมวลสารระหว่างกระบวนการออสโมติกในผักและผลไม้ดังภาพที่ 4 โดยกระบวนการทำแห้งด้วยออสโมติกถูกนำไปใช้ที่อุณหภูมิต่ำส่งผลปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลลดลงได้ การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกส่วนใหญ่จะเป็นการปรับสภาพก่อนการทำแห้งด้วยลมร้อนมีการตั้งข้อสังเกตว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนนั้นจะทำหลังจากการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกเนื่องจากมีวิธีการทำที่ง่ายช่วยในการลดปริมาณความชื้น พื้นผิวที่ดีขึ้นและสีและลักษณะของผลไม้ ส่งผลให้มีอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นและประหยัดพลังงาน (Bozkir และErgün, 2020; Guiamba และคณะ, 2016)



ภาพที่ 4 การถ่ายโอนมวลสารระหว่างการออสโมติกในผักและผลไม้
ที่มา: ดัดแปลงจาก Raoult-Wack และคณะ, 1994

จากการถ่ายโอนมวลสารระหว่างการออสโมติกในผักและผลไม้ จะพบว่าเมื่อจุ่มผักหรือผลไม้ลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าภายในเซลล์ของผักหรือผลไม้ เซลล์เนื้อเยื่อชั้นแรกของผักและผลไม้จะสัมผัสกับสารละลายและเกิดการสูญเสียน้ำเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างสารละลายออสโมติกกับเซลล์ผักและผลไม้ซึ่งนำไปสู่การหดตัวของผักและผลไม้ หลังจากเกิดการสูญเสียน้ำของเซลล์เนื้อเยื่อชั้นแรกแล้ว ความต่างศักย์ทางเคมีที่แตกต่างกันของเซลล์เนื้อเยื่อชั้นแรกและชั้นที่สอง หลังจากนั้นเซลล์ของชั้นที่สองจะเริ่มป้อนน้ำไปยังเซลล์ของชั้นแรกแล้วเกิดการหดตัว กระบวนการถ่ายโอนมวลและการหดตัวของเนื้อเยื่อจะเริ่มจากชั้นพื้นผิวจนเข้าไปที่บริเวณตรงกลาง ชั้นของผักและผลไม้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการดำเนินการแช่ ในบริเวณตรงกลางเซลล์จะเกิดการสูญเสียน้ำและการถ่ายเทมวลจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งการหดตัวของเนื้อเยื่อและการถ่ายโอนมวลจะเกิดขึ้นพร้อมกันในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยออสโมติก (Ahmed และคณะ, 2016)

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติก

ความหลากหลาย ระดับความสุก การเตรียมตัวอย่าง อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก วัสดุการกวน อัตราส่วนชิ้นอาหารต่อสารละลายออสโมติก สารเติมแต่ง คุณสมบัติทางเคและกายภาพ และโครงสร้างของจนพลศาสตร์การถ่ายโอนมวล (Ahmed และคณะ, 2016)

ตัวบ่งชี้กระบวนการสำหรับการทำแห้งด้วยออสโมติก

มีการตรวจสอบเพื่อทราบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวบ่งชี้กระบวนการ หรือติดตามการถ่ายเทมวลตัวบ่งชี้กระบวนการอาจวัดเป็นค่าปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid gain) ปริมาณน้ำที่สูญเสียน้ำ (water loss) และปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (weight reduction) (ลัทพรธ, 2551)

$$\%WL = \frac{m_i z_i - m_f z_f}{m_i} * 100$$

$$\%SG = \frac{m_f s_f - m_i s_i}{m_i} * 100$$

กำหนดให้ m_i เท่ากับ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (กรัม)

m_f เท่ากับ น้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่าง (กรัม)

z_i เท่ากับ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างบนฐานเปียก (กรัมน้ำ/ กรัม)

z_f เท่ากับ ปริมาณความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างบนฐานเปียก (กรัมน้ำ/ กรัม)

s_i เท่ากับ เศษส่วนมวลเริ่มต้นของของแข็งทั้งหมด (กรัมของแข็ง / กรัม)

s_f เท่ากับ เศษส่วนมวลสุดท้ายของของแข็งทั้งหมด (กรัมของแข็ง / กรัม) (Bozkir และ

Ergün, 2020)

การใช้สารเคมีเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลและยืดอายุผักผลไม้แปรรูปในสารละลายออสโมติก

การใช้สารเคมีเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลและยืดอายุผักผลไม้แปรรูปในสารละลายออสโมติก Galetto และคณะ (2010) ศึกษาการใส่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ก่อนการแช่เยือกแข็งผลสตอเบอร์รี่ นำผลสตอเบอร์รี่มาทำการศึกษาทั้งหมดจำนวน 70 ผล โดยทำการแบ่งศึกษา 45 ผล และ 25 ผลสำหรับการวัดคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส วัดค่าการสูญเสียของเหลว (drip loss) และวัดค่าทางเคมี นำผลสตอเบอร์รี่แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ขณะแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอุณหภูมิตรงกลางผลสตอเบอร์รี่เป็น -20 องศาเซลเซียส ทำในอัตราส่วนต่อปริมาตร 1 ต่อ 33 ทำการศึกษาโดยเก็บไว้ในกล่องพลาสติกเป็นระยะเวลา 55 วัน ที่อุณหภูมิ -22 องศาเซลเซียส และทำการละลายที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ประมาณ 15 ชั่วโมง ผลจากการศึกษา พบว่าจากการนำผลสตอเบอร์รี่ใส่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ส่งผลดีในด้านการรักษาความแน่นเนื้ออย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการวัดระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมีการเปลี่ยนแปลงที่ต่ำ ส่งผลให้ค่าการสูญเสียรูปร่างมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลสตอเบอร์รี่ที่ไม่มีการแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และพบว่าช่วยรักษาปริมาณน้ำและป้องกันการสูญเสียปริมาณความชื้นจากชั้นผลไม้ระหว่างการแช่เยือกแข็งและการหลอมละลายซึ่งช่วยลดการสูญเสียโครงสร้างและเนื้อเยื่อเซลล์ โดยลดปริมาณการสูญเสียของเหลว (% drip loss) ลดลงเป็นร้อยละ 51

2.4 การอบแห้ง

กระบวนการอบแห้ง (drying) คือการลดความชื้นของอาหารจนถึงระดับที่สามารถชะลอหรือระงับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งทำให้อาหารสามารถเก็บได้นานขึ้น เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการถนอมอาหาร ในระยะแรกการทำแห้ง น้ำจะเคลื่อนที่มาจากผิวอาหาร ทำให้ผิวอาหารเปียกชุ่มชั้นบรรยากาศที่ผิวอาหารมีการอึดตัวด้วยไอน้ำ ถ้าอัตราเร็วของน้ำที่เคลื่อนที่มาที่บริเวณผิวหน้าอาหารที่มากกว่าหรือเท่ากับอัตราเร็วของน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอและเคลื่อนย้ายออกไปจาก

อาหาร ความร้อนที่ได้รับจะถูกใช้ในการระเหยน้ำทั้งหมด ดังนั้นอุณหภูมิของอาหารจะคงที่ เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำในอาหารลดลงอาหารจึงมีการหดตัว การเคลื่อนที่ของน้ำมาที่ผิวอาหารช้าลงทำให้เกิดการระเหยน้ำออกไป ผิวอาหารก็จะแห้ง ทำให้อาหารมีความร้อนสูงขึ้น (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมเพียร จิรชัย, 2542) ซึ่งมีหลักการคือให้ความร้อนผ่านตัวกลางไปสู่ชิ้นอาหาร เพื่อให้อุณหภูมิของอาหารสูงขึ้นจนกระทั่งน้ำสามารถระเหยน้ำออกได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพและเคมีต่างๆ และกระบวนการทำแห้งเป็นกระบวนการที่ถนอมอาหารโดยผลิตภัณฑ์อบแห้งที่เป็นพืชทางการเกษตรหรือพืชสมุนไพรที่ต้องใช้พลังงานที่สูงกว่า เนื่องจากมีความชื้นสูง (Oikonomopoulou และคณะ, 2011; Russo และคณะ, 2013)

2.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการทำแห้งด้วยสมการแบบชั้นบาง

จลนพลศาสตร์การทำแห้งเป็นการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งของตัวอย่าง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการที่เรียกว่า logarithmic model เพื่อใช้ในการหาปริมาณความชื้น และระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง โดยรูปแบบของสมการอย่างง่ายที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ

$$MR = \frac{(M - M_e)}{(M_0 - M_e)} \quad (1)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M คือ ความชื้นของวัสดุ (ร้อยละฐานแห้ง)

M_e คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (ร้อยละฐานแห้ง)

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (ร้อยละฐานแห้ง)

นอกจากสมการอย่างง่าย (1) ที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งของวัสดุแล้ว ยังมีสมการทำแห้งชั้นบางแบบเอ็มพีริคัล (empirical equations) เพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งของวัสดุให้มีความเหมาะสมกับวัสดุได้ดีมากยิ่งขึ้น เช่น สมการ Lewis, Page, Modified Page, Logarithmic, Two term, Handerson and Pabis และ Modified Handerson and Pabis แบบจำลองมักใช้เพื่อศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการทำนายจลนพลศาสตร์การทำแห้งของผลิตภัณฑ์และปรับพารามิเตอร์การทำงานให้เหมาะสม (Oduola และOforkansi, 2016) โดยการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำให้อาหารแห้งและนำแบบจำลองมาคำนวณอัตราการทำแห้ง แต่เพื่อกำหนดอัตราส่วนความชื้นเป็นฟังก์ชันของเวลา มีการใช้แบบจำลองที่แตกต่างกันสามแบบ ได้แก่ สมการ Lewis, Page และ Modified Page

ปริมาณความชื้นจะแสดงเป็นรูปแบบของปริมาณความชื้นอิสระหรือความชื้นที่สภาวะสมดุลสามารถแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะได้เป็น

$$\frac{dm_t}{dt} = -k(m_t - m_e) \quad (2.1)$$

$$\int_{m_0}^{m_t} \frac{dm_t}{m_t - m_e} = -k \int_0^t dt \quad (2.2)$$

$$\ln\left(\frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e}\right) = -kt \quad (2.3)$$

$$\frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = e^{-kt} = \exp(-kt) \quad (2.4)$$

$$\text{แต่ } \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = MR$$

$$\text{ดังนั้น } MR = \exp(-kt) \quad (2.5)$$

โดยสมการที่ 2.5 คือสมการชั้นบางลิวอิส สำหรับการตัดแปลงสมการที่ 2.5 จะได้เป็นสมการชั้นบางเพจ

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (2.6)$$

สมการที่ 2.6 คือสมการชั้นบางเพจ สำหรับการตัดแปลงสมการที่ 2.6 ได้เป็นสมการชั้นบางโมดิฟายด์เพจ

$$MR = \exp(-kt)^n \quad (2.7)$$

ในการวิเคราะห์ที่ใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมของสมการที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรม การทำแห้งของวัสดุ นั้น จะพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (*coefficient of determination; R²*) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (*root mean square error; RMSE*) โดยค่า *R²* ควรมีค่าเข้าใกล้ 1.0 และค่า *RMSE* ควรมีค่าต่ำ ซึ่งค่า *RMSE* เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณค่าความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับอัตราส่วนความชื้นที่ประมาณได้จากสมการทำแห้งชั้นบาง และเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบโดยใช้เกณฑ์ข้อสนเทศของอาไคเคะ (*Akaike's Information Criterion, AIC*) ซึ่งได้ค่าการสร้างการประมาณความแปรปรวนของข้อสนเทศคูลส์แบล็ค-ไลท์เบอร์ (*KullbackLeibler Information*) ระหว่างตัวแบบจริงกับตัวแบบที่เหมาะสมที่มีคุณสมบัติไม่เอนเอียง โดยคัดเลือกให้มีค่าเอไอซีมีค่าต่ำ

(Li และคณะ, 2018) แสดงให้เห็นว่าสมการที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งวัสดุนั้น มีความแม่นยำในการทำนาย เพื่อนำไปใช้อธิบายการทำแห้งของวัสดุได้อย่างเหมาะสม

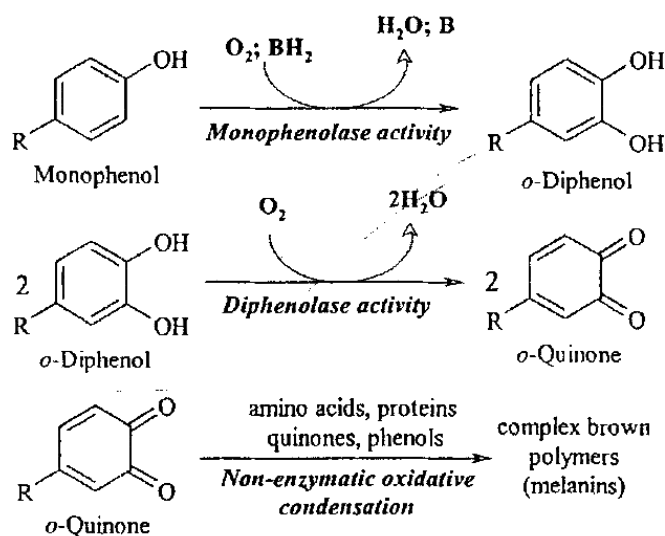
2.4.2 กลไกการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้อบแห้ง

การทำแห้งผักและผลไม้เป็นเทคนิคที่มีมานานแล้วปริมาณความชื้นของอาหารอบแห้งขึ้นกับกระบวนการหรือวิธีการในการอบแห้ง แต่ส่วนใหญ่จะต่ำกว่าร้อยละ 20 ส่วนอาหารที่มีความชื้นปานกลาง (intermediate-moisture หรือ semi-moist foods) จะมีปริมาณความชื้นอยู่ที่ช่วงร้อยละ 15-30 โดยในปัจจุบันอาหารอบแห้งเป็นที่นิยมของนักท่องเที่ยว ทำให้สามารถพกอาหารติดตัวไปได้ เพราะมีน้ำหนักเบา การพัฒนาคุณภาพของอาหารอบแห้งเป็นอาหารสำเร็จรูปพร้อมรับประทาน ให้ความสะดวกสบาย จะทำให้ปริมาณความต้องการผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้อบแห้งเพิ่มสูงขึ้น (วิลโลว์ รังสาทอง, 2546) ในการอบแห้งมีปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) คือปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ชนิดหนึ่งซึ่งมักพบในอาหารโดยเฉพาะ ผัก (vegetable) ผลไม้ (fruit) ชา กาแฟ โกโก้ และอาหารทะเล โดยเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของอาหาร เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ มีความเกี่ยวข้องกับการความเสียหายของเซลล์เมื่อเซลล์ถูกทำลาย และส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการเผาผลาญของสารประกอบฟีนอลิกในเซลล์พืชที่ไม่ถูกทำลายสารประกอบฟีนอลิกในแวคิวโอลของเซลล์จะอยู่ห่างจากเอนไซม์ที่มีอยู่ในไซโทพลาสซึม แต่เมื่อเนื้อเยื่อได้รับความเสียหายหรือถูกทำลายจากการตัด บด หั่น หรือการตัดเนื้อเยื่อจะเกิดการผสมของเอนไซม์และสารประกอบฟีนอลิกรวมและเกิดการแพร่กระจายออกซิเจนภายในเนื้อเยื่อได้ง่ายขึ้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Banerjee และคณะ, 2015) โดย Enzymatic browning reaction จะเกิดขึ้นได้โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ

- สารตั้งต้น (substrate) คือ สารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) เช่น แคทีชิน (catechins) ซึ่งเป็นสาร flavonoid ที่พบมากในใบชา ไทโรซีน (tyrosine) ซึ่งเป็นกรดแอมิโน (amino acid) อาหารทะเล และแทนนิน (tannin) ที่พบในผัก และผลไม้ เป็นต้น
- เอนไซม์ (enzyme) ในกลุ่มฟีนอกซิเดส (phenolase) เช่น polyphenol oxidase (PPO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค่า pH ที่เหมาะสม ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ฟีนอกซิเดส อยู่ระหว่าง 5-7
- ออกซิเจน

เอนไซม์พอลิฟีนอกซิเดส (PPO) เป็นเอนไซม์ที่มีส่วนประกอบของทองแดง ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของสารประกอบฟีนอลิกให้กลายเป็นสารควิโนนที่มีปฏิกิริยาสูง ซึ่งเกิดการรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่เป็นสีเข้มของเมลานิน PPO เริ่มการเกิดสีน้ำตาลด้วยสารตั้งต้นภายใน เช่น กรดแกลลิก จะสามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อช่องว่างในเซลล์ถูกทำลาย มีการสัมผัสกับออกซิเจน และในพื้นที่นั้นไม่มีความเป็นกรดมากเกินไป (Cheema และ Sommerhalter, 2015) โดยจะเกิดขึ้นเมื่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตเกิดการชำรุด ฉีกขาด เมื่อถูกกระทบ บด หั่น หรือสับทำให้เอนไซม์ สารที่ทำปฏิกิริยา (substrate) และออกซิเจนเข้ามาสัมผัสกับสาร monophenol (ไม่มีสี)

จะถูกออกซิไดซ์ เป็นไดฟีนอล (diphenol) ซึ่งไม่มีสี และถูกออกซิไดซ์ต่อเป็น o-quinone ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อกับกรดอะมิโนหรือโปรตีนได้เป็นสารสีน้ำตาล และจะรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีสีน้ำตาลของเมลานิน (melanin) ดังภาพที่ 5 (Wang และคณะ, 2007; Yoruk และ Marshall, 2003)



ภาพที่ 5 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์
ที่มา: Yoruk และ Marshall (2003)

สำหรับการลดการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้แช่เยือกแข็ง

ปัญหาสำคัญของผลไม้แช่เยือกแข็ง คือ การเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอล โดยมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสช่วยเร่งปฏิกิริยาผลที่ได้ คือ โอะ-ควิโนน ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยารวมตัวกันจนได้สารประกอบเมลานินที่มีสีคล้ำ ทำให้เนื้อผลไม้เฉพาะตามรอยที่ถูกตัดเมื่อมีการสัมผัสกับแก๊สออกซิเจนมีสีคล้ำหรือสีน้ำตาล การเกิดสีน้ำตาลนี้เป็นลักษณะที่ผู้บริโภคไม่ต้องการ และมักเกิดในช่วงระหว่างการเก็บรักษาและการทำละลายน้ำแข็ง

เนื่องจากการกีดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ต้องอาศัย ออกซิเจน เอนไซม์ และซับสเตรต ดังนั้นการป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้แช่เยือกแข็ง อาจทำได้โดย

1. การป้องกันไม่ให้แก๊สออกซิเจนเข้าไปสัมผัสกับซับสเตรต เช่น การแช่ชิ้นผลไม้ในน้ำเชื่อมหรือการนำชิ้นผลไม้คลุกกับน้ำตาล ซึ่งน้ำเชื่อมทำหน้าที่เป็นตัวกันไม่ให้ออกซิเจนแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล ทำให้เกิดสีน้ำตาลลดลงเพราะปฏิกิริยาขั้นต้นถูกขัดขวาง ช่วยรักษาการเปลี่ยนแปลงของรสชาติและทำให้เนื้อสัมผัสแน่นขึ้นเนื่องจากการลดปริมาณน้ำแข็ง
2. เติมสารยับยั้งการเกิดเมลานินที่นิยมใช้กันมากคือ การใช้กรดแอสคอร์บิก โดยการแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายกรดแอสคอร์บิก หรือเติมกรดแอสคอร์บิกลงไปในน้ำเชื่อมหรือ

น้ำตาลที่ผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง ซึ่งกรดแอสคอร์บิกจะปรีดิทซ์ให้โอ-ควิโนนกลับคืนสภาพเป็นสารประกอบฟีนอล ดังนั้นจึงขัดขวางขั้นตอนการเกิดสารประกอบเมลานิน

3. ลดค่าพีเอช เนื่องจากเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสทำงานได้ดีที่สุดในช่วงพีเอช 6.0-6.5 และถูกยับยั้งกิจกรรมที่พีเอชต่ำกว่า 3.0 ดังนั้นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับคือ การนำขึ้นผลไม้แช่ในสารละลายของกรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริกหรือกรดมาลิก เพื่อเป็นการลดค่าพีเอชให้ต่ำกว่าระดับที่เอนไซม์จะทำงานได้ตามปกติ (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558; สมฤดี ไทพาณิชย์ และ ธิดารัตน์ แยมอาษา, 2563)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และคณะ (2007) ทำการศึกษากิจกรรมเอนไซม์ PPO ของเนื้อมะม่วงโดยมี catechol เป็นสารตั้งต้นโดยมี pH ที่เหมาะสมคือ pH 7.0 และอุณหภูมิที่เหมาะสมคืออุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยจะพบว่ากิจกรรม PPO ในเนื้อมะม่วงจะเกิดสูงสุดในช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิที่สามารถเกิดได้ในช่วงกว้างอยู่ในช่วง 20-50 องศาเซลเซียส โดยมีสารตั้งต้นเป็นสาร catechol เอนไซม์ PPO มีความเสถียรที่อุณหภูมิปานกลาง 30-50 องศาเซลเซียสและมีการสูญเสียเล็กน้อยในกิจกรรม PPO หลังจากการบ่ม 15 นาทีที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กิจกรรมของเอนไซม์ PPO ประมาณร้อยละ 60 หายไปหลังจากให้ความร้อนสารสกัดเป็นเวลา 5 นาทีที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในขณะที่กิจกรรม PPO ร้อยละ 98 หายไปเมื่อให้ความร้อนเป็นเวลา 5 นาทีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและความผิดปกติทางสรีระวิทยาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของเนื้อและเปลือกของมะม่วงเกิดขึ้นจากการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 13 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าสารโพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับความผิดปกติทางสรีระวิทยาของมะม่วง

จากการศึกษา Ma, Andrea และคณะ (2010) พบว่าการเก็บผลไม้ไว้ที่อุณหภูมิแช่เย็นที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของผลไม้ และในผลไม้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่เพิ่มขึ้นเป็นการกระตุ้นให้เกิดสีน้ำตาลขึ้น จากการเก็บผลไม้ไว้ในอุณหภูมิต่ำส่งผลให้โครงสร้างของเซลล์แตกเพิ่มความสามารถในการละลายของ PPO และทำให้เกิดการสัมผัสสารตั้งต้นของสารประกอบฟีนอลิกได้ง่ายขึ้น โพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเผาผลาญของสารประกอบฟีนอลิกและจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความผิดปกติทางสรีระวิทยา เช่น การสะท้อนหนาวของผักและผลไม้

2.5 ผลของการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งขึ้นมะม่วงก่อนการแช่ในสารละลายออสโมติก Flourey และคณะ (2008) เพื่อศึกษาการทำแบบจำลองการถ่ายโอนน้ำและน้ำตาลในขึ้นมะม่วง โดยตัดขึ้นมะม่วงเป็นรูปลูกบาศก์แล้วนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสหลังการตัดทันที ขึ้นมะม่วงทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ที่ตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เตรียมสารละลายออสโมติกที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 40 และ 50 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วนขึ้นมะม่วงต่อสารละลาย 1 ต่อ 25 ในช่วงเวลาการแช่ 24 ชั่วโมง ตัวอย่างขึ้นมะม่วงจะถูกนำตัวอย่าง

ออกมาที่เวลา 0, 5, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360, 480 และ 1410 นาที หลังจาก นั้นนำตัวอย่างล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วซับให้แห้งด้วยกระดาษดูดซับก่อนจะนำไปชั่งน้ำหนัก ศึกษา 3 ชั่วโมง จากการศึกษาโครงสร้างเนื้อเยื่อหลังการแช่เยือกแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเนื้อเยื่อเป็น ผลมาจากการแพร่กระจาย มีรายงานว่าหลังจากการแช่เยือกแข็งและในการเก็บรักษาที่สภาวะแช่ เยือกแข็งทำให้การซึมผ่านของเซลล์เนื้อเยื่อเพิ่มขึ้น ทางด้านโครงสร้างสำหรับการแช่แข็งเนื้อเยื่อมี ลักษณะฉีกขาด มีรูปร่างเปลี่ยนแปลง ในขณะที่แช่แข็งโครงสร้างภายนอกเซลล์จะเกิดการแข็งตัวก่อน จึงส่งผลให้ค่าออสโมติกคอลลอยด์ลดลง ส่งผลให้เกิดรูพรุนภายในเซลล์ทำให้เกิดช่องของการแทรกซึมน้ำ ได้ง่ายขึ้นในขณะที่น้ำตาลบางชนิดไม่สามารถแทรกซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปได้ น้ำบางส่วนแพร่ออก จากเซลล์ในระหว่างการแช่เยือกแข็ง การแช่เยือกแข็งทำลายผนังเซลล์ส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำได้ มากกว่าการซึมผ่านของน้ำตาล การแช่เยือกแข็งแบบช้าส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของ เยื่อหุ้มเซลล์อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีนหรือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไขมันกับโปรตีน ซึ่ง เป็นผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อเยื่อและเกิดการสูญเสียน้ำ เยื่อหุ้มเซลล์อาจมีรูพรุนมากขึ้น โดยรูพรุน อาจมีขนาดที่โมเลกุลของน้ำสามารถผ่านเข้าไปได้ง่ายขึ้น ในขณะที่น้ำตาลยังไม่สามารถผ่านเข้าสู่เยื่อ หุ้มเซลล์ได้

การศึกษาผลของการเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกและการแช่เยือกแข็งของฟักทองแช่อิม บอบแห้ง Kowalska และคณะ (2008) โดยการเตรียมตัวอย่างฟักทองที่ทำการแช่ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ถึง 2 เดือน ก่อนนำมาศึกษา ตัวอย่างฟักทองสดทำการล้างและหั่น เป็นลูกเต๋าด้านขนาด 10 มิลลิเมตร และทำการเตรียมตัวอย่างก่อนการแช่สารละลายออสโมติก 2 วิธี การ ลวกด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที หลังจากนั้นทำการแช่ในน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วินาที และอีกวิธีทำการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็ง ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง การเตรียมตัวอย่าง 3 สภาวะ ตัวอย่าง ควบคุม ตัวอย่างหลังการลวก และตัวอย่างหลังการแช่เยือกแข็งที่ไม่ทำการละลายน้ำแข็ง โดยนำมา แช่ในสารละลายออสโมติกที่มีการเตรียมจากน้ำตาลที่ต่างชนิดผสมกับน้ำ จากน้ำตาลกลูโคสร้อยละ 49.5 น้ำตาลทราย (ซูโครส) ร้อยละ 61.5 และน้ำเชื่อมที่มาจากแป้งร้อยละ 67.5 รายงานว่าระหว่าง การแช่สารละลายออสโมติกปริมาณน้ำในตัวอย่างมีปริมาณลดลงในช่วง 30 นาทีแรก โดยปริมาณน้ำ ในตัวอย่างที่ผ่านการลวกและผ่านการแช่เยือกแข็งมีปริมาณลดลงเป็นร้อยละ 71 และร้อยละ 74 ส่วน การกำจัดน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการลวกและผ่านการแช่เยือกแข็งจะช้ากว่าร้อยละ 2-5 เมื่อ เปรียบเทียบกับระยะเวลาเริ่มต้น การลดลงของปริมาณน้ำเกิดขึ้นน้อยที่สุดในตัวอย่างที่ผ่านการแช่ เยือกแข็ง อาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนโครงสร้างเนื้อเยื่อระหว่างการแช่เยือกแข็ง เพิ่มอัตราการไหล เข้าของสารละลายออสโมติก ลดการไหลของน้ำออกจากตัวอย่าง ปริมาณการสูญเสียน้ำในตัวอย่างที่ ผ่านการแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นเพียง 0.6 กรัมต่อกรัม เกิดขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการลวกและตัวอย่าง ที่ไม่ผ่านการเตรียมตัวอย่าง ส่วนปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นพบว่า การแช่เยือกแข็งส่งผลให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเนื้อเยื่อ ตัวอย่างฟักทองมีการดูดซึมสารละลายออสโมติก ส่งผลให้ปริมาณ ของแข็งเพิ่มขึ้นในตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมากที่สุดเป็น 2.56 กรัมต่อกรัม

การศึกษาผลบลูเบอร์รี่แช่ในสารละลายออสโมติก โดยการเตรียมผลบลูเบอร์รี่สดและบลูเบอร์รี่แช่เยือกแข็ง Akharume และคณะ (2016) ผลบลูเบอร์รี่สดทำการแช่ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาศึกษา ส่วนผลบลูเบอร์รี่แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาศึกษา โดยตัวอย่างผลบลูเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่แข็งไม่ต้องทำการละลายน้ำแช่ก่อนนำไปแช่ในสารละลายออสโมติก ทำการแช่ในสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 42 ± 2 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส รายงานว่า ผลบลูเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นจาก 12.50 องศาบริกซ์ เป็น 32.90 องศาบริกซ์ ใช้เวลาเพียง 420 นาที ส่วนผลบลูเบอร์รี่สดมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลที่ละน้อยเปลี่ยนจาก 10.20 องศาบริกซ์เป็น 13.40 องศาบริกซ์ ใน 200 นาที และยังคงอยู่ที่ระดับโดยใช้เวลาในการแช่ประมาณ 10 ชั่วโมง ความแตกต่างของการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของน้ำตาลระหว่างบลูเบอร์รี่สดและแช่แข็ง เนื่องจากผิวผลไม้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งเกิดรอยร้าว แตกของเยื่อหุ้มเซลล์ด้านในซึ่งเป็นผลจากการแช่แข็ง โดยผลบลูเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่แข็งจะไม่สร้างสิ่งกีดขวางสารออสโมติกสำหรับการถ่ายโอนของน้ำตาลจากสารละลายสู่ภายในผลบลูเบอร์รี่ สำหรับการศึกษาค่าปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นและปริมาณการสูญเสียน้ำของผลบลูเบอร์รี่สดและบลูเบอร์รี่แช่เยือกแข็ง พบว่าในผลและบลูเบอร์รี่แช่เยือกแข็งมีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า หรือเป็นร้อยละ 23 ของผลบลูเบอร์รี่ ในขณะที่มีปริมาณการสูญเสียน้ำเป็น 3.9 เท่า เป็นร้อยละ 181 ส่วนผลการอบแห้ง พบว่าผลบลูเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้ง โดยใช้เวลาเพียง 170 นาที ซึ่งลดระยะเวลาในการอบแห้งลงเหลือร้อยละ 53 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลบลูเบอร์รี่สดใช้เวลาถึง 260 นาที เกิดจากการที่การแช่เยือกแข็งส่งผลให้ภายในเนื้อเยื่อเซลล์มีรอยแตกซึ่งไม่พบในผลบลูเบอร์รี่สด

จากการศึกษาของ Polinati และคณะ (2010) เปรียบเทียบผลของการแช่เยือกแข็งสารสกัดจากแอปเปิ้ลและส้ม ที่มีการเติมและไม่เติมกรดวิตามินซี ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส และเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 0 ถึง 10 วัน โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณ Soluble polyphenol contents (SP) และ hydrolyzable polyphenol contents (HP) พบว่าปริมาณสาร SP และ HP ในสารสกัดจากแอปเปิ้ลที่มีการเติมกรดวิตามินซีที่ปริมาณเพิ่มขึ้น แต่การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส ในช่วงระยะเวลา 10 วันไม่มีผลต่อปริมาณสาร SP และ HP ในสารสกัดจากแอปเปิ้ลที่มีการเติมและไม่เติมกรดวิตามินซี ส่วนในสารสกัดจากส้มพบว่าการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณสาร SP และ HP มีปริมาณสูงกว่าในสารสกัดที่มีการเติมกรดวิตามินซีเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่เติมกรดวิตามินซี ส่วนการเติมกรดวิตามินซีในการแช่เยือกแข็ง -70 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่อปริมาณ SP เมื่อทำการเก็บเกิน 4 วัน ในทางกลับกันการแช่เยือกแข็งที่ -70 องศาเซลเซียสส่งผลให้มีปริมาณ SP สูงขึ้นด้วยการเติมกรดวิตามินซีตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา เช่นเดียวกับสารสกัดจากแอปเปิ้ล ที่การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งแบบ SP และ HP

จากการศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งของ Chung และคณะ (2013) การแช่เยือกแข็งหลังการเก็บเกี่ยวผลแอปพริคอตญี่ปุ่นเพื่อทำการสกัดน้ำโดยใช้การแช่ในสารละลายออสโมติก นำผลแอปพริคอตญี่ปุ่นทั้งลูกทำการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสและ -50 องศาเซลเซียส

อย่างละ 3 lot เก็บเป็นเวลา 7 วัน หลังจากแช่เยือกแข็งนำผลแอฟริคอตญี่ปุ่นมาทำการละลายที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และผลแอฟริคอตญี่ปุ่น 300 กรัมไม่ทำการแช่เยือกแข็งเป็นผลของตัวแปรควบคุม และนำผลแอฟริคอตญี่ปุ่นใส่ลงในสารละลายซูโครส 300 กรัม เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 50 วัน ทำการละลายตัวอย่างแช่แข็งร่วมกับน้ำตาลทรายเป็นเวลา 25 วัน ส่วนตัวอย่างควบคุมทำการเก็บเป็นเวลา 50 วัน หลังจากนั้นทำการกรองน้ำด้วยผ้ากรอง พบว่าการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสและ -50 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อัตราการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ช้ากว่าอัตราการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียสเป็น 2.6 เท่า เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนช้า และการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ %drip loss มากกว่าและส่งผลให้โครงสร้างการมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างการแช่เยือกแข็งกับตัวอย่างที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส และ -50 องศาเซลเซียสกับตัวอย่างควบคุมพบว่าเนื้อผลไม้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีการหดตัวแต่ไม่มีการแตกสลายของเนื้อเยื่อเซลล์ในขณะที่ตัวอย่างควบคุมมีการแตกตัวของเนื้อเยื่อแต่ไม่มีการหดตัว การแช่เยือกแข็งส่งผลให้การแช่สารออสโมติกเกิดเร็วขึ้นและลดการสลายตัวของเซลล์ ผลการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลพบว่าผลไม้ที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งจะเกิดสีน้ำตาลมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการแช่ที่นานขึ้น ส่วนการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในน้ำสกัดที่สกัดด้วยออสโมติกลดเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลลงได้เมื่อระยะเวลาการสกัดสั้นลง โดยทำการแช่เยือกแข็งเพื่อปรับสภาพ โดยการแช่เยือกแข็งก่อนการสกัดด้วยสารละลายออสโมติกส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลลดลง ค่าความใสในการสกัดน้ำผลไม้ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ค่าความเป็นกรดจากการไตเตรต ปริมาณน้ำตาลอิสระ ค่าความเป็นกรดอินทรีย์ และกรดคลอโรจีนิกซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลในผลแอฟริคอตญี่ปุ่นมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยชี้ให้เห็นว่าการแช่เยือกแข็งอย่างช้าที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อนการสกัดด้วยสารออสโมติกสามารถเพิ่มคุณภาพของน้ำผลแอฟริคอตญี่ปุ่นได้

จากการศึกษา Chassagne-Berces และคณะ (2009) การแช่เยือกแข็งแอปเปิ้ล 3 สภาวะ โดยแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส โดยใช้ห้องทำความเย็น อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส โดยใช้สภาวะแก๊สไนโตรเจนเป็นตัวพาในห้อง และการจุ่มในไนโตรเจนเหลว ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอุณหภูมิตรงแกนกลางถึงค่าสมดุลกับอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง เมื่อตัวอย่างแช่แข็งแล้ว ตัวอย่างจะถูกบรรจุในถุงพลาสติกและนำไปละลายในห้องเย็นที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาข้ามคืน หลังจากนั้นก็นำมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง (21 ± 1 องศาเซลเซียส) จนกระทั่งแกนกลางตัวอย่างเท่ากับอุณหภูมิห้อง ใช้ตัวอย่างสดเป็นตัวอย่างควบคุม พบว่าผลของการแช่เยือกแข็งต่อการละลายน้ำแข็งของสภาวะ -80 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความแน่นเนื้อร้อยละ 54 น้อยกว่าสภาวะ -20 องศาเซลเซียส เป็นร้อยละ 79 หรือการจุ่มในไนโตรเจนเหลว เป็นร้อยละ 91 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Jha และคณะ, 2019) ส่งผลให้ผลการแช่เยือกแข็งการใช้อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสูญเสียความแน่นเนื้อร้อยละ 54 ส่วนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสูญเสียความแน่นเนื้อร้อยละ 79 ส่วนการแช่เยือกแข็งโดยการจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวทำให้เกิดการสูญเสียความแน่นเนื้อถึงร้อยละ 94 จากการวัดคุณภาพเนื้อสัมผัส โดยสาเหตุของการเกิดความเสียหายของเซลล์ขึ้นกับอัตราการแช่เยือกแข็ง ระหว่างการแช่เยือกแข็ง จะเกิดผลึกน้ำแข็งภายนอกเซลล์ สำหรับอัตราการแช่เยือกแข็งต่ำน้ำภายในเซลล์จะแพร่ผ่านเยื่อเลือก

ผ่านเพื่อออกนอกเซลล์เพื่อปรับสภาวะทางเคมีให้สมดุลระหว่างภายในและภายนอกของเซลล์ ซึ่งส่งผลให้เซลล์แห้ง สำหรับอัตราการแช่เยือกแข็งสูง การแช่แข็งภายในเซลล์จะเกิดขึ้น เกิดภายใต้เงื่อนไขการแช่แข็งทำให้เซลล์สูญเสียน้ำและเพิ่มความเข้มข้นของตัวละลายที่สามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์เนื้อเยื่อมีลักษณะเต่ง บวม น้ำ การสูญเสียความแน่นเนื้อ การสูญเสียประสิทธิภาพการอุ้มน้ำและเพิ่มปริมาณการสูญเสียของเหลวระหว่างการหลอมละลาย (Bilbao-Sainz และคณะ, 2019) ส่วนค่า Young's modulus สภาวะ -80 องศาเซลเซียสและการจุ่มในไนโตรเจนเหลว ส่งผลให้ค่า Young's modulus เท่ากับร้อยละ 97 ซึ่งลดลงน้อยกว่าสภาวะ -20 องศาเซลเซียส เป็นร้อยละ 99 ผลทางด้านโครงสร้างภายในพบว่าสภาวะ -20 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในโครงสร้างเซลล์ ผนังเซลล์มีการยุบตัว พบช่องว่างระหว่างเซลล์จำนวนมาก ส่งผลให้เกิดผลึกขนาดใหญ่ สภาวะ -80 องศาเซลเซียส ไม่แตกต่างจากของสด มีผลึกขนาดเล็กกว่าสภาวะ -20 องศาเซลเซียส ส่วนจุ่มในไนโตรเจนเหลวพบว่าเนื้อเยื่อแอปเปิ้ลมีรอยยาวและมีรอยแตกบางส่วน แต่มีผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 สภาวะ การละลายน้ำแข็งหลังจากการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงขนาดของลักษณะผลึกน้ำแข็งส่วนใหญ่เป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ขนาดอยู่ระหว่าง 10 ถึง 30 μm สำหรับการแช่เยือกแข็งอีก 2 สภาวะมีขนาดผลึกน้ำแข็งต่ำกว่า 5 μm โดยหลังจากแช่เยือกแข็งที่ -80 องศาเซลเซียส ผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย (ประมาณ 3 μm) ขนาดใหญ่กว่าหลังจากการจุ่มในไนโตรเจนเหลว (ประมาณ 2 μm)

จากการศึกษา Eshtiaghi และคณะ (1994) พบว่าการแช่เยือกแข็งในถั่วเขียว แครอท มันฝรั่ง ทำการเตรียมถั่วเขียวความยาว 2 เซนติเมตร แครอทหั่นเป็นลูกเต๋าขนาดกว้าง 0.2 เซนติเมตร ความยาว 0.5 เซนติเมตร ความหนา 1 เซนติเมตร และปอกเปลือกมันฝรั่งหลังจากนั้นเตรียมเป็นรูปลูกบาศก์ ขนาดกว้าง ยาว หนา เท่ากับ 1x1x1 เซนติเมตร ทำให้แห้งหรือนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปอบแห้ง การแช่เยือกแข็งส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำร้อยละ 80 ในขณะที่อบแห้งช่วงเวลา 30 นาที และส่งผลให้เกิดอัตราการอบแห้งที่สูง โดยการแช่เยือกแข็งจะใช้เป็นการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของขั้นตอนการแปรรูปหลักและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของวัตถุดิบ

ทิพย์สุคนธ์ และธนกร (2014) พบว่า การแช่เยือกแข็งหลังการทำออสโมติกในฝรั่ง ในสารละลายทั้ง 3 ชนิด ด้วยสารละลายซอร์บิทอล สารละลายซูโครส และฟรุกโตโอลิโกแซ็กคาไรด์ โดยใช้เครื่อง Air blast freezer ที่อุณหภูมิ -35 องศาเซลเซียส พบค่าการสูญเสียน้ำ (WL) และค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็งในเนื้อฝรั่ง (SG) มีค่าการสูญเสียน้ำและค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็งของตัวอย่างฝรั่งที่ออสโมซิสด้วยสารละลายซอร์บิทอลมีค่าสูงกว่าตัวอย่างฝรั่งที่ออสโมซิสด้วยสารละลายซูโครส และฟรุกโตโอลิโกแซ็กคาไรด์ของตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งหลังจากออสโมติก

จากการศึกษา Zhao และคณะ (2016) มีการศึกษาการเตรียมตัวอย่างด้วยการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกที่แตกต่างกันในน้ำตาล 3 ชนิด ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก โดยเตรียมตัวอย่างขึ้นมะม่วงขนาด (2 x 2 x 1 เซนติเมตร) หลังจากนั้นเตรียมสารละลายออสโมติกที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ในน้ำตาลซูโครส กลูโคส และมอลโตส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้น

นำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่าตัวอย่างแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่านการแช่ออสโมติก (ควบคุม) มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่ออสโมติกก่อนไปแช่เยือกแข็ง เนื่องจากการแช่ออสโมติกช่วยลดปริมาณการสูญเสียสารประกอบฟีนอลทั้งหมดในระหว่างการแช่เยือกแข็งได้

Bilbao-Sainz และคณะ (2019) ศึกษาการแช่เยือกแข็งแบบปริมาตรคงที่ (Isochoric) เปรียบเทียบกับสภาวะการแช่เยือกแข็งภายใต้ความดันคงที่ (Isobaric) และสภาวะการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว (IQF) ต่อผลเซอร์รี่ ทำการศึกษา 3 สภาวะที่แตกต่างกันเริ่มต้นจากผลเซอร์รี่สด เก็บรักษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียสหรือ -7 องศาเซลเซียสในระบบ Isochoric และระบบ Isobaric และสภาวะการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว (IQF) สำหรับการแช่เยือกแข็งระบบ Isochoric นำตัวอย่างวางบริเวณตรงกลางของถาดโลหะ วางชั้นบนสุดของห้องแช่เยือกแข็ง ภายในห้องแช่เยือกแข็งมีการเติมสารละลายน้ำตาลปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 17 องศาบริกซ์และทำการปิดผนึกไว้ โดยห้องแช่เยือกแข็งมีการทำให้ระบบเย็นที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสและทำให้เย็นที่ 0.25 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียสหรือ -7 องศาเซลเซียส ให้ความดันถึง 29.5 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียสและ 62.1 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ -7 องศาเซลเซียสเก็บไว้เป็นเวลา 23 ชั่วโมง ส่วนระบบ Isobaric จะทำการเตรียมเหมือนระบบ Isochoric แต่การเตรียมผลเซอร์รี่ทำการเตรียมใส่ในถุงพลาสติกที่ทำการปิดสนิทแล้วแช่ในอ่างน้ำหมุนเวียน หลังการแช่เยือกแข็งทำการละลายตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ส่วนการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว (IQF) ใช้ระบบการแช่แข็งโดยใช้ไนโตรเจนเหลว ผลสดของเซอร์รี่ถูกนำไปแช่เยือกแข็งเพื่อให้ผลเซอร์รี่แข็งทั้งผล และทำตามวิธีการต่อไปนี้ สภาวะที่ 1 ทำให้เย็นที่อุณหภูมิ -25 องศาเซลเซียสที่ 25 องศาเซลเซียสต่อนาที สภาวะที่ 2 ทำให้เย็นจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ -40 °C ที่ 1 องศาเซลเซียสต่อนาทีและสภาวะที่ 3 ทำให้เย็นถึงอุณหภูมิ -90 องศาเซลเซียสที่ 25 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้เวลาทั้งหมด 20 นาที แล้วทำการเก็บตัวอย่างผลไม้แช่แข็งไว้ในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงมวลค่าการสูญเสียของเหลว (% drip loss) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง พบว่าการเก็บผลเซอร์รี่ในสภาวะ Isochoric มีมวลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 3) เนื่องจากสารละลายน้ำตาลจากภายนอกทำให้ผลเซอร์รี่ชุ่มชื้น นอกจากนี้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความเป็นกรดของผลเซอร์รี่ทั้งหมดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง ผลของการแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะ Isochoric ส่งผลให้ปริมาณการสูญเสียของเหลวมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการแช่เยือกแข็งแบบ IQF และที่สภาวะ Isochoric ที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียสของค่าปริมาณการสูญเสียของเหลวไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผลเซอร์รี่สด ส่วนที่อุณหภูมิ -7 องศาเซลเซียส มีปริมาณการสูญเสียของเหลวเพิ่มขึ้นและทำการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope SEM) เพื่อดูลักษณะโครงสร้างพบว่าเซลล์มีการรักษาเยื่อผนังและผนังเซลล์ไม่สลาย ช่องว่างระหว่างเซลล์เต็มไปด้วยสารละลายน้ำตาล ซึ่งการแช่เยือกแข็งส่งผลเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้สามารถนำไปสู่ผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่แข็งที่เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางมากขึ้นและมีคุณภาพสูงขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์

ในการศึกษาใช้มะม่วงพันธุ์แก้วขมิ้น ทำการคัดเลือกมะม่วงผลดิบแก่ สด ปราศจากโรค ไม่มี การเน่าเสีย (น้ำหนัก 400-500 กรัมต่อผล) โดยรับมะม่วงมาจากสวนเนรัญชลา จังหวัดฉะเชิงเทรา และจากตลาดไท จังหวัดปทุมธานี รายละเอียดแหล่งที่มาสำหรับใช้ในการศึกษาแต่ละชุดการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3 มะม่วงถูกนำมาทดสอบความบริสุทธิ์ด้วย วิธีการลอย-จมน้ำ โดยเลือกมะม่วงที่ จมน้ำ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ >1 หลังจากนั้นนำมาทดสอบการสอลอย-จมน้ำเกลือร้อยละ 3 เพื่อ ดูความแก่อ่อนของผลมะม่วง โดยทำการคัดเลือกผลมะม่วงที่ลอยในน้ำเกลือร้อยละ 3 สะเด็ดน้ำให้ แห้ง หลังจากนั้นทำการบ่มมะม่วงที่อุณหภูมิห้องที่อุณหภูมิ 30.1-36.7 องศาเซลเซียส จนกระทั่ง มะม่วงสุกมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS) อยู่ในช่วง 18.6 – 19.6 องศาบริกซ์

ตารางที่ 3 รายละเอียดมะม่วงที่ใช้ในการศึกษา

ชุดการทดลองที่	วัน เดือน ปี ที่รับมะม่วง	ปริมาณ (กิโลกรัม)	สำหรับชุดการทดลอง
1	11 มีนาคม 2563	150	เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อ กระบวนการออสโมติก (การทดลองซ้ำที่ 1)
2	24 มีนาคม 2563	150	เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อ กระบวนการออสโมติก (การทดลองซ้ำที่ 2)
3	3 เมษายน 2563	100	เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อ พฤติกรรมการทำแห้ง ที่อุณหภูมิ 60 องศา เซลเซียส ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ
4	17 เมษายน 2563	100	เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อ พฤติกรรมการทำแห้ง ที่อุณหภูมิ 50 องศา เซลเซียส ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ
5	13 พฤษภาคม 2563	100	เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพ ของมะม่วงแช่อบแห้ง ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ
6	4 มิถุนายน 2563	100	เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพ ของมะม่วงแช่อบแห้ง ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ

ชุดการทดลองที่	วัน เดือน ปี ที่รับมะม่วง	ปริมาณ (กิโลกรัม)	สำหรับชุดการทดลอง
7	16 มิถุนายน 2563	100	เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง ที่ทำการเก็บรักษาไว้ที่ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 เดือน และ 2 เดือน ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ

3.2 สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) (Merck, Germany)
2. เมทานอลบริสุทธิ์ เกรด AR (Methanol) (Merck, Germany)
3. กรดแกลลิก (gallic acid) (Fluka Sigma-AldrichTM, Germany)
4. โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) (Ajax, New Zealand)
5. สารโพลิน เซลเคลทีส ฟีนอล (Folin-Ciocalteu's phenol reagent) (Merck, Germany)
6. น้ำกลั่น (distilled water) (Vunique, Thailand)
7. กรดอะซิติก (acetic acid) (QREC, New Zealand)
8. Sodium dihydrogen orthophosphate (NaH_2PO_4) (Ajax Finechem, New Zealand)
9. di-sodium dihydrogen orthophosphate ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Ajax Finechem, New Zealand)
10. ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) (บริษัท อาร์ซีไอ แล็บส์แอนด์ จำกัด, ประเทศไทย)
11. แคทาคอล (Catechol) (Acros organics, France)
12. ฟรุคโตสไซรัป TSS อยู่ในช่วง 70.0-78.0 องศาบริกซ์ (ตรา C บนใบไม้, ประเทศไทย)
13. น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ ตราน้ำตาลทรายมิตรผล
14. แคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride) (บริษัท รวมเคมี 1968 จำกัด, ประเทศไทย)
15. กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) (บริษัท รวมเคมี 1968 จำกัด, ประเทศไทย)
16. กรดซิตริก (citric acid) (บริษัท รวมเคมี 1968 จำกัด, ประเทศไทย)

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดสี (Hunter lab รุ่น Colorflex EZ, Hunter Associates Laboratory, Inc., USA)
2. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (analytical balance รุ่น BP 221S, Sartorius AG, Inc., Germany)
3. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง (analytical balance, รุ่น TE 3102S, Sartorius AG, Inc., Germany)

4. เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (benchtop water activity meter รุ่น AQUALAB 4TE , METER Group, Inc., USA)
5. เครื่องปั่น (blender รุ่น 600 วัตต์ HR2120, Royal Philips Electronics, Inc., Thailand)
6. ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (hot air oven, รุ่น FD53, Binder, Germany)
7. เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (Tray dryer, ประเทศไทย)
8. เครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaner, รุ่น 360D, Advance Ceramics Technology, Malaysia)
9. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4
10. เครื่องเขย่าสารละลาย (vortex mixer, รุ่น Vortex-Genie 2 G560E, Scientific Industries, USA)
11. เครื่องวัด pH (Meter Lab, Radiometer PHM 210, ประเทศฝรั่งเศส)
12. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น G10S UV-VIS, MA, USA)
13. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
14. เครื่องแยกสารแบบหมุนเหวี่ยง (RC-6 SuperSpeed, Sorvall, MA, USA)
15. เครื่องโฮโมจีไนส์ (Homogenizer) (UltraTurrax T25 Basic, ประเทศเยอรมนี)
16. เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (temperature and humidity data loggers, รุ่น GL:2422864, PONPE, Thailand)
17. เครื่องบันทึกอุณหภูมิสำหรับการบันทึกผลการแช่เยือกแข็ง (Graphtec midi logger GL220, Japan)
18. เครื่องบันทึกอุณหภูมิสำหรับการบันทึกผลการแช่เยือกแข็ง (Graphtec midi logger GL240, Japan)
19. เครื่องวัดความหวานแบบดิจิตอล refractometer (รุ่น PAL-1, Atago Co.Ltd., ประเทศญี่ปุ่น)
20. เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Textuer analyzer ยี่ห้อ Stable รุ่น TA.XT.PLUS, United Kingdom)
21. หัววัดสำหรับวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร (P/2 Cylinder probe ยี่ห้อ Stable Micro Systems, United Kingdom)

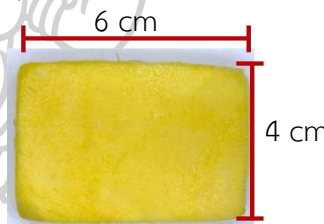
3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำผลมะม่วงสุกพันธุ์แก้วขมิ้นที่ผ่านการล้างและบ่มที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) อยู่ในช่วง 18.6 – 19.6 องศาบริกซ์ มาทำการเตรียมตัวอย่างเป็นชิ้น ขนาดยาว 6 ซม. กว้าง 4 ซม. หนา 1 ซม. แล้วจึงนำชิ้นมะม่วงไปแช่ในสารละลายที่มีแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 และกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 6



TSS 18.6 – 19.6 องศาบริกซ์



ปอกเปลือกและหั่นเป็นชิ้นขนาด ความยาว 6 ซม. กว้าง 4 ซม. หนา 1 ซม.



แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1 และ กรดซิตริกร้อยละ 1 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ภาพที่ 6 การเตรียมตัวอย่างชิ้นมะม่วงสำหรับการศึกษา

3.4.2 ขั้นตอนในการแช่เยือกแข็ง

นำชิ้นมะม่วงที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างโดยแบ่งเป็น 3 สภาวะ คือ ตัวอย่างชุดควบคุม (ตัวอย่างสด ที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง) ตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าโดยใช้เครื่องแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วโดยใช้เครื่องแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส ในตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าและตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมาทำการแช่จนกระทั่งอุณหภูมิตรงกลางของชิ้นมะม่วงเป็น -18 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 7

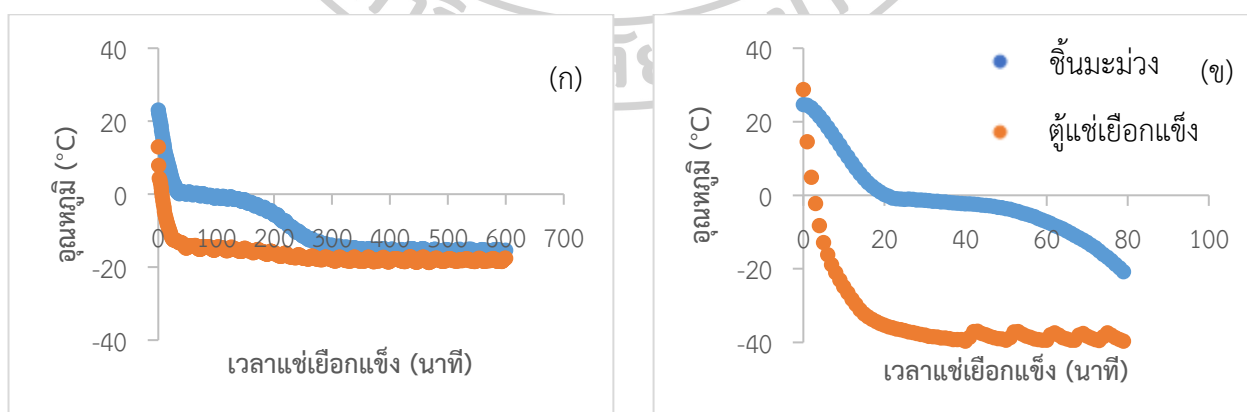


การแช่เยือกแข็งแบบช้า (SF)

การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (QF)

ภาพที่ 7 การแช่ชิ้นมะม่วงในตู้แช่เยือกแข็งแบบช้าและตู้แช่เยือกแข็งแบบเร็ว

ติดตามกราฟการแช่เยือกแข็งของชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าและชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าเร็วโดยทำการบันทึกอุณหภูมิบริเวณตรงกลางชิ้นมะม่วงกับอุณหภูมิภายในเครื่องแช่เยือกแข็ง ซึ่งตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งเท่ากับ 10 ชั่วโมงหรือ 600 นาที ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วใช้เวลา 1 ชั่วโมง 15 นาทีหรือ 75 นาที ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการแช่เยือกแข็งระหว่าง (ก) การแช่เยือกแข็งแบบช้า และ (ข) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

3.4.3 การเตรียมสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 38 องศาบริกซ์

ทำการเตรียมสารละลายออสโมติกโดยทำในอัตราส่วนน้ำตาลซูโครสร้อยละ 80 และน้ำตาลฟรุกโตสร้อยละ 20 ทำต่อน้ำกลั่น 5 ลิตร ในทุกครั้งที่ทำการเตรียมสารละลาย ทำการผสมสารละลายน้ำตาลโดยคนที่อุณหภูมิห้องให้ละลายก่อนนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นตั้งสารละลายออสโมติกทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วทำการใส่กรดแอสคอร์บิกร้อยละ 0.15 และกรดซิตริกร้อยละ 0.2 ทำการคนให้ละลายเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนนี้ต่อไป โดยในการเตรียมสำหรับแช่ชิ้นมะม่วง ทำการเตรียมมะม่วงต่อสารละลายเป็นอัตราส่วน 1 ต่อ 2

3.4.4 วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของมะม่วงสด

สุ่มมะม่วงสดที่ทำการศึกษาในแต่ละชุดการทดลองจำนวน 10 ผล หั่นขึ้นบริเวณที่เตรียมสำหรับทำการทดลองขนาดความยาว 6 เซนติเมตร กว้าง 4 เซนติเมตรหนา 1 เซนติเมตร ของทั้งสองด้านของผลมะม่วง แล้วนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของมะม่วงสด ได้แก่

3.4.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

3.4.4.1.1 ค่าสี

วัดค่าสี ได้แก่ค่า L^* , a^* และ b^* ของชิ้นมะม่วงสดผ่านการตัดแต่งจำนวน 10 ชิ้นต่อชุดทดลองด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab โดยใช้ระบบ CIE L^* , a^* , b^* ทำการวัดค่าสีทั้งสองด้านของชิ้นมะม่วงด้านที่ติดเปลือกและด้านที่ติดเมล็ดบริเวณตรงกลางของชิ้นมะม่วง จากนั้นนำค่า L^* , a^* และ b^* มาคำนวณค่า Chroma (C^*), hue angle (h°) และ ΔE ดังสมการ

$$\text{Chroma} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$\text{hue angle} = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

3.4.4.1.2 ค่าความแน่นเนื้อ (Firmness)

ทำการวัดความแน่นเนื้อของมะม่วงที่บริเวณจุดกึ่งกลางของชิ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Textuer analyzer) โดยใช้หัววัดสแตนเลสรูปทรงกระบอก (stainless steel probe, p/2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัววัด 2 มิลลิเมตร ค่าความแน่นเนื้อที่ได้เป็นการวัดค่าแรงสูงสุดที่หัววัดกดทะลุจำนวน 1 ครั้ง จากนั้นบันทึกค่าแรงกดสูงสุดในหน่วยนิวตัน (N)

โหมดการวัด คือ measure force in compression

ความเร็วก่อนการวัด (pre-test speed) 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที

ความเร็วในการวัด (test speed) 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที
 ความเร็วหลังการวัด (post-test speed) 10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที
 ระยะทางในการวัด (distance) 8.0 มิลลิเมตร

3.4.4.2 คุณสมบัติทางเคมี

3.4.4.2.3 ปริมาณความชื้น (moisture content)

ในแต่ละชุดการทดลองนำชิ้นมะม่วงสดผ่านการตัดแต่งจำนวน 10 ชิ้นต่อชุดทดลอง ต่อ 1 ชิ้น ทำการปั่นละเอียดให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องโฮมोजิไนซ์ และชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 3-5 กรัม บรรจุในกระป๋องอลูมิเนียมสำหรับหาปริมาณความชื้น (moisture can) แล้วชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างและกระป๋องอลูมิเนียม หลังจากนั้นนำกระป๋องอลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่า น้ำค้างที่ แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างและกระป๋องอลูมิเนียมหลังการอบ คำนวณหาค่าปริมาณ ความชื้น (AOAC, 2000) ทำการวิเคราะห์ 10 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

3.4.4.2.4 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids; TSS)

วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด นำชิ้นมะม่วงสดผ่านการตัดแต่งจำนวน 10 ชิ้นต่อชุดทดลอง ต่อ 1 ชิ้น ทำการปั่นละเอียดให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องโฮมोजิไนซ์ จากนั้นตักมะม่วงที่เป็นเนื้อเดียวกันมากรองผ่านผ้าขาวบางที่มีความหนา 2 ชั้น ด้วย เครื่องวัดความหวาน แบบดิจิตอล (refractometer) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อ 1 ชิ้น ตัวอย่าง

3.4.4.2.5 วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

วัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH มิเตอร์ โดยจุ่มหัววัดลงในส่วนที่ทำการคั้นน้ำมะม่วง ทำ การวัด 10 ชิ้นตัวอย่างต่อชุดการทดลอง โดย 1 ชิ้นตัวอย่างทำการวัดจำนวน 2 ซ้ำ

3.4.4.2.6 วัดปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity)

วิเคราะห์ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ตามวิธี AOAC (2000) โดยการนำตัวอย่างมะม่วง ปั่นละเอียดต่อ 1 ชิ้น จำนวน 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรด้วยเครื่องชั่งชนิด หยด 2 ตำแหน่ง แล้วบันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร หยดฟีนอล์ฟทาลีน จำนวน 2-3 หยด แล้วทำการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูที่ใกล้เคียงกัน บันทึก ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไปทั้งหมด เพื่อนำไปคำนวณหาค่า TA ดังสมการ ที่ วัดค่า TA 1 ชิ้นต่อ 1 ซ้ำ

$$TA\% = \frac{ml(0.1NNaOH) \times 0.007 \times 100}{g(sample)}$$

เมื่อ 0.007 คือ citric acid equivalent

3.4.4.2.7 วัดค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (Browning index, BI)

การวัดค่าการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ดัดแปลงจากวิธีของ (Baloch และคณะ, 1973) การเกิดสีน้ำตาลของเนื้อมะม่วงโดยการหั่นชิ้นมะม่วงเป็นชิ้นเล็กๆ และทำการปั่นละเอียดด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักมะม่วง 3 กรัม โดยบันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ลงในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยง หลังจากนั้นเติมกรดอะซิติกร้อยละ 2 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้นาน 10 นาที ปั่นละเอียดด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8000 rpm นาน 15 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และนำส่วนใสมาทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 วัดความเข้มของสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นในเนื้อมะม่วง อาศัยค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดจากมะม่วงที่ทำการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยใช้กรดอะซิติกร้อยละ 2 เป็น Blank

3.4.4.2.9 การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenol oxidase (PPO activity)

การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ (PPO) ดัดแปลงจากวิธีการของ (Banerjee และคณะ, 2015) ทำการสกัดเอนไซม์โดยชั่งเนื้อมะม่วงที่ผ่านการปั่นละเอียดด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ให้เป็นเนื้อเดียวกันอย่างละ 5 กรัม บันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน ผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมฟอสเฟต 0.2 M (pH 6.8) ปริมาณ 15 มิลลิลิตร ทำการปั่นผสมด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 12000 rpm ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาทีด้วยเครื่องแยกสารแบบหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกสารละลายและตะกอนออกจากกัน และนำสารละลายส่วนใสที่ได้มาวิเคราะห์หา PPO activity โดยนำสารละลายส่วนใสปริมาณ 0.5 มิลลิลิตรผสมกับสารละลาย catechol 1 M ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที โดยทำการควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในอ่างทำความร้อน และนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงทันทีที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer โดยกิจกรรมของเอนไซม์ PPO 1 หน่วย คือ การเพิ่มขึ้น 0.01 ในระยะเวลา 1 นาที รายงานหน่วยเป็น Units/g dry matter

3.4.4.2.8 วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (Total Phenolic Content)

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด ดัดแปลงจาก (Singleton และ Rossi, 1965) การสกัดตัวอย่างมะม่วงสดโดยการหั่นชิ้นมะม่วงเป็นชิ้นเล็กๆ และทำการปั่นละเอียดด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ให้เป็นเนื้อเดียวกันชั่งจำนวน 3 กรัม บันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 80 จากนั้นทำการปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วนำมาทำปฏิกิริยากับสาร Folin Cioculteru's reagent และวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance; A) ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร คำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกในหน่วยมิลลิกรัม

ของกรดแกลลิกต่อกรัมสารแห้ง (mg gallic acid/g dry matter) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง (แสดงรายดั่งละเอียดในภาคผนวก)

3.4.5 การศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการออสโมติกของมะม่วงแช่แข็ง

การศึกษาผลของการเตรียมตัวอย่างการแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการออสโมติก ด้วยการนำขึ้นมะม่วงที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างที่สภาวะแตกต่างกัน ได้แก่ ขึ้นมะม่วงชุดควบคุม (ขึ้นมะม่วงที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง) ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า และขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วซึ่งขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า และขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วยังอยู่ในสภาพการแช่เยือกแข็ง ทำการชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของขึ้นมะม่วงก่อนแช่ในสารละลายออสโมติก วัดค่า TSS ทั้งสารละลายและขึ้นมะม่วงและวัดปริมาณความชื้น หลังจากนั้นทำการแช่ในสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 38 องศาบริกซ์ ดังภาพที่ 9 ในอัตราส่วนมะม่วงต่อสารละลายเป็น 1 ต่อ 2 ทำการติดตามกระบวนการแช่ออสโมติกทุกๆ 2 ชั่วโมง ในระหว่างการแช่ออสโมติกบันทึกอุณหภูมิห้อง ด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ และอุณหภูมิในสารละลายออสโมติกโดยใช้เครื่องเทอร์โมมิเตอร์ ทำการสุ่มขึ้นมะม่วงจำนวน 2 ชิ้น สะเด็ดน้ำด้านละ 5 นาที รวมเป็น 10 นาที โดยวางบนตะแกรงเพื่อทำการสะเด็ดน้ำ หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักขึ้นมะม่วง วัดค่าสี วัดค่าความแน่นเนื้อ (แสดงรายดั่งละเอียดในภาคผนวก) วัดค่า TSS และวัดปริมาณความชื้น ทำการสุ่มขึ้นมะม่วงจนกระทั่งขึ้นมะม่วงในสารละลายมีค่า TSS ไม่แตกต่างกันหรือจนกว่าจะเข้าสู่สภาวะสมดุล จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water loss, WL) และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid gain, SG) ดังสมการ (Bozkir และ Ergün, 2020)

$$\%WL = \frac{m_i z_i - m_f z_f}{m_i} * 100$$

$$\%SG = \frac{m_f s_f - m_i s_i}{m_i} * 100$$

กำหนดให้ m_i เท่ากับ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (กรัม)

m_f เท่ากับ น้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่าง (กรัม)

z_i เท่ากับ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างบนฐานเปียก (กรัมน้ำ/ กรัม)

z_f เท่ากับ ปริมาณความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างบนฐานเปียก (กรัมน้ำ/ กรัม)

s_i เท่ากับ เศษส่วนมวลเริ่มต้นของของแข็งทั้งหมด (กรัมของแข็ง / กรัม)

s_f เท่ากับ เศษส่วนมวลสุดท้ายของของแข็งทั้งหมด (กรัมของแข็ง / กรัม)



ภาพที่ 9 ชั้นมะม่วงแช่ในสารละลายออสโมติก

3.4.6 การศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งของมะม่วงแช่อิ่มแห้ง

การศึกษาผลของการเตรียมตัวอย่างการแช่เยือกแข็งต่อการทำแห้ง ด้วยวิธีการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงแช่อิ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ทำการชั่งน้ำหนักตะแกรงเปล่าแล้วนำชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ออสโมติกตามระยะเวลาที่ทำการศึกษาจากข้อ 3.4.5 วางเรียงให้เป็นชั้นเดียวจำนวน 8 ชั้นต่อตะแกรง ดังภาพที่ 10 เรียงชั้นมะม่วงแช่อิ่มน้ำหนักประมาณ 200 กรัมต่อตะแกรง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักตะแกรงรวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนการทำแห้ง แล้วนำไปทำแห้งในตู้อบลมร้อนแบบถาด ทำการชั่งน้ำหนักในระหว่างการทำแห้งทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะคงที่ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ปริมาณความชื้นของตัวอย่างมะม่วงแช่อิ่มก่อนและภายหลังการทำแห้ง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์พฤติกรรมการทำแห้ง โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (ฐานแห้ง) กับเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้ง (กิโลกรัม น้ำหนักน้ำ/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง·ชั่วโมง) กับปริมาณความชื้น (กิโลกรัม น้ำหนักน้ำ/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงแช่อิ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้สมการลิวอิส (Lewis) เพจ (Page) และโมดิฟายด์เพจ (Modified Page) แสดงดังตารางที่ 4



ภาพที่ 10 การเรียงชั้นมะม่วงแช่อิ่มสำหรับการทำแห้งและเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด

ตารางที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงแช่แข็ง

ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง	อ้างอิง
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	(Oduola และ Oforkansi, 2016)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(Chayjan และคณะ, 2012)
Modified Page	$MR = \text{Exp}((-kt))^n$	(Aregbesola และคณะ, 2015)

3.4.7 การศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของมะม่วงแช่แข็งแห้ง

ในการศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของมะม่วงแช่แข็งแห้งโดยทำการแช่ขึ้นมะม่วงในสารละลายออสโมติกตามการศึกษาในข้อที่ 3.4.5 หลังจากนั้นทำการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและการศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของมะม่วงแช่แข็งแห้งโดยทำแช่ขึ้นมะม่วงในสารละลายออสโมติกและทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้มะม่วงแช่แข็งแห้งไปวิเคราะห์ค่าทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี **แสดงรายดั่งละเอียดในภาคผนวก** ค่าสี ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenol oxidase (PPO activity) และวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด ตามรายละเอียดในข้อ 3.4.4.2 โดยการวัดเนื้อสัมผัสในตัวอย่างแห้งทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer โดยวัดที่ตำแหน่งตรงกลางของชิ้นมะม่วง วิเคราะห์เนื้อสัมผัสแบบ Texture Profile Analysis (TPA) **แสดงรายดั่งละเอียดในภาคผนวก**

3.4.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ โดย block คือ ชุดตัวอย่าง (lot) เนื่องจากความแตกต่างของช่วงเวลาระหว่างซื้อจนกระทั่งนำมาทดลองทำการศึกษาที่อิทธิพลที่แตกต่างกันในคุณภาพวัตถุดิบเริ่มต้น ประมวลผลข้อมูล และวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS version 16.0 โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of Variance, ANOVA) **ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์** เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

สำหรับการเปรียบเทียบคุณภาพทางกายภาพและเคมีของมะม่วงภายหลังทำการศึกษา ได้แก่ ค่าสี วิเคราะห์เนื้อสัมผัส ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenol oxidase (PPO activity) และวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด โดยการวิเคราะห์ ANOVA ซึ่งใช้มะม่วงของแต่ละชุดการทดลอง โดยการวิเคราะห์ ANOVA ซึ่งใช้มะม่วงสดทั้ง 2 รุ่นเป็น block และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan **ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p=0.05)** ซึ่งวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิและสภาวะการเตรียมตัวอย่างจากสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียล (2x3) โดยกำหนดให้ศึกษาการทำแห้งที่อุณหภูมิ 2 ระดับ (50 และ 60

องศาเซลเซียส) และสภาวะการเตรียมตัวอย่าง 3 ระดับ (ตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างแช่เยือกแข็งแบบช้า และตัวอย่างแช่เยือกแข็งแบบเร็ว) และสำหรับการเปรียบเทียบคุณภาพทางกายภาพและเคมีของ มะม่วงภายหลังทำการศึกษา ได้แก่ ค่าสี วิเคราะห์เนื้อสัมผัส ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenol oxidase (PPO activity) และ วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด โดยการวิเคราะห์ ANOVA ซึ่งใช้มะม่วงของแต่ละชุดการทดลอง โดยการวิเคราะห์ ANOVA ซึ่งใช้มะม่วงสดทั้ง 2 รุ่นเป็น block และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p=0.05$) ซึ่งวิเคราะห์อิทธิพลของสภาวะการเตรียมตัวอย่างและระยะเวลาในการเก็บรักษาจากสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียล (3×3) โดยกำหนดให้ศึกษาสภาวะการเตรียมตัวอย่าง 3 ระดับ (ตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างแช่เยือกแข็งแบบช้าและตัวอย่างแช่เยือกแข็งแบบเร็ว) และระยะเวลาในการเก็บรักษา 3 ระดับ (ไม่ได้ทำการเก็บรักษา ที่ 0 เดือน เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 2 เดือน)



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมะม่วงสุกที่ใช้ศึกษา

มะม่วงสุกที่ใช้การศึกษามีการใช้มะม่วงที่ซื้อมาทั้งหมด 7 ชุดการทดลองสำหรับการทำการศึกษา ทุกครั้งต้องทำการวัดคุณภาพของมะม่วงสุกเริ่มต้นเพื่อทำการศึกษาและควบคุมวัตถุดิบเริ่มต้นในค่า ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของทุกการทดลองให้มีค่าอยู่ในช่วง 18.6-19.6 องศาบริกซ์ แสดงดังตารางที่ 5 สำหรับค่าสีมะม่วงด้านที่ติดเปลือกมีค่า L^* ในช่วง 43.75-61.32 และค่า b^* อยู่ใน ช่วง 38.18-64.22 และค่า Hue angle อยู่ในช่วงประมาณ 73.25° - 78.60° ซึ่งมีมุมใกล้เคียง 90° แสดงถึงสีเหลือง ส่วนทางด้านที่ติดเมล็ดมีค่า L^* ในช่วง 43.75-61.32 และค่า b^* อยู่ในช่วง 38.18-64.22 และค่า Hue angle อยู่ในช่วงประมาณ 73.25° - 78.60°

ความแน่นเนื้อของมะม่วง โดยทำการวัดค่าแรงกดสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 0.27-0.57 นิวตัน มีรายงานว่ (นิษฐา, 2551) ทำการวัดความแน่นเนื้อของผลมะม่วงโชคอนันต์มีค่าเท่ากับ 0.09-0.12 นิวตัน ซึ่งความแน่นเนื้อของมะม่วงที่ใช้ในการศึกษาต้องทำการควบคุมเนื่องจากมีผลต่อการถ่ายเทมวลในระหว่างการแช่เย็นและการอบแห้ง โดยมะม่วงที่สุกเกินไปจะมีผลทำให้เนื้อสัมผัสของมะม่วงนิ่ม และหากมะม่วงดิบจนเกินไปจะมีผลต่อความแน่นเนื้อที่แข็งเกินไปการชิมผ่านของน้ำตาลเข้าสู่ชิ้น มะม่วงจะเกิดได้ไม่ดี

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดกำหนดให้มีค่าของมะม่วงทุกชิ้นที่ใช้ในการทดลองมีค่า อยู่ใน ช่วง 18.6-19.6 องศาบริกซ์ ซึ่งในตารางทำการเฉลี่ยค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดอยู่ใน ช่วง 18.7-19.2 องศาบริกซ์ซึ่งเป็นค่าปริมาณความหวานของมะม่วงสุกตามกำหนดที่ใช้ในการ การศึกษา ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง Chaikattiyos และคณะ (2000) พบว่าเมื่อทำการบ่มสุกจนมี ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดจนมีค่าเท่ากับ 21.0-24.5 องศาบริกซ์ซึ่งเป็นระยะที่มะม่วงพันธุ์ แก้วมีความสุกเต็มที่ซึ่งส่งผลให้เนื้อสัมผัสนิ่มเกินไป ส่วนการศึกษาที่มีการทำแห้งมะม่วงทำการ ควบคุมปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดให้มีค่าอยู่ในช่วง 18.0-21.0 องศาบริกซ์ (Korbek และ คณะ, 2013)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีค่าอยู่ในช่วง 3.63-4.28 มีความสอดคล้องกับที่รายงานโดย นิษฐา (2551) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.03 และ นิยมิตรา (2559) รายงานว่าเมื่อทำการบ่ม มะม่วงสุกส่งผลให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 2.85 เป็น 5.83 สำหรับปริมาณกรดที่ ไทเทรตได้ (Titratable acidity, TA) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.74-1.08 ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมี นัยสำคัญ ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ (Noiwan และคณะ, 2017) ซึ่งรายงาน ว่าปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จะมีค่าลดลงระหว่างการบ่มสุกมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.2-0.9 เนื่องจากความ เข้มข้นของกรดอินทรีย์จะลดลงระหว่างการสุก โดยมีการเปลี่ยนกรดซิตริกเป็นน้ำตาลและการนำไปใช้

ประโยชน์เพิ่มเติมในกระบวนการเผาผลาญของผลไม้ โดยในผลมะม่วงมีปริมาณกรดซิตริกซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในมะม่วงหลายสายพันธุ์จะมีปริมาณลดลงระหว่างการสุก (Yasunaga และคณะ, 2018)

ปริมาณความชื้นของเนื้อมะม่วงสดแต่ละชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 78.89-82.56 % ฐานเปียกซึ่งปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีความสอดคล้องกับที่รายงานโดย (Sogi และคณะ, 2015) ว่าความชื้นมะม่วงสุกมีค่าเท่ากับ 86.85 % ฐานเปียก และ (Sarkar และคณะ, 2020) รายงานว่ามีปริมาณความชื้นเท่ากับ 78.4% ฐานเปียก เช่นเดียวกับนิษฐา (2551) ทำการวัดคุณภาพเบื้องต้นของมะม่วงโชคอนันต์ก่อนนำไปทำการแช่อบแห้งมีค่าความชื้นเท่ากับ 77.40 % ฐานเปียก



ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมะม่วงสุกก่อนการทำการศึกษา

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี	ค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน						
	มะม่วงที่ซื้อ ชุดที่ 1	มะม่วงที่ซื้อ ชุดที่ 2	มะม่วงที่ซื้อ ชุดที่ 3	มะม่วงที่ซื้อ ชุดที่ 4	มะม่วงที่ซื้อ ชุดที่ 5	มะม่วงที่ซื้อ ชุดที่ 6	มะม่วงที่ซื้อ ชุดที่ 7
สีเนื้อมะม่วง							
ด้านติดเปลือก, L* (ความสว่าง)	59.71±2.14 ^a	43.75±1.35 ^b	59.25±2.83 ^a	60.05±3.55 ^a	57.11±1.81 ^a	57.81±0.29 ^a	61.32±5.24 ^a
a* (+ สีแดง)	18.09±2.21 ^a	11.50±0.94 ^b	16.67±2.10 ^a	13.60±4.26 ^{ab}	15.49±0.52 ^{ab}	12.02±0.03 ^b	11.27±1.09 ^b
b* (+ สีเหลือง)	64.22±3.40 ^a	38.18±1.66 ^c	61.23±1.77 ^a	57.43±0.54 ^b	63.36±3.45 ^a	56.43±0.55 ^b	55.68±0.50 ^b
Chroma	66.76±3.11 ^a	39.88±1.75 ^c	63.48±1.95 ^a	59.11±1.52 ^b	65.25±3.21 ^a	57.71±0.56 ^b	56.83±0.69 ^b
Hue	74.22±2.26 ^{ab}	73.25±1.10 ^b	74.79±1.74 ^{ab}	76.69±3.96 ^{ab}	76.17±1.25 ^{ab}	77.99±0.16 ^a	78.60±1.02 ^a
ด้านติดเมล็ด, L* (ความสว่าง)	55.94±2.43 ^a	41.57±1.12 ^b	54.42±3.49 ^a	57.59±1.88 ^a	56.28±1.30 ^a	54.22±1.86 ^a	56.12±4.54 ^a
a* (+ สีแดง)	18.31±1.50 ^a	10.63±1.07 ^d	16.31±1.98 ^{ab}	13.15±3.46 ^{bcd}	14.45±1.06 ^{bc}	12.08±0.12 ^{cd}	12.73±0.80 ^{bcd}
b* (+ สีเหลือง)	57.02±12.84 ^a	34.46±1.01 ^b	56.60±3.54 ^a	57.34±0.58 ^a	61.07±1.64 ^a	55.47±4.08 ^a	56.14±5.02 ^a
Chroma	60.23±11.01 ^{ab}	36.07±1.08 ^c	58.94±3.43 ^{ab}	58.92±0.21 ^{ab}	62.80±1.34 ^a	56.80±3.96 ^b	57.59±5.09 ^{ab}

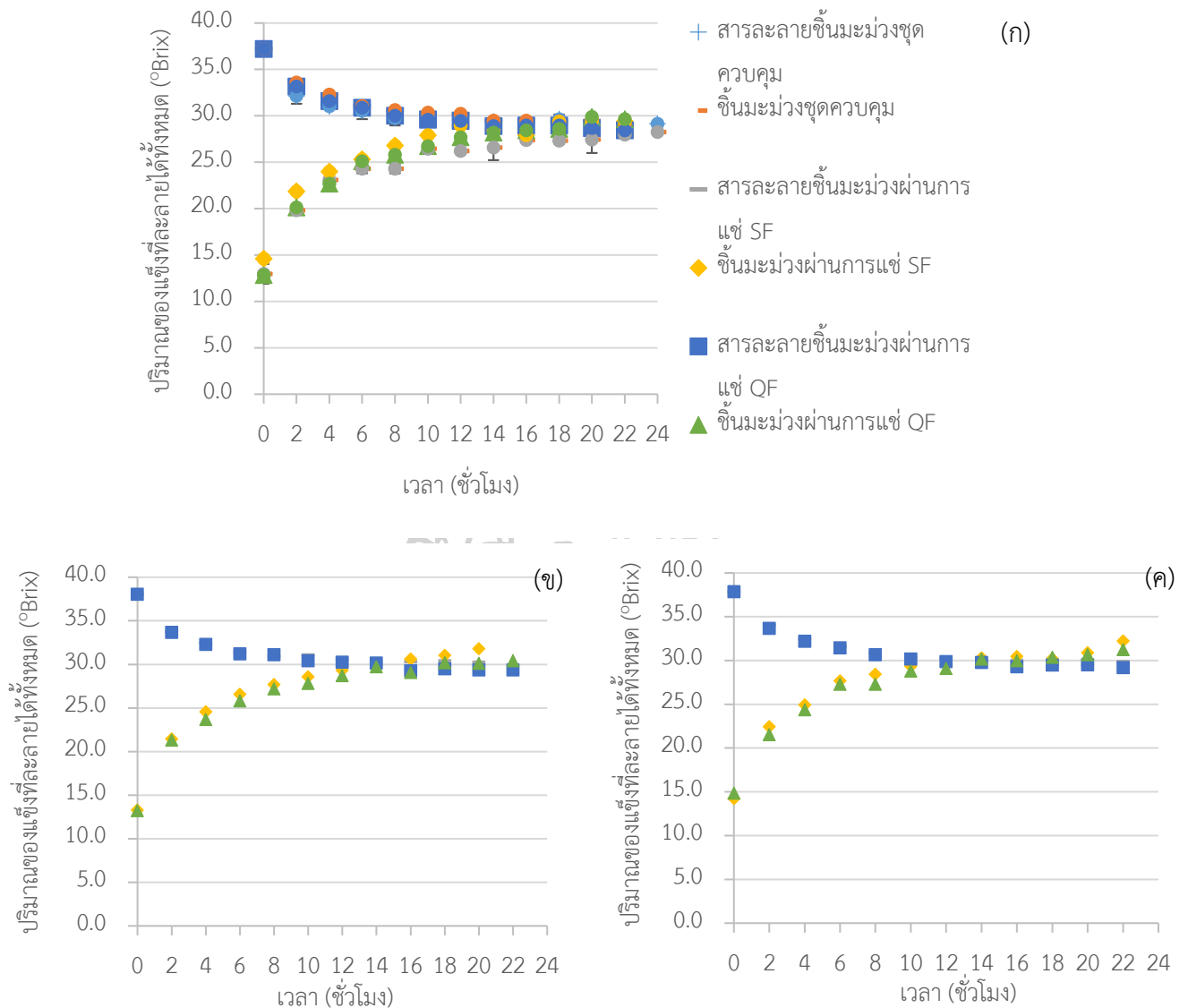
Hue	70.70±8.92 ^c	72.86±1.58 ^{bc}	73.89±2.14 ^{abc}	77.04±3.42 ^a	76.61±1.42 ^{ab}	77.68±0.95 ^a	77.25±0.35 ^a
ความแน่นเนื้อ	0.57±0.12 ^a	0.55±0.09 ^a	0.42±0.07 ^b	0.41±0.04 ^b	0.30±0.06 ^c	0.27±0.05 ^c	0.31±0.08 ^c
ค่าแรงกดสูงสุด (นิวตัน)	18.7±0.2	18.9±0.32	19.1±0.3	19.09±0.11	19.2±2.2	19.0±0.4	19.01±0.03
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด TSS (°Brix) ^{ns}	4.28±0.16 ^a	3.73±0.20 ^b	4.20±0.3 ^a	3.77±0.26 ^b	3.63±0.17 ^b	3.68±0.07 ^b	3.69±0.06 ^b
ความเป็นกรดต่าง (pH)	0.74±0.04	1.08±0.25	0.93±0.19	1.06±0.23	0.96±0.18	1.06±0.45	0.85±0.16
ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable acidity, TA) % ^{ns}	82.32±0.49 ^a	82.56±0.83 ^a	80.75±1.01 ^{ab}	80.73±1.02 ^{ab}	78.89±1.38 ^b	81.79±0.07 ^a	81.08±1.08 ^a

a b และ c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

4.2 ผลของการแช่เยือกแข็งต่อกระบวนการออสโมติกของมะม่วงแช่แข็ง

ภาพที่ 11 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ของสารละลายและชั้นมะม่วงชุดควบคุม (ชั้นมะม่วงที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง) และชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า (SF) และชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (QF) แช่ในสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 38 องศาบริกซ์ ที่เวลาต่างๆ พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า ใช้เวลาในการแพร่เข้าสู่สมดุลสั้นที่สุด 16 ชั่วโมง โดยปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายมีค่าลดลงเป็น 29.5 องศาบริกซ์ ส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของชั้นมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 14.6 เป็น 27.9 องศาบริกซ์ ทั้งนี้เนื่องจากการแช่เยือกแข็งแบบช้าส่งผลให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ภายในชั้นตัวอย่าง เกิดช่องว่างระหว่างเซลล์มากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดอัตราการแพร่ผ่านระหว่างตัวอย่างกับสารละลายในตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง (Chung และคณะ, 2013; Flourey และคณะ, 2008) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chung และคณะ (2013) ซึ่งทำการแช่เยือกแข็งผลแอปพริคอตญี่ปุ่นที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสและ -50 องศาเซลเซียส เพื่อทำการสกัดน้ำโดยใช้การแช่ในสารละลายออสโมติก พบว่าการแช่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ส่งผลให้โครงสร้างการมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการแช่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างการแช่เยือกแข็งกับตัวอย่างที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส และ -50 องศาเซลเซียส กับตัวอย่างควบคุมพบว่าเนื้อผลไม้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งส่งผลให้การแช่สารออสโมติกเกิดเร็วขึ้นและลดการสลายตัวของเซลล์เนื้อเยื่อพืช เช่นเดียวกับการศึกษาของ Akharume และคณะ (2016) ทำการศึกษาผลบลูเบอร์รี่แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปแช่ในสารละลายออสโมติก รายงานว่าผลบลูเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นจาก 12.50 องศาบริกซ์เป็น 32.90 องศาบริกซ์ ใช้เวลาเพียง 420 นาที ส่วนผลบลูเบอร์รี่สดมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลที่น้อยกว่าเปลี่ยนจาก 10.20 องศาบริกซ์เป็น 13.40 องศาบริกซ์ ใน 200 นาที และยังคงอยู่ที่ระดับนี้โดยใช้เวลาในการแช่ประมาณ 10 ชั่วโมง ความแตกต่างของการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของน้ำตาลระหว่างบลูเบอร์รี่สดและแช่แข็ง เนื่องจากผิวผลไม้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งเกิดรอยร้าว แตกของเยื่อหุ้มเซลล์ด้านในโดยผลบลูเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่แข็งจะไม่สร้างสิ่งกีดขวางสารละลายออสโมติกสำหรับการถ่ายโอนน้ำตาลจากสารละลายสู่ภายในผลบลูเบอร์รี่ และการแช่เยือกแข็งชั้นมะม่วงก่อนการแช่ในสารละลายออสโมติกที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งการแช่เยือกแข็งทำให้การซึมผ่านของเซลล์เนื้อเยื่อเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เนื้อเยื่อมีลักษณะฉีกขาด มีรูปร่างเปลี่ยนแปลง ในขณะที่แช่แข็งโครงสร้างภายนอกเซลล์จะเกิดการแข็งตัวก่อน ส่งผลให้เกิดรูพรุนภายในเซลล์ทำให้เกิดช่องของการแทรกซึมน้ำได้ง่ายขึ้น (Flourey และคณะ, 2008) รองลงมาคือ การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (QF) ใช้เวลาในการแช่ 20 ชั่วโมง และตัวอย่างควบคุม (ชั้นมะม่วงที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง) ใช้เวลาในการแช่ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยใช้วิธีในการพิจารณาการเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในชั้นมะม่วงมีค่าเข้าใกล้ 30 องศาบริกซ์ และจุดใกล้เข้าใกล้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายที่ตำแหน่งแรกจึงนับว่าเป็นตำแหน่งที่เข้าสู่สมดุล



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS, องศาบริกซ์) ของสารละลาย ออสโมติกและขึ้นมะม่วงในระหว่างการแช่ในสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้น 38 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิห้อง (ก) ขึ้นมะม่วงที่ไม่ผ่านการเก็บรักษา (ข) ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งหลัง เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือน และ (ค) ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งหลังเก็บรักษาเป็น ระยะเวลา 2 เดือน

จากภาพที่ 11 (ข) และภาพที่ 11 (ค) สำหรับการศึกษการแช่เยือกแข็งเมื่อเก็บรักษาขึ้น มะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 วิธีที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 และ 2 เดือน ต่อการแช่ในสารละลายออสโมติก พบว่าการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลาที่นานขึ้นทำให้ลดระยะเวลา ในการแช่กระบวนการออสโมติกเหลือเพียง 14 ชั่วโมง จนกระทั่งสารละลายออสโมติกและขึ้นมะม่วง

เข้าสู่สมดุลโดยมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายมีค่าลดลงจาก 37.8 ± 0.34 องศาบริกซ์ เป็น 30.0 ± 0.21 องศาบริกซ์ ส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของซึ้นมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 13.9 ± 0.76 องศาบริกซ์เป็น 30.0 ± 0.22 องศาบริกซ์ โดยทำการพิจารณาการเข้าสู่จุดสมดุลเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อทำการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลาที่นานขึ้น ส่งผลให้ภายในโครงสร้างหรือเนื้อเยื่อพืชเกิดความเสียหาย ซึ่งเกิดช่องว่างระหว่างเซลล์ จึงเกิดอัตราการแพร่ผ่านระหว่างสารละลายกับเซลล์เนื้อเยื่อได้ง่ายขึ้น (Chassagne-Berces และคณะ, 2009) และจากการตกผลึกใหม่ของผลึกน้ำแข็ง เนื่องจากมีความผันผวนของอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษาการจึงส่งผลให้เกิดการตกผลึกซ้ำซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มขนาดและรูปร่างของผลึกน้ำแข็งให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (Fell, 2016) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Syamaladevi และคณะ (2012) เกิดการตกผลึกใหม่ของน้ำแข็งในปลาแซลมอนแอตแลนติกภายใต้การเปลี่ยนสถานะระหว่างการเก็บรักษาโดยการแช่เยือกแข็ง ซึ่งรายงานวาระหว่างการเก็บรักษาด้วยการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 1 เดือน ส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของผลึกน้ำแข็งเป็นร้อยละ 82.4 โดยผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นและจำนวนผลึกน้ำแข็งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแช่เยือกแข็งโดยไม่ทำการเก็บรักษา เช่นเดียวกับการแช่เยือกแข็งมะม่วงที่อุณหภูมิ -38 องศาเซลเซียส ที่สภาวะมีการผันผวนของอุณหภูมิโดยทำการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 1 เดือนพบการตกผลึกใหม่ของน้ำแข็งมีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดผลึกน้ำแข็งเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 162 จากร้อยละ 53.2 ที่ระยะเวลาในการเก็บรักษาด้วยการแช่เยือกแข็ง 1 สัปดาห์ (Zhang และคณะ, 2018) และพบว่าใช้เวลาที่เข้าสู่สมดุลของกระบวนการออสโมซิสของการแช่เยือกแข็งเมื่อเก็บรักษาซึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 วิธีที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 และ 2 เดือนใช้เวลา 14 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 6 โดยการออสโมซิสอาศัยหลักการเคลื่อนย้ายน้ำบางส่วนออกจากอาหารไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า หรือมีค่าออสโมติกพีดีต่ำกว่านั้นที่ความแตกต่างระหว่างความดันออสโมติกของสารละลายกับอาหารทำให้เกิดแรงขับ (driving force) ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทมวลระหว่างสารละลายออสโมติกและอาหารโดยเกิดการแพร่ของน้ำจากชั้นอาหารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ไปยังสารละลายในขณะเดียวกันจะเกิดการแพร่ของของแข็งจากสารละลายผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ไปยังชั้นอาหาร (นิษฐา, 2551)

ตารางที่ 6 เวลาที่เข้าสู่สมดุลของกระบวนการออสโมติกของการเชื่อมชิ้นมะม่วงและที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีต่างๆ

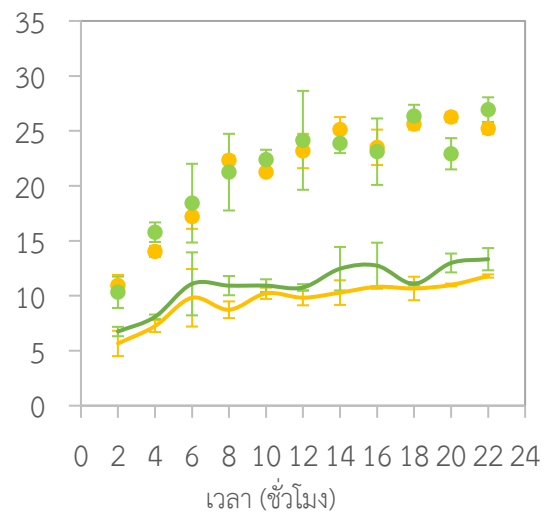
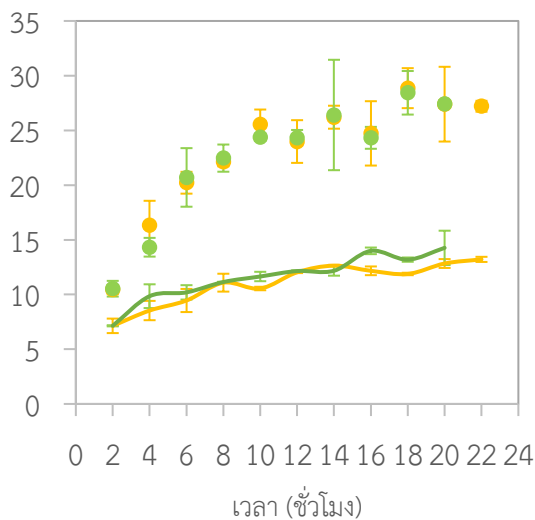
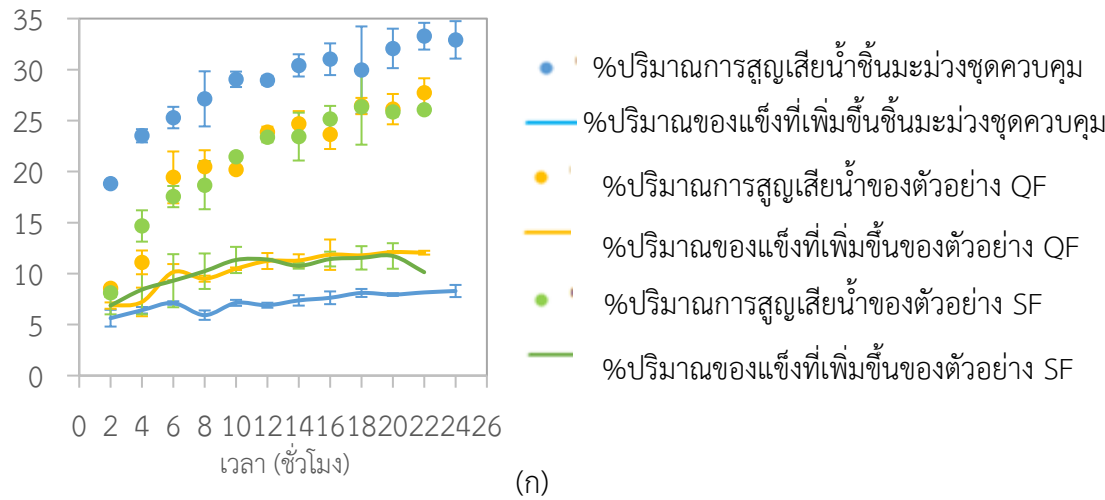
ระยะเวลา การเก็บรักษา (เดือน)	สถานะ	เวลาเข้าสู่ สมดุล (ชั่วโมง)	ปริมาณของแข็งที่ ละลายได้ทั้งหมด ของสารละลาย (องศาบริกซ์)	ปริมาณของแข็งที่ ละลายได้ทั้งหมด ของชิ้นมะม่วง (องศาบริกซ์)
0	ชิ้นมะม่วงชุดควบคุม	24	29.2±0.64	28.3±0.78
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่	16	29.5±0.35	27.9±0.85
	เยือกแข็งแบบช้า			
1	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่	20	28.7±0.11	29.9±1.45
	เยือกแข็งแบบเร็ว			
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่	14	30.2±1.31	30.0±0.99
2	เยือกแข็งแบบช้า			
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่	14	30.2±0.57	29.7±0.46
	เยือกแข็งแบบเร็ว			
2	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่	14	29.9±0.07	30.3±0.71
	เยือกแข็งแบบช้า			
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่	14	29.8±0.32	30.2±0.81
	เยือกแข็งแบบเร็ว			

การศึกษาการแช่ในสารละลายออสโมติกต่อปริมาณการสูญเสียน้ำ (Water loss, WL) และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid gain, SG) แสดงดังภาพที่ 12 โดย ภาพที่ 12(ก) พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีแนวโน้มปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นมะม่วงชุดควบคุม (ชิ้นมะม่วงที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง) ที่ระยะเวลาในการแช่ในสารละลายออสโมติกที่ 20 ชั่วโมง เป็นร้อยละ 12.10 ร้อยละ 11.73 และร้อยละ 7.95 ตามลำดับ เนื่องจากผิวผลไม้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งเกิดรูพรุนภายในเซลล์ และเยื่อหุ้มเซลล์ด้านในมีรอยแตก ส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลหรือปริมาณของแข็งภายในชิ้นมะม่วงเพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีสิ่งกีดขวางการแพร่ผ่านของสารละลายน้ำตาลเข้าสู่ภายในเซลล์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akharume และคณะ (2016) รายงานว่ามีปริมาณการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลที่แตกต่างกันระหว่างบลูเบอร์รี่แช่แข็งและบลูเบอร์รี่สด ซึ่งบลูเบอร์รี่แช่แข็งมีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นเป็นปริมาณ 3 เท่าหรือคิดเป็นร้อยละ 23 เมื่อเปรียบเทียบกับผลบลูเบอร์รี่สดเมื่อสิ้นสุดกระบวนการออสโมติก เช่นเดียวกับ Kowalska และคณะ (2008) รายงานว่าการเตรียมตัวอย่างฟักทองด้วยการแช่เยือกแข็งส่งผลให้มีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นใน

การแช่สารละลายออสโมติกเป็นเวลา 180 นาที เป็น 2.096 กรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้งเริ่มต้น ซึ่งมากกว่าตัวอย่างฟักทองที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่ระยะเวลาเท่ากันเป็น 0.765 กรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้งเริ่มต้น

ปริมาณการสูญเสียน้ำพบว่าขึ้นมะม่วงชุดควบคุมมีปริมาณการสูญเสียน้ำมากที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและการแช่เยือกแข็งแบบช้าเป็นร้อยละ 32.08 ร้อยละ 26.12 และร้อยละ 25.86 เนื่องจากขึ้นมะม่วงชุดควบคุมมีโครงสร้างภายในเซลล์ของขึ้นมะม่วงที่มีความแข็งแรง ไม่มีรูพรุนสำหรับให้ปริมาณของแข็งสามารถแพร่ผ่านเข้ามาภายในเซลล์ได้ ปริมาณน้ำที่อยู่ภายในเซลล์จึงเกิดการแพร่ออกภายนอกเซลล์ได้มากกว่าเพื่อเป็นการปรับสมดุลภายในเซลล์ เช่นเดียวกับการศึกษาในตัวอย่างฟักทองที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีปริมาณการสูญเสียน้ำมากกว่าตัวอย่างฟักทองที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°C เป็น 1.773 กรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้งเริ่มต้น และปริมาณการสูญเสียน้ำของตัวอย่างฟักทองที่ผ่านการแช่เยือกแข็งเป็น 0.723 กรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้งเริ่มต้น (Kowalska และคณะ, 2008) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองตัวอย่างพริกหวานสีแดงที่แช่ในสารละลายออสโมติกพบว่ามีปริมาณการสูญเสียน้ำในสภาวะที่มีการแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นเพียง 1.9 กรัมต่อกรัมน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง (Ade-Omowaye และคณะ, 2003)

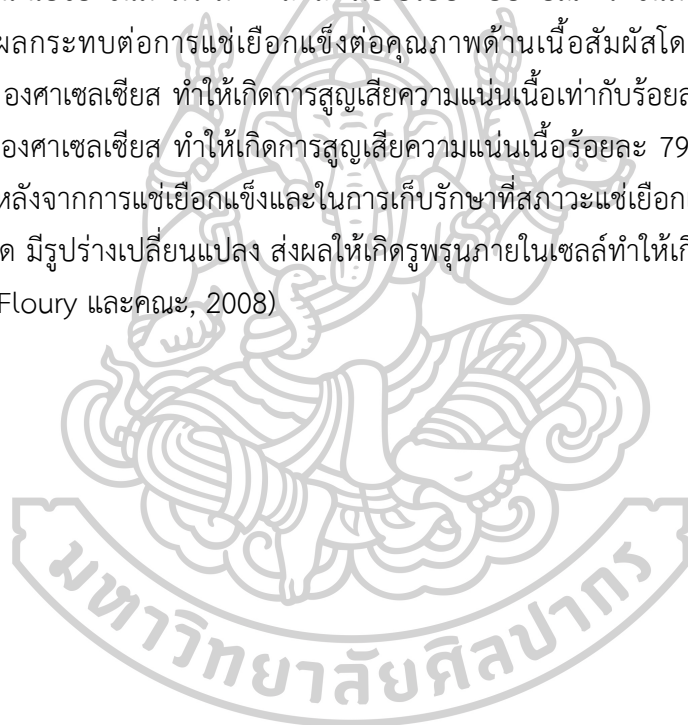
สำหรับการเตรียมตัวอย่างแช่เยือกแข็งเมื่อเก็บรักษาขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 วิธีที่อุณหภูมิ -18°C องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 และ 2 เดือน แสดงดังภาพที่ 12(ข) และ 12(ค) พบว่าในตัวอย่างแช่เยือกแข็งแบบช้าและตัวอย่างการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีปริมาณการสูญเสียน้ำและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมีปริมาณการเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาที่แช่ในสารละลายออสโมติก เนื่องจากการแช่เยือกแข็งส่งผลให้เซลล์ถูกทำลาย และช่วยให้เกิดการแพร่ผ่านระหว่างน้ำแพร่ผ่านออกภายนอกเซลล์และปริมาณของแข็งหรือน้ำตาลเคลื่อนที่เข้ามาภายในเซลล์ได้ง่ายขึ้น (Alfaro และคณะ, 2018; Nsonzi และ Ramaswamy, 1998)

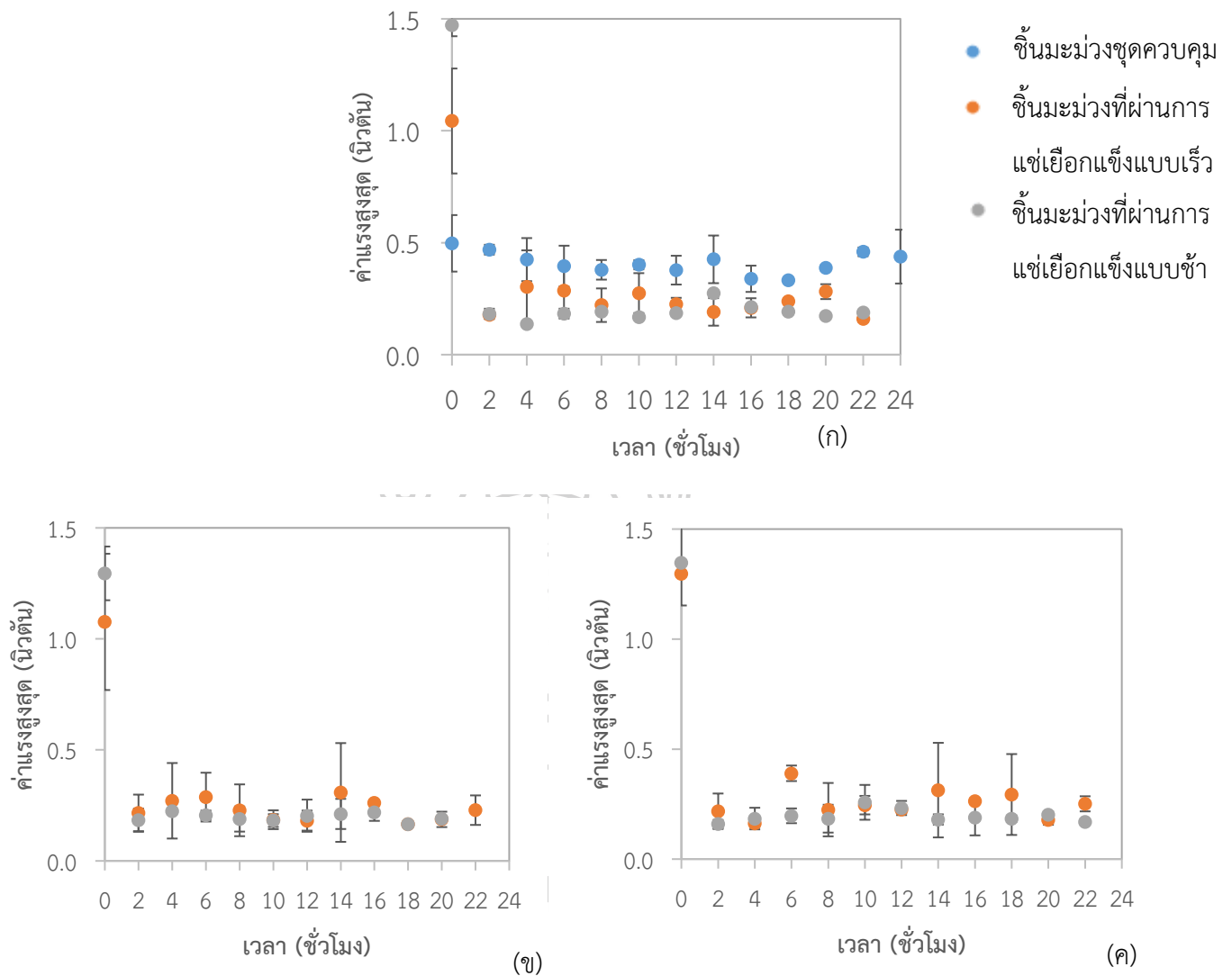


ภาพที่ 12 ผลของการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งต่อปริมาณการสูญเสียน้ำและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นโดยใช้เวลาในการเก็บรักษาที่แตกต่างกันที่ (ก) ที่ระยะเวลาเริ่มต้น (ข) เก็บไว้ที่ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 เดือนและ (ค) 2 เดือน

ในระหว่างการศึกษการแช่ชิ้นมะม่วงในสารละลายออสโมติกทำการวัดค่าความแน่นเนื้อระหว่างการแช่สารละลายออสโมติกทุกๆ 2 ชั่วโมง พบว่าค่าความแน่นเนื้อของชิ้นมะม่วงระหว่างการแช่ในสารละลายออสโมติกมีค่าความแน่นเนื้อลดลง แสดงดังภาพที่ 13 (ก) โดยพบว่าตัวอย่างควบคุม (ชิ้นมะม่วงที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง) มีค่าความแน่นเนื้อที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.50 ± 0.13 นิวตัน ส่วนชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า 1.04 ± 0.23 นิวตัน และ 1.47 ± 0.05 นิวตัน ตามลำดับ และพบว่ามีความแน่นเนื้อลดลงตามระยะเวลาในการแช่ในสารละลายออสโมติกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึงชั่วโมงที่ 20 ในตัวอย่างควบคุมชิ้น

มะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีค่าความแน่นเนื้อลดลงเป็น 0.39 ± 0.01 นิวตัน 0.28 ± 0.03 นิวตัน และ 0.17 ± 0.00 นิวตัน ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างที่ทำการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 เดือน แสดงดังภาพที่ 13 (ข) พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึงชั่วโมงที่ 20 ตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีค่าความแน่นเนื้อลดลงเท่ากันเป็น 0.19 นิวตัน โดยค่าที่วัดเวลาเริ่มต้นก่อนนำแช่ในสารละลายออสโมติกและชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 เดือน แสดงดังภาพที่ 13 (ค) ชั่วโมงที่ 20 มีค่าความแน่นเนื้อลดลงใกล้เคียงกันในชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าและที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วเป็น 0.20 ± 0.01 นิวตัน และ 0.18 ± 0.02 นิวตัน ซึ่งระยะเวลาในการแช่ในสารละลายออสโมติกเมื่อใช้เวลาในการแช่ที่นานขึ้นส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อของชั้นมะม่วงมีค่าที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะชั้นมะม่วงที่ระยะเวลาเริ่มต้นในการศึกษาผลกระทบต่อการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสโดยทำการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสูญเสียความแน่นเนื้อเท่ากับร้อยละ 54 ส่วนการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสูญเสียความแน่นเนื้อร้อยละ 79 (Jha และคณะ, 2019) เนื่องจากการหลังจากการแช่เยือกแข็งและในการเก็บรักษาที่สภาวะแช่เยือกแข็งส่งผลให้โครงสร้างมีลักษณะฉีกขาด มีรูปร่างเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดรูพรุนภายในเซลล์ทำให้เกิดช่องของการแทรกซึมน้ำได้ง่ายขึ้น (Floury และคณะ, 2008)

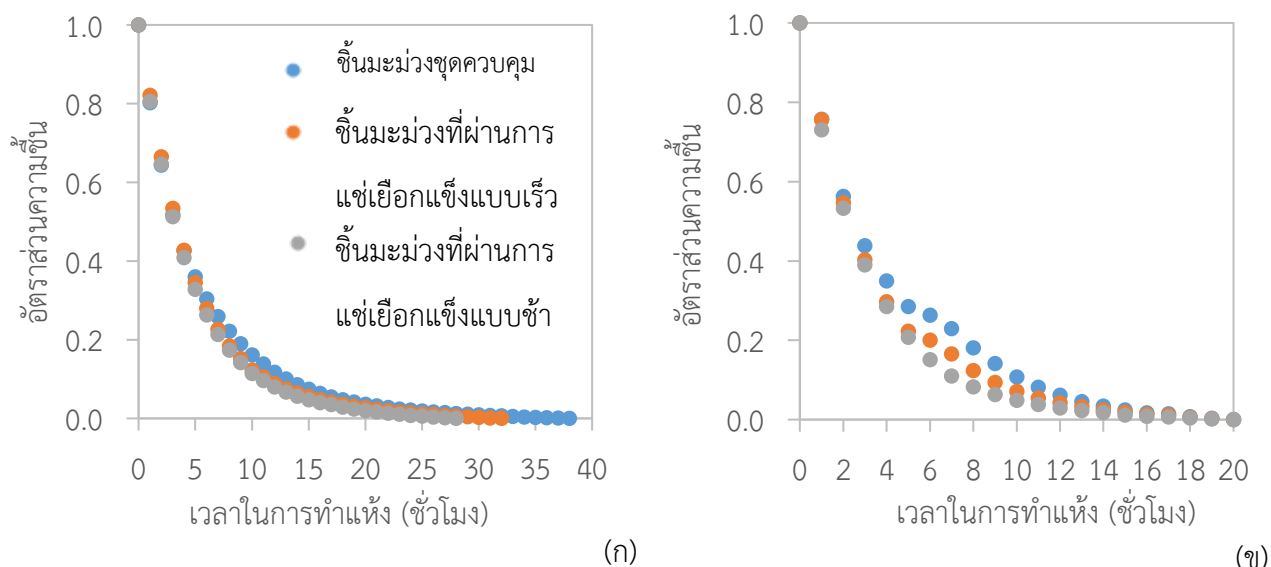




ภาพที่ 13 ผลของการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งต่อค่าความแน่นเนื้อของชิ้นมะม่วงระหว่างการแช่ในสารละลายออสโมติกโดยใช้เวลาในการเก็บรักษาที่ต่างกัน (ก) ที่ระยะเวลาเริ่มต้น (ข) เก็บรักษาชิ้นมะม่วงที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 เดือนและ (ค) 2 เดือน

4.3 ผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งของมะม่วงแช่หิมอบแห้ง

การทำแห้งมีผลต่อการลดลงของปริมาณความชื้นของชิ้นมะม่วงแช่หิมอบแห้งในระหว่างการอบแห้ง โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งของมะม่วงแช่หิมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและ 60 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 14 เห็นว่าอัตราการระเหยความชื้นในทุกสภาวะมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทำแห้ง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ของตัวอย่างกับอากาศร้อนในช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้นในการทำแห้งเมื่อน้ำอิสระ (free water) ที่ผิวหน้าชิ้นตัวอย่างได้รับความร้อนจะขยายตัว ทำให้มีความหนาแน่นลดลง น้ำที่อยู่ด้านในตัวอย่างซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าและมีความหนาแน่นมากกว่า จึงเคลื่อนที่โดยการแพร่ออกมายังผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เพื่อทดแทนส่วนที่ระเหยไป เรียกการทำแห้งในช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ แต่เมื่อเวลาผ่านไป ความชื้นในชิ้นมะม่วงเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารได้น้อยลงและไม่เพียงพอต่อการระเหย ทำให้ในช่วงนี้มีอัตราการระเหยน้ำช้าลงเรียกว่า ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดอัตราการทำแห้งที่สูงกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่ผิวหน้าของชิ้นมะม่วงแช่หิมอบแห้งและอุณหภูมิของลมร้อนมีความแตกต่างกันมาก ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในการทำแห้งพบว่าในการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งแบบแช่ที่ใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 28 ชั่วโมงและ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยทำการกำหนดปริมาณความชื้นชิ้นมะม่วงแช่หิมอบแห้งให้มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 18 ซึ่งส่งผลให้ใช้ระยะเวลาการทำแห้งที่สั้นที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นมะม่วงชุดควบคุมและชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วที่ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งเดียวกัน เช่นเดียวกับการศึกษา Akharume และคณะ (2016) รายงานว่าผลลูเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้ง โดยใช้เวลาเพียง 170 นาที ซึ่งลดระยะเวลาในการอบแห้งลงเหลือร้อยละ 53 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลลูเบอร์รี่สดใช้เวลาถึง 260 นาที เกิดจากการที่การแช่เยือกแข็งส่งผลให้ภายในเนื้อเยื่อเซลล์มีรอยแตกซึ่งไม่พบในผลลูเบอร์รี่สด เช่นเดียวกับการศึกษาอบแห้งแครอทและฟักทองมีการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งพบว่าการแช่เยือกแข็งส่งผลให้อบแห้งได้เร็วขึ้น จลนพลศาสตร์ในการอบแห้งสูงขึ้นและเวลาในการอบแห้งเร็วขึ้น เนื่องจากการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้งเป็นขั้นตอนที่ทำให้เซลล์ถูกทำลาย จึงช่วยให้สามารถจัดความชื้นได้ง่ายขึ้นในระหว่างการอบแห้ง (Arévalo-Pinedo และ Xidieh Murr, 2007) และการแช่เยือกแข็งเป็นการก่อตัวของผลึกน้ำแข็งที่สามารถทำให้เกิดการแยกเซลล์และช่วยส่งเสริมให้ปริมาณน้ำออกจากเซลล์ได้ง่ายในระหว่างการทำแห้ง ซึ่งส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งที่สั้น (Ando และคณะ, 2018; Dandamrongrak และคณะ, 2002; Shen และคณะ, 2020) ทำการอบแห้งจนกระทั่งความชื้นเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปจนผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 18 (ฐานข้อมูลข้อมูลตลาด CBI, 2012) ทั้งนี้ปริมาณความชื้นและระยะเวลาในการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 8

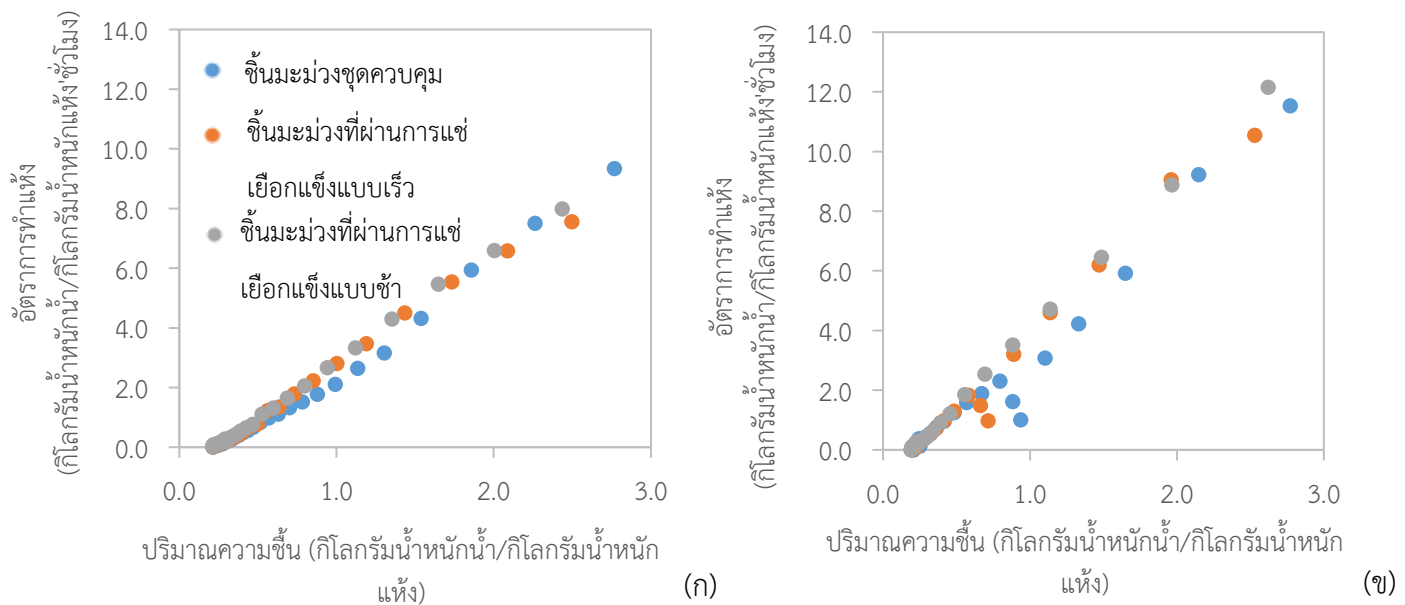


ภาพที่ 14 พฤติกรรมการทำแห้งของขึ้นมะม่วงแช่อิ่มที่เตรียมตัวอย่างที่ต่างกันและทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่ (ก) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ (ข) 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 7 ปริมาณความชื้น และระยะเวลาในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ของขึ้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างที่ต่างกัน

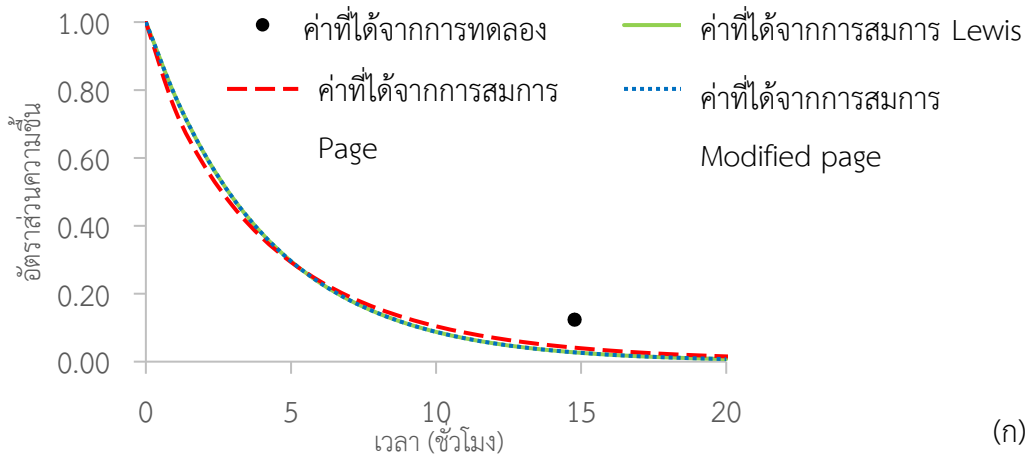
อุณหภูมิ (°C)	สถานะ	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)	ปริมาณความชื้น (%w.b)
50	ขึ้นมะม่วงชุดควบคุม	38	17.86±0.09
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	32	17.68±0.45
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	28	17.52±0.37
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	18	17.34±0.08
60	ขึ้นมะม่วงชุดควบคุม	19	17.74±0.35
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	18	17.34±0.08
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	16	17.34±0.06

ภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งของมะม่วงแช่อบแห้งที่อบแห้งของการเตรียมตัวอย่างที่ต่างกันที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและ 60 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการทำแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าและตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมากกว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยอัตราการแห้งลดลงเมื่อความชื้นของชิ้นมะม่วงแช่อบแห้งมีค่าลดลง โดยการทำให้ที่สภาวะเริ่มต้นความชื้นมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในชิ้นมะม่วง ความแตกต่างของความดันไอของน้ำที่ผิวชิ้นมะม่วงกับความดันไอของน้ำในบรรยากาศมีค่าสูงสุด ทำให้เกิดแรงขับของการแพร่สูงสุด เมื่อเวลาผ่านไปความชื้นในชิ้นมะม่วงมีปริมาณลดลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความชื้นในชิ้นมะม่วงมีความดันไอเท่ากับความดันบรรยากาศรอบๆ จึงทำให้อัตราการทำแห้งลดลง (ภัทรพพร, 2541) การเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพต่ออัตราการแห้งเช่นเดียวกับการศึกษาการทำแห้งด้วยการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งแครอทที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสและทำการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ส่งผลให้เกิดอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดอัตราการถ่ายเทความชื้นที่สูงภายในเนื้อเยื่อของโครงสร้างเซลล์ที่เกิดความเสียหายจากการก่อตัวของผลึกน้ำแข็งในระหว่างการแช่แข็ง (Ando และคณะ, 2018) เช่นเดียวกับ Dandamrongrak และคณะ (2002) การเตรียมตัวอย่างกล้วยด้วยการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้ง ช่วยให้เกิดการถ่ายเทมวลมากขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพในการเพิ่มอัตราการอบแห้งกล้วย

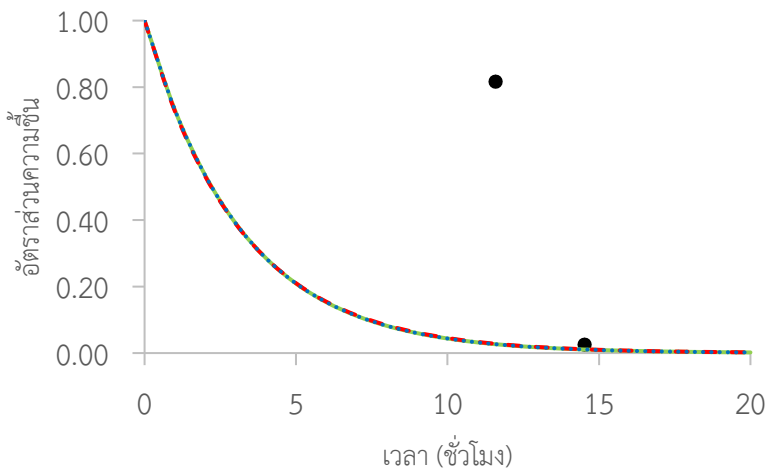


ภาพที่ 15 อัตราการทำแห้งของมะม่วงแช่อบแห้งที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบ
 ภาดที่ (ก) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ (ข) 60 องศาเซลเซียส

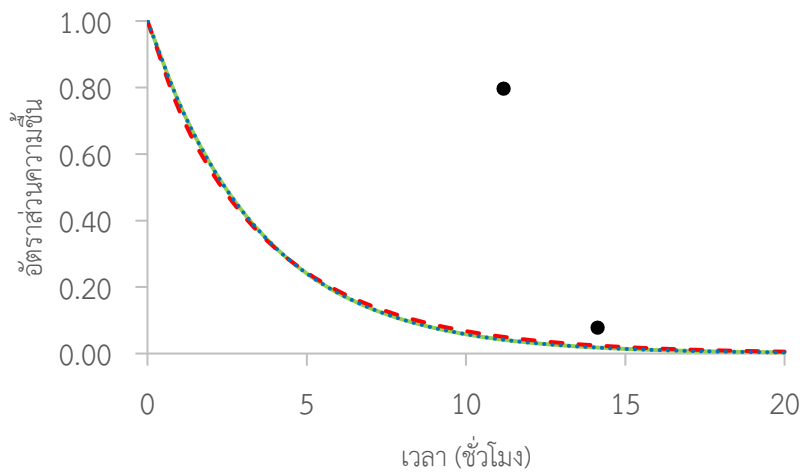
นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์หาสมการทำแห้งชั้นบาง (thin layer) ที่เหมาะสมในการทำนาย จลนพลศาสตร์การทำแห้งมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง โดยการนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือค่าคงที่ของสมการทำแห้งชั้นบางโดยใช้ สมการลิวอิส (Lewis) เพจ (Page) และ โมดิฟายด์เพจ (Modified Page) โดยค่าทางสถิติที่ได้จากการสร้างสมการทำแห้ง มะม่วงแช่อิ่มอบแห้งแบบชั้นบางด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการการทำแห้งมะม่วงแช่อิ่ม อบแห้งที่เลือกมาทำนายลักษณะการทำแห้งของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่เหมาะสม จะพิจารณาจาก สมการที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) สูงที่สุด และ ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (root mean square error, RMSE) ต่ำ ที่สุด ซึ่งค่า RMSE เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณค่าความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จาก การทดลองกับอัตราส่วนความชื้นที่ประมาณได้จากสมการทำแห้งชั้นบาง และเกณฑ์การคัดเลือกตัว แบบโดยใช้เกณฑ์ข้อสนเทศของอาไคเคะ (Akaike's Information Criterion, AIC) ซึ่งได้ค่าการสร้าง การประมาณความแปรปรวนของข้อสนเทศคูลส์-ไลท์เบอร์ (Kullback-Leibler Information) ระหว่างตัวแบบจริงกับตัวแบบที่เหมาะสมที่มีคุณสมบัติไม่เอนเอียง โดยคัดเลือกให้มีค่าเอไอซีมีค่าต่ำ ซึ่งจากการทดลองพบว่าสมการ Page มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งของ มะม่วงแช่อิ่มอบแห้งในชั้นมะม่วงชุดควบคุม ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าทำแห้งที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ได้ดีที่สุด ส่วนชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วพบว่าสมการลิว อิสสามารถทำนายได้ดีที่สุด ซึ่งส่งผลให้ค่า R^2 ที่สูงที่สุด ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด และค่าเอไอซีต่ำที่สุด ส่วนมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ทำแห้งอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทั้ง 3 สภาวะ พบว่าสมการ Page มี ความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งได้ดีที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยพิจารณาจากค่า R^2 ในช่วง 0.9960-0.9999 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากสมการของ Lewis และ สมการ Modified Page โดยให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด และมีค่าเอไอซีต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง สมการของ Lewis และสมการของ Modified Page แสดงดังตารางที่ 9 มีความสอดคล้องกับ Dandamrongrak และคณะ (2002) รายงานว่าสมการของ Page ทำนายปริมาณความชื้นใกล้เคียง กับค่าทดลองสำหรับการเตรียมตัวอย่างทั้งหมดในการทำแห้งกล้วย ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณ จากสมการ Lewis สมการ Page และสมการ Modified Page เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แสดงดังภาพที่ 17 (ก) - 17 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 16 ตัวอย่างอัตราส่วนความขึ้นของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิการทำแห้ง 60 องศาเซลเซียสโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ก) ตัวอย่างควบคุม (ข) ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า และ (ค) ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

4.4 ผลของการแช่เยือกแข็งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง

4.4.1 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้

การศึกษาคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งพบว่าอุณหภูมิในการทำแห้งมะม่วงแช่อิ่มมีผลต่อเวลาในการทำแห้ง ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การทำแห้งในแต่ละสภาวะจะสามารถลดปริมาณความชื้นและมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วงปลอดภัยต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในระหว่างการเก็บรักษา โดยมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ต่ำกว่า 0.65 ดังตารางที่ 10 โดยเวลาที่ใช้ทำแห้งมะม่วงแช่อิ่มพบว่าเมื่อทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้งมะม่วงแช่อิ่ม โดยใช้ระยะเวลาการทำแห้งทั้ง 3 สภาวะน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาการทำแห้งมากที่สุดในตัวอย่างควบคุม ซึ่งใช้เวลาในการทำแห้ง 38 ชั่วโมง โดยพบว่าตัวอย่างที่มีการเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้ง โดยการแช่เยือกแข็งแบบช้าและการแช่เยือกแข็งแบบเร็วส่งผลให้ช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้งลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างโดยการแช่เยือกแข็งส่งผลให้เซลล์ถูกทำลาย เมื่อทำแห้งจึงส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากชิ้นตัวอย่างได้ง่ายขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาการทำแห้งแครอทและการทำแห้งพริกที่เตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้ง (Ade-Omowaye และคณะ, 2003; Arévalo-Pinedo และ Xidieh Murr, 2007)

ตารางที่ 9 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของชิ้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างที่แตกต่างกัน ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สภาวะ	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)	ปริมาณความชื้น (%)	ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้
50	ชิ้นมะม่วงชุดควบคุม	38	18.66±0.81 ^{bc}	0.56±0.01 ^d
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	28	17.68±0.90 ^c	0.58±0.00 ^{cd}
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	32	17.28±0.61 ^c	0.59±0.01 ^{bc}
60	ชิ้นมะม่วงชุดควบคุม	19	20.68±1.65 ^a	0.57±0.01 ^{cd}
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	16	20.55±0.88 ^{ab}	0.61±0.01 ^a
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	18	20.09±1.26 ^{ab}	0.60±0.01 ^{ab}

^{a, b} และ ^c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

เมื่อทำการศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง โดยเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และแช่เยือกแข็งแบบเร็วที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน นำมาแช่ในสารละลายออสโมติกและทำการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส โดยทำการกำหนดระยะเวลาในการอบแห้งในชั้นมะม่วงชุดควบคุมใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 19 ชั่วโมง ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 16 ชั่วโมง และชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 18 ชั่วโมง พบว่าปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ในทุกสภาวะมีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ 11 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 0.55-0.61 ซึ่งอยู่ในช่วงปลอดภัยต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในระหว่างการเก็บรักษาโดยมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ 0.65 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของมะม่วงอบแห้ง (Korbel และคณะ, 2013) ส่วนปริมาณความชื้นพบว่ามีค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 18.68-20.68 โดยพบว่าตัวอย่างควบคุมมีปริมาณความชื้นสูงที่สุด และใช้เวลาในการทำแห้งมากที่สุด เท่ากับ 19 ชั่วโมง ส่วนชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและทำการเก็บรักษาไว้ในสภาวะการแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน มีปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่า ซึ่งการแช่เยือกแข็งส่งผลให้ออบแห้งได้เร็วขึ้น จลนพลศาสตร์ในการอบแห้งสูงขึ้นและเวลาในการอบแห้งเร็วขึ้น เนื่องจากการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้งเป็นขั้นตอนที่ทำให้เซลล์ถูกทำลาย จึงช่วยให้สามารถจัดความชื้นได้ง่ายขึ้นในระหว่างการอบแห้ง (Arévalo-Pinedo และ Xidieh Murr, 2007) และ Syamaladevi และคณะ (2012) กล่าวว่าเมื่อทำการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลาที่นานขึ้นส่งผลให้มีอัตราการเพิ่มขึ้นของผลึกน้ำแข็ง โดยผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นและจำนวนผลึกน้ำแข็งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การแช่เยือกแข็งโดยไม่ทำการเก็บรักษา จึงช่วยส่งเสริมให้โครงสร้างภายในเซลล์ถูกทำลายมากขึ้นและส่งผลให้มีเกิดการอัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้งเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 10 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของขึ้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างที่ต่างกันและทำการเก็บรักษาระยะเวลาที่ต่างกัน

สภาวะ	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)	ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)	ปริมาณความชื้น (%)	ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้
ขึ้นมะม่วงชุดควบคุม	19		20.68±1.65 ^a	0.57±0.01 ^b
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	16		20.55±0.88 ^{ab}	0.61±0.01 ^a
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	18		20.09±1.26 ^{ab}	0.60±0.01 ^a
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	16	1	18.74±0.73 ^b	0.58±0.01 ^b
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	18		18.68±0.40 ^b	0.58±0.01 ^b
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	16	2	19.87±1.20 ^{ab}	0.58±0.00 ^b
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	18		19.02±1.00 ^{ab}	0.55±0.00 ^c

^{a, b} และ ^c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน



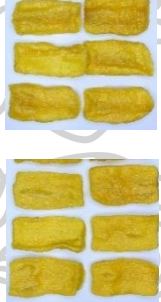
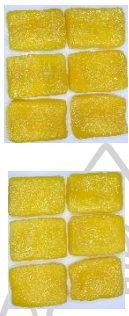



4.4.2 ลักษณะปรากฏและค่าสี

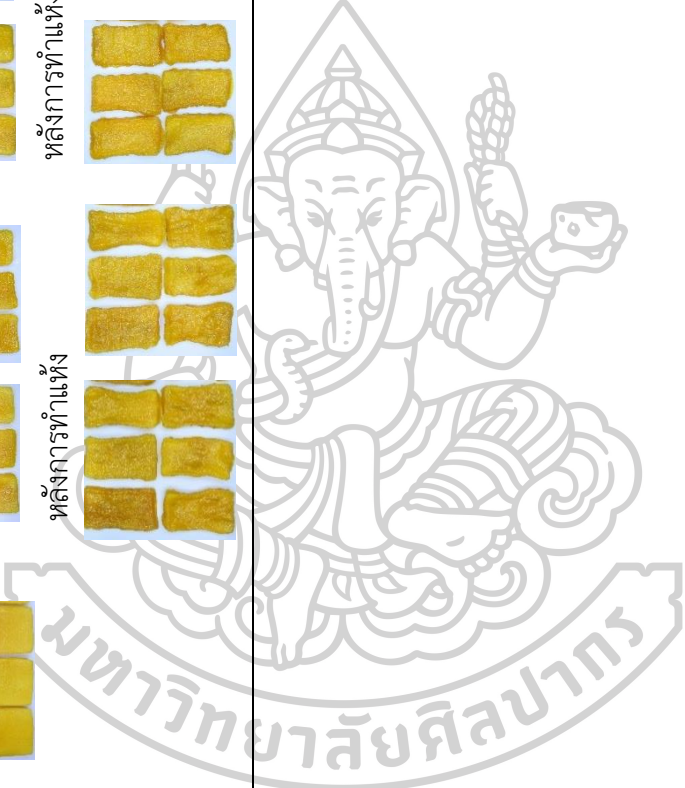
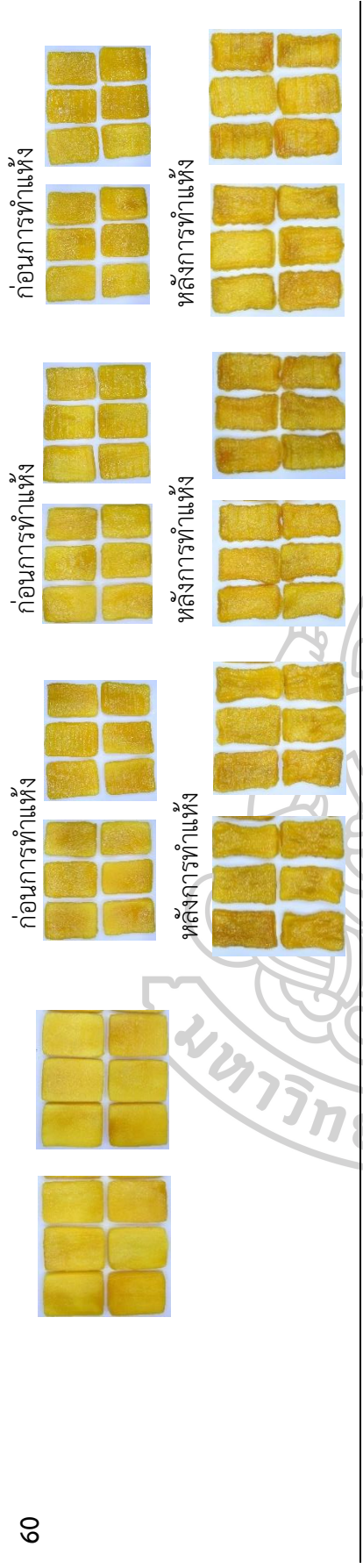
ลักษณะปรากฏของขึ้นมะม่วงสด ขึ้นมะม่วงก่อนการอบแห้งและขึ้นมะม่วงหลังการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ของขึ้นมะม่วงชุดควบคุม ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าและการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว แสดงดังตารางที่ 12 พบว่าตัวอย่างมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีสีใกล้เคียงกับของสดแลพใกล้เคียงกับขึ้นมะม่วงก่อนการทำแห้งมากกว่าขึ้นมะม่วงหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าอุณหภูมิ สภาวะในการเตรียมตัวอย่าง และปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและสภาวะในการเตรียมตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อค่า b^* และ Chroma ของผลิตภัณฑ์มะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 13 ทั้งขึ้นเนื้อมะม่วงด้านที่ติดเปลือกและด้านที่ติดเมล็ดซึ่ง b^* ในทิศทางบวกแสดงความเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์ และ Chroma แสดงถึงความอิ่มตัวของสี แต่พบว่ามีค่า L^* , a^* และค่า hue angle มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่ง L^* แสดงความสว่างของผลิตภัณฑ์ a^* ในทิศทางบวกแสดงความเป็นสีแดง และค่า hue angle แสดงตำแหน่งของสี โดยพบว่า การเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งแบบช้าและทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีค่า L^* ความสว่าง และค่า hue angle ของมะม่วงแช่อบแห้งทั้งด้านที่ติดเปลือกและด้านที่ติดเมล็ดสูงที่สุดเป็น 57.47 ± 3.91 และ 57.54 ± 3.60 ตามลำดับ และค่า hue angle เป็น 75.93 ± 1.77 และ 75.65 ± 2.26 ตามลำดับ ส่วนค่า a^* มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 14.75 ± 1.68 และ 14.81 ± 2.12 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะในการเตรียมตัวอย่างการทำแห้งที่อุณหภูมิเดียวกันและทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าสีในผลไม้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างการแช่แข็ง ทำให้ไลโซโซมและแควิวโอลถูกทำลาย แต่เมื่อมีการเตรียมตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็งโดยการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ โดยมีการเติมกรดซิตริก หรือมีการตัดขวางขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา โดยการเติมกรดแอสคอร์บิก จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีของผลไม้แช่แข็งได้ (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558) เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพต่อการทำแห้ง โดยการแช่เยือกแข็งแบบช้าส่งผลให้มีปริมาณผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ส่งผลให้เซลล์ของตัวอย่างถูกทำลาย (Fell, 2016) ในการทำแห้งช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำแห้งอยู่ในช่วง 50-70 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหม้ของน้ำตาล (ภัทรพร, 2541) และเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำแห้งมะม่วงที่ปราศจากการใส่สารซัลไฟต์และสารกันบูด (Akoy, 2014; Pott และคณะ, 2005) ซึ่งมีรายงานว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้มีผลิตภัณฑ์ที่มีสีเข้มขึ้น ส่งผลให้ค่าความสว่างลดลง ค่าสีเหลืองลดลง และมีค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้ง (Akoy, 2014)

เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพด้านสีของมะม่วงแช่อบแห้งที่ได้จากแต่ละสภาวะของมะม่วงก่อนการทำแห้งกับมะม่วงหลังการทำแห้ง โดยแสดงเป็นค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด (Total color different; ΔE) พบว่า อุณหภูมิและสภาวะในการเตรียมตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อค่า ΔE ของชั้นมะม่วงด้านที่ติดเปลือก โดยสภาวะการทำแห้งที่ให้ค่า ΔE สูงที่สุดคือสภาวะที่มีการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (QF) ทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ชั้นเนื้อมะม่วงด้านที่ติดเปลือกมีค่าเท่ากับ 13.36 ± 3.07 แสดงดังภาพที่ 17 และค่า ΔE ของชั้นมะม่วงด้านที่ติดเมล็ดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) พบว่าค่าความแตกต่างของสีทั้งหมดของชั้นมะม่วงสภาวะที่มีการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (QF) ทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 14.88 ± 5.39

ตารางที่ 11 ลักษณะปรากฏของชิ้นเนือมะม่วงสดและมะม่วงก่อนและหลังการทำแห้งที่ได้จากการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ผ่านการเตรียมตัวอย่างที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)	ลักษณะปรากฏ	ตัวอย่างสด (เริ่มต้น)	ชิ้นมะม่วงชุดควบคุม	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว
50			<p data-bbox="655 1070 687 1245">ก่อนการทำแห้ง</p>  <p data-bbox="836 1077 868 1245">หลังการทำแห้ง</p> 	<p data-bbox="655 707 687 882">ก่อนการทำแห้ง</p>  <p data-bbox="836 719 868 887">หลังการทำแห้ง</p> 	<p data-bbox="655 342 687 517">ก่อนการทำแห้ง</p>  

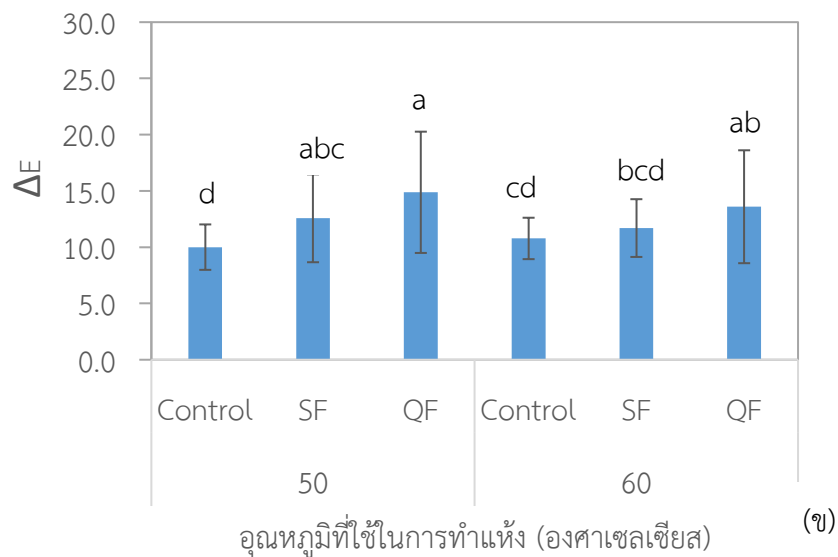
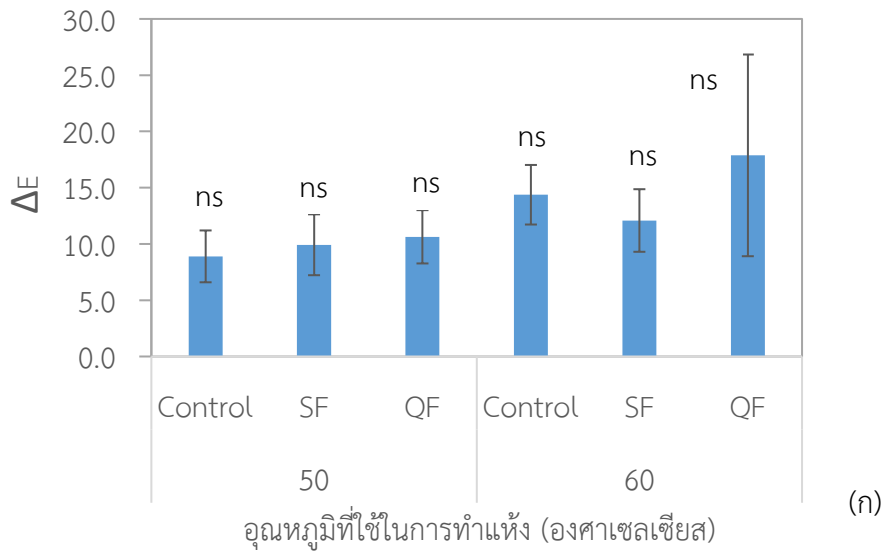


ตารางที่ 12 คุณภาพด้านสีของชิ้นเนื้อมะม่วงแช่อบแห้งที่ได้จากการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ผ่านการเตรียมตัวอย่างที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ด้านหน้า (ด้านติดเปลือก)			ด้านหลัง (ด้านติดเมล็ด)							
	L*	a*	b* ^{ns}	Chroma ^{ns}	Hue	L*	a*	b* ^{ns}	Chroma ^{ns}	Hue	
50	ขึ้นมะม่วงชุด ควบคุม	57.06±3.83 ^a	15.97±1.77 ^b	56.72±4.18	58.95±4.15	74.24±1.81 ^{ab}	55.53±3.92 ^{ab}	16.51±2.02 ^{bc}	54.07±4.33	56.58±4.19	72.94±2.30 ^{ab}
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการ แช่เยือกแข็งแบบช้า	57.47±3.91 ^a	14.75±1.68 ^b	59.06±3.80	60.90±3.71	75.93±1.77 ^a	57.54±3.60 ^a	14.81±2.12 ^c	58.17±4.26	60.07±4.12	75.65±2.26 ^a
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการ แช่เยือกแข็งแบบเร็ว	49.95±3.95 ^b	16.79±1.63 ^b	53.60±5.81	56.18±5.87	72.54±1.39 ^{abc}	51.30±4.74 ^c	17.77±1.30 ^{ab}	54.06±8.11	56.94±7.95	71.55±2.11 ^{ab}
60	ขึ้นมะม่วงชุดควบคุม	53.31±3.62 ^{ab}	20.04±2.29 ^a	53.35±6.25	57.02±6.39	69.34±1.84 ^{bc}	52.60±2.40 ^{bc}	19.19±2.14 ^a	50.80±3.67	54.35±3.61	69.27±2.38 ^b
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการ แช่เยือกแข็งแบบช้า	53.76±3.32 ^{ab}	19.30±1.78 ^a	58.47±8.99	61.64±8.67	71.42±2.78 ^{abc}	53.10±3.38 ^{bc}	18.82±2.17 ^{ab}	55.95±6.76	59.11±6.42	71.20±2.96 ^{ab}
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการ แช่เยือกแข็งแบบเร็ว	50.96±5.71 ^{ab}	19.21±2.86 ^a	49.61±9.15	53.35±8.70	68.30±4.69 ^c	51.64±5.11 ^c	19.21±2.30 ^a	50.99±9.07	54.65±8.32	68.80±4.68 ^b

^{a, b} และ ^c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน



ภาพที่ 17 ผลของความแตกต่างของอุณหภูมิและสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดต่อค่า ΔE ในชิ้นเนื้อมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งเปรียบเทียบตัวอย่างก่อนการทำแห้งและหลังการทำแห้ง (ก) ด้านติดเปลือก และ (ข) ด้านติดเมล็ด

^{a, b, c} และ ^d หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสภาวะ

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสภาวะ



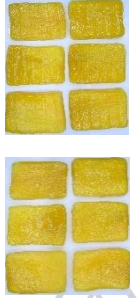
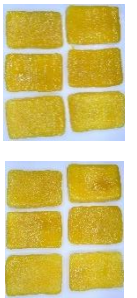


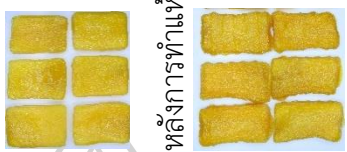

เมื่อทำการศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง โดยทำเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และแช่เยือกแข็งแบบเร็วที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน นำมาแช่ในสารละลายออสโมติกและทำการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 1 เดือนและ 2 เดือนมีลักษณะปรากฏมีสีเหลืองสว่างกว่าตัวอย่างสถานะที่ไม่ได้เก็บรักษา ดังตารางที่ 14 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงด้านสีที่เห็นในลักษณะปรากฏมีค่าสีที่สว่างขึ้นเนื่องจากการแช่เยือกแข็งช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของสีได้เมื่อก่อนการแช่เยือกแข็งมีการเติมกรดซิตริกเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าสี ค่า L^* , a^* และค่า hue angle มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ 16 ซึ่ง L^* ความสว่างของสี แสดงค่าสีขึ้นมะม่วงพบว่ามีค่า L^* ด้านที่ติดเปลือกและด้านที่ติดเมล็ดของตัวอย่างที่เก็บรักษา 1 เดือนและ 2 เดือนอยู่ในช่วง 54.03 ถึง 54.74 และ 53.83 ถึง 55.75 ตามลำดับ ค่า a^* ในทิศทางบวก แสดงความเป็นสีแดง พบค่าด้านที่ติดเปลือกและด้านที่ติดเมล็ดของตัวอย่างอยู่ในช่วง 14.81 ถึง 15.21 และ 15.88 ถึง 17.41 ตามลำดับ และค่า hue angle ด้านที่ติดเปลือกและด้านที่ติดเมล็ดของตัวอย่างอยู่ในช่วง 74.37 ถึง 75.18 และ 72.24 ถึง 73.58 ตามลำดับ และเห็นว่าสถานะในการเตรียมตัวอย่าง ระยะเวลาในการเก็บรักษา และปัจจัยร่วมระหว่างสถานะในการเตรียมตัวอย่างและระยะเวลาในการเก็บรักษา ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อค่า b^* และ Chroma ของผลิตภัณฑ์มะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่สถานะต่างๆ ซึ่งค่า b^* ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสว่างและความเป็นสีเหลืองของตัวอย่าง พบว่ามีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งและตัวอย่างที่เตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งแต่ไม่ได้ทำการเก็บรักษา เนื่องจากการแช่เยือกแข็งช่วยรักษาสีของขึ้นมะม่วง เช่นเดียวกับการศึกษาการแช่เยือกแข็งผลสตอเบอร์รี่ เนื่องจากการแช่เยือกแข็งในช่วงเวลาที่มีการเก็บรักษามีการตกผลึกน้ำและการย่อยสลายของเม็ดสีที่เกิดขึ้นส่งผลให้ค่า L^* , a^* และ b^* มีค่าใกล้เคียงกับค่าสีของผลไม้สด ในการแช่เยือกแข็งสตอเบอร์รี่ที่มีการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 4 เดือนช่วยรักษาค่าสีของผลสตอเบอร์รี่ (Ergün และคณะ, 2020) เช่นเดียวกับการศึกษาการแช่เยือกแข็งแบบเร็วในผลเชอร์รี่มีค่าความสว่างสูงกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้า (Rayman ErgÜN และคณะ, 2020)

เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพด้านสีของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ได้จากแต่ละสถานะในการเปรียบเทียบขึ้นมะม่วงก่อนการทำแห้งกับหลังการทำแห้ง โดยแสดงเป็นค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด (Total color different; ΔE) พบว่า สถานะในการเตรียมตัวอย่างและระยะเวลาในการเก็บรักษาของขึ้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งทางด้านที่ติดเปลือกไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อค่า ΔE ส่วนทางด้านที่ติดเมล็ดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อค่า ΔE โดยสถานะที่ให้ค่า ΔE สูงที่สุดคือสถานะที่มีขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า (SF) ที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (QF) เป็นระยะเวลา 2 เดือน มีค่าเท่ากับ 15.11 ± 2.83 และ 15.08 ± 2.47 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 18 และพบว่าการเก็บรักษาตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 1 และ 2 เดือน ช่วยรักษาค่าความแตกต่างของสีให้มีความแตกต่างที่น้อย ทั้งนี้เนื่องจากการแช่เยือกแข็งช่วยรักษาสีของขึ้นมะม่วงเนื่องจากก่อนแช่

เยือกแข็งได้มีการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ โดยการเติมกรดซิตริกเพื่อขัดขวางขั้นตอนการทำงานของปฏิกิริยาเอนไซม์และมีการปรับค่าพีเอชของชั้นมะม่วงต่ำกว่าช่วงพีเอชที่เกิดขึ้นได้ดีของเอนไซม์ที่ช่วงพีเอช 6.0-6.5



ตารางที่ 13 ลักษณะปรากฏของชิ้นเนื้อมะม่วงสดชิ้นมะม่วงก่อนและหลังการทำแห้งของชิ้นมะม่วงที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน และทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)	ลักษณะปรากฏ	ตัวอย่างสด	ชิ้นมะม่วงชุดควบคุม	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว
			<p data-bbox="655 1010 687 1182">ก่อนการทำแห้ง</p> 	<p data-bbox="655 607 687 779">ก่อนการทำแห้ง</p> 	<p data-bbox="655 215 687 387">ก่อนการทำแห้ง</p> 
			<p data-bbox="855 1010 887 1182">หลังการทำแห้ง</p> 	<p data-bbox="855 607 887 779">หลังการทำแห้ง</p> 	<p data-bbox="855 215 887 387">หลังการทำแห้ง</p> 

ลักษณะปรากฏ

ระยะเวลาการเก็บ

รักษา (เดือน)

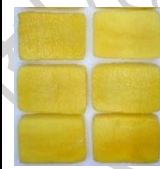
ตัวอย่างสด

ขึ้นมะม่วงชุดควบคุม

ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่
เยือกแข็งแบบช้า

ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่
เยือกแข็งแบบเร็ว

1



ก่อนการทำแห้ง



หลังการทำแห้ง



ก่อนการทำแห้ง



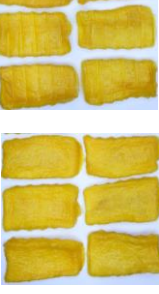
หลังการทำแห้ง



ก่อนการทำแห้ง



หลังการทำแห้ง



2



ก่อนการทำแห้ง



หลังการทำแห้ง



ก่อนการทำแห้ง



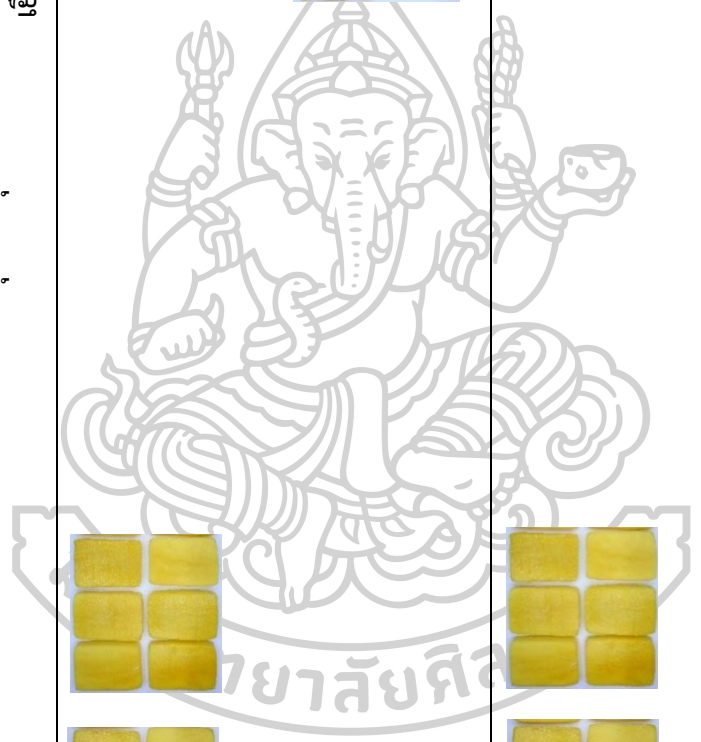
หลังการทำแห้ง



ก่อนการทำแห้ง



หลังการทำแห้ง



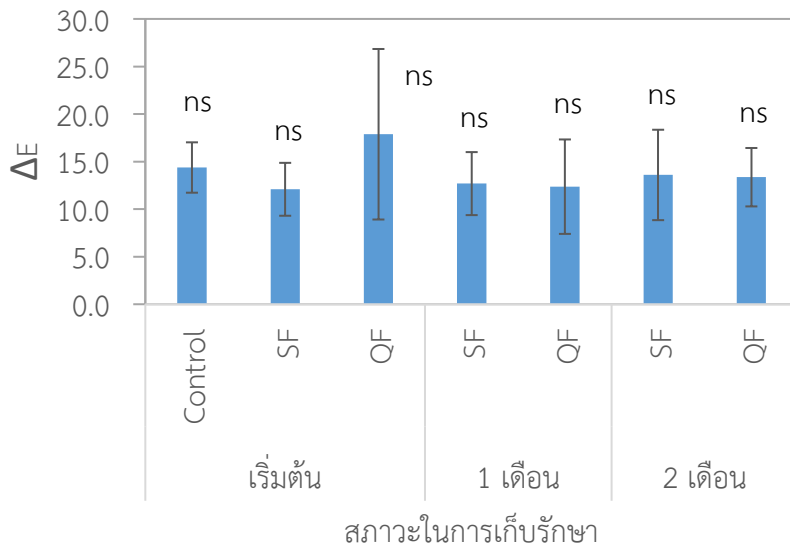
ตารางที่ 14 คุณภาพด้านสีของชิ้นเนือมะม่วงแช่ร้อนอบแห้งที่ตัวอย่างควบคุมและชิ้นมะม่วงที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน และทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

สภาวะ	ด้านหน้า (ด้านติดเปลือก)				ด้านหลัง (ด้านติดเมล็ด)					
	L*	a*	b* ^{ns}	Chroma ^{ns} Hue	L*	a*	b* ^{ns}	Chroma ^{ns} Hue		
ชิ้นมะม่วงชุดควบคุม	53.31±3.62	20.04±2.29 ^a	53.35±6.25	57.02±6.39	69.34±1.84 ^{bc}	52.60±2.40	19.19±2.14 ^a	50.80±3.67	54.35±3.61	69.27±2.38 ^b
ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	53.76±3.32	19.30±1.78 ^a	58.47±8.99	61.64±8.67	71.42±2.78 ^b	53.10±3.38	18.82±2.17 ^a	55.95±6.76	59.11±6.42	71.20±2.96 ^{ab}
ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	50.96±5.71	19.21±2.86 ^a	49.61±9.15	53.35±8.70	68.30±4.69 ^c	51.64±5.11	19.21±2.30 ^a	50.99±9.07	54.65±8.32	68.80±4.68 ^b
ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	54.74±4.74	15.21±2.36 ^b	56.79±5.04	58.83±5.17	75.00±2.07 ^a	53.83±4.29	17.09±1.98 ^{ab}	53.70±6.25	56.39±6.24	72.24±2.12 ^a
ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	54.37±5.50	15.20±2.79 ^b	57.66±6.96	59.68±7.09	75.18±2.41 ^a	54.21±4.07	17.41±2.49 ^{ab}	55.34±5.54	58.03±5.82	72.56±1.75 ^a

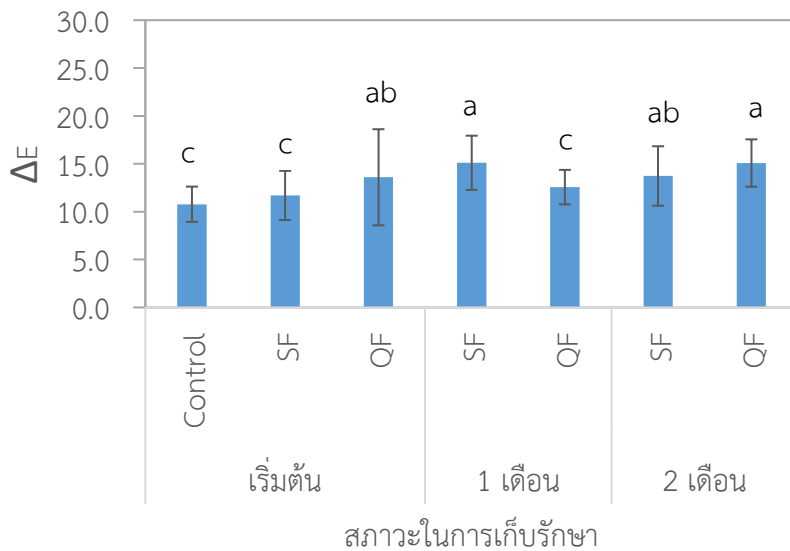
สภาวะ	ด้านหน้า (ด้านติดเปลือก)			ด้านหลัง (ด้านติดเมล็ด)						
	L*	a*	b* ^{ns}	Chroma ^{ns}	Hue	L*	a*	b* ^{ns}	Chroma ^{ns}	Hue
ชั้นมะม่วงที่ผ่าน การแช่เยือกแข็ง แบบช้า	54.03±4.58	15.03±1.56 ^b	55.35±5.45	57.38±5.42	74.72±1.76 ^a	54.88±3.92	16.37±1.61 ^b	55.76±5.52	58.14±5.52	73.58±1.60 ^a
ชั้นมะม่วงที่ผ่าน การแช่เยือกแข็ง แบบเร็ว	54.42±5.18	14.81±2.55 ^b	53.01±6.85	55.08±7.01	74.37±2.15 ^a	55.75±4.58	15.88±2.99 ^b	53.33±6.52	55.68±6.82	73.44±2.26 ^a

a, b และ ^c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน



(ก)



(ข)

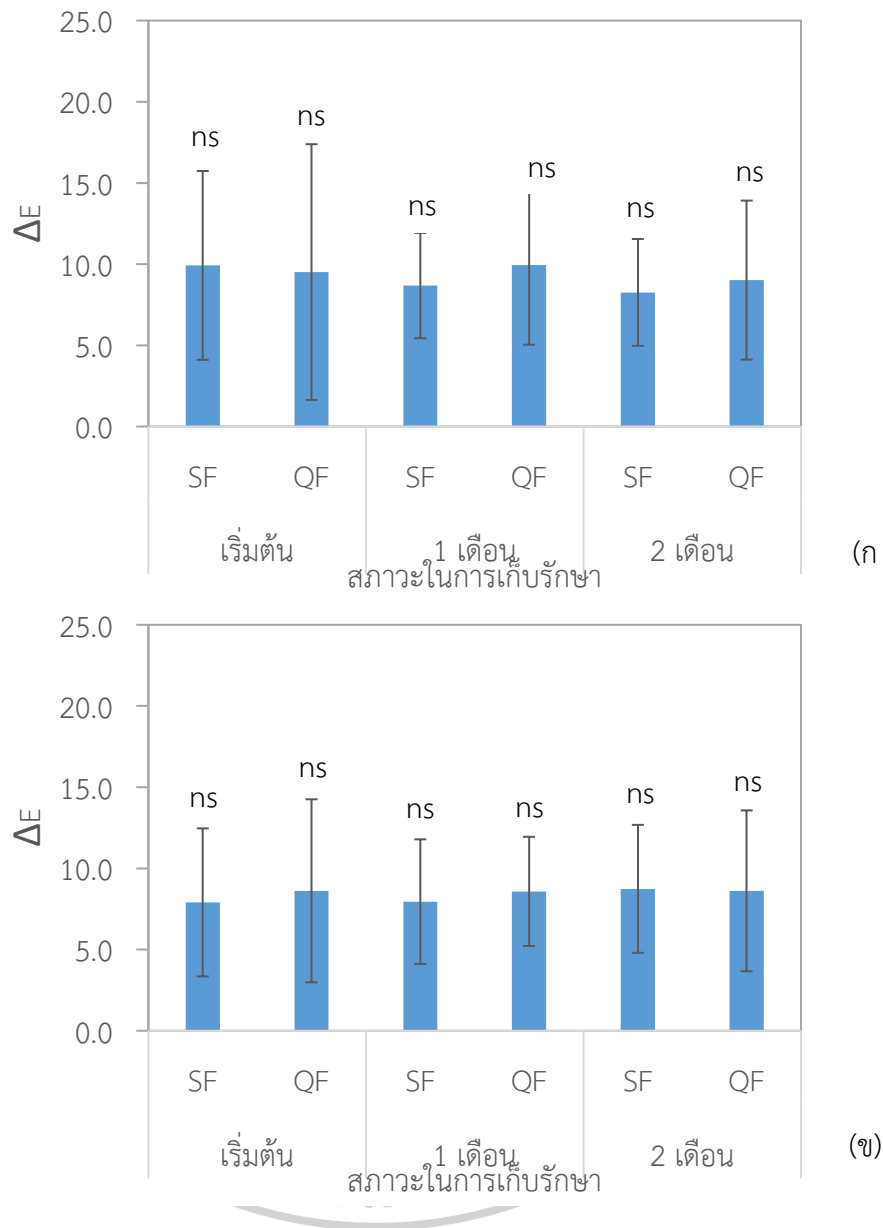
ภาพที่ 18 ผลของสถานะในการเก็บรักษาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสต่อค่า ΔE ในมะม่วงแช่อบแห้งเปรียบเทียบขึ้นมะม่วงก่อนการทำแห้งกับหลังการทำแห้ง (ก) ด้านติดเปลือก และ (ข) ด้านติดเมล็ด

^{a, b} และ ^c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสถานะ

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสถานะ

ในการศึกษาคุณภาพด้านสีของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ได้จากแต่ละสภาวะในการเปรียบเทียบ ขึ้นมะม่วงชุดควบคุมกับขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่สภาวะในการเก็บรักษาในการแช่เยือกแข็ง ที่ระยะเวลาต่างกัน โดยแสดงเป็นค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด (Total color different; ΔE) พบว่า ขึ้นมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งทั้งด้านที่ติดเปลือกและด้านที่ติดเมล็ดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติ ($p \leq 0.05$) ดังภาพที่ 19 แสดงว่าการเตรียมขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแบบช้าและแบบเร็ว ทั้งที่ไม่ได้เก็บรักษาและทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 และ 2 เดือน มีค่าที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการ แช่เยือกแข็งเป็นวิธีหนึ่งที่ยืดอายุการเก็บรักษาและป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าสีได้ เมื่อมีการ เตรียมขึ้นมะม่วงก่อนการแช่เยือกแข็งโดยการเติมกรดซิตริก (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558)





ภาพที่ 19 ผลของสภาวะในการเก็บรักษาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสต่อค่า ΔE ในมะม่วงแช่อบแห้งเปรียบเทียบขึ้นมะม่วงชุดควบคุมและขึ้นมะม่วงที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็ง (ก) ด้านติดเปลือก และ (ข) ด้านติดเมล็ด

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสภาวะ

4.4.3 ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (Browning Index)

ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลของอาหารเกิดจากการที่เซลล์ถูกทำลาย กรณีการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาสำคัญที่พบมากในผลไม้ และทำให้ผลไม้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและทำละลายมีสีน้ำตาลเกิดขึ้น ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์เป็นปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดจากสารประกอบฟีนอลทำปฏิกริยากับออกซิเจน โดยมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) เป็นตัวเร่งผลที่ได้จากปฏิกริยาพอลิเมอร์สีน้ำตาล เอนไซม์นี้มีมากในผักและผลไม้สด แต่จะหยุดกิจกรรมไปเมื่อผลไม้อยู่ในสภาพแช่เยือกแข็ง ในสภาพนี้เอนไซม์อาจมีกิจกรรมของเอนไซม์ลดลงบางส่วน ในการแช่เยือกแข็งผลไม้ส่วนใหญ่จะมีแนวทางในการลดการเกิดสีน้ำตาลโดยการใช้กรดแอสคอร์บิก เพื่อไปรีดิวซ์สารประกอบฟีนอลที่ผ่านการออกซิไดส์ให้กลับคืนสภาพเป็นสารประกอบฟีนอลอีกครั้ง หรือการใช้กรดซิตริกเพื่อปรับค่าพีเอชให้อยู่ในระดับที่ไม่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ตัวนี้ เพื่อชะลอการทำงานของเอนไซม์และป้องกันสารประกอบฟีนอลสัมผัสกับแก๊สออกซิเจน ในตัวอย่างขึ้นมะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก มีค่าพีเอชของสารละลายออสโมติกเท่ากับ 2.5 ± 0.18 ในการศึกษาในตัวอย่างมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่อิมอบแห้ง และตัวอย่างมะม่วงแช่อิมอบแห้ง พบว่าในตัวอย่างมะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติกของขึ้นมะม่วงชุดควบคุมที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลมากที่สุด เท่ากับ 0.593 OD/g DW ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงตารางที่ 16 เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่นๆ และการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และพบว่าตัวอย่างมะม่วงแช่อิมอบแห้งของขึ้นมะม่วงชุดควบคุมที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลมากที่สุดเช่นกัน เท่ากับ 0.463 OD/g DW มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งจะเห็นว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเตรียมตัวด้วยการแช่เยือกแข็งที่สภาวะควบคุมส่งผลให้ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลสูงกว่าสภาวะตัวอย่างที่มีการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษา Chung และคณะ (2013) ในการแช่แข็งส่งผลให้การแช่สารออสโมติกเกิดเร็วขึ้นและลดการสลายตัวของเซลล์ ผลการเกิดปฏิกริยาสีน้ำตาลพบว่าผลไม้ที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งจะเกิดสีน้ำตาลมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการแช่ที่นานขึ้น ส่วนการเกิดปฏิกริยาสีน้ำตาลในน้ำสกัดที่สกัดด้วยออสโมติกลดเกิดปฏิกริยาสีน้ำตาลลงได้เมื่อระยะเวลาการสกัดสั้นลง โดยทำการแช่เยือกแข็งเพื่อปรับสภาพ โดยการแช่เยือกแข็งก่อนการสกัดด้วยสารละลายออสโมติกส่งผลให้เกิดปฏิกริยาสีน้ำตาลลดลง และจากการศึกษาของ Akoy (2014) พบว่าค่าความสว่างลดลงอาจเป็นผลมาจากการสร้างเม็ดสีน้ำตาลระหว่างการทำให้แห้ง เป็นที่ชัดเจนว่าสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 15 ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สถานะ	ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (OD/g DW)		
		ตัวอย่างสด	หลังกระบวนการแช่ออสโมติก	ตัวอย่างแห้ง
50	ขึ้นมะม่วงชุด	0.274±0.03 ^b	0.281±0.04 ^c	0.335±0.05 ^b
	ควบคุม			
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง		0.305±0.12 ^{bc}	0.182±0.06 ^d
	แบบช้า			
60	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง		0.356±0.14 ^{bc}	0.200±0.01 ^d
	แบบเร็ว			
	ขึ้นมะม่วงชุด	0.385±0.03 ^a	0.593±0.02 ^a	0.463±0.03 ^a
	ควบคุม			
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง		0.470±0.19 ^{ab}	0.270±0.03 ^c
	แบบช้า			
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง		0.289±0.11 ^c	0.266±0.02 ^c
	แบบเร็ว			

^{a, b} และ ^c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

สำหรับการศึกษาการทำแห้งที่สถานะการเก็บรักษาตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และ -40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน นำมาแช่ในสารละลายออสโมติกและทำการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส พบว่าในตัวอย่างแห้งสถานะควบคุมที่ไม่ได้ทำการเก็บรักษามีค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลมากที่สุด ดังแสดงตารางที่ 17 เมื่อเปรียบเทียบกับสถานะอื่นๆ ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วที่ทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือนมีค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลที่ต่ำ ทั้งในตัวอย่างมะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติกและตัวอย่างมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษา Chung และคณะ (2013) ในการแช่แข็งส่งผลให้การแช่สารออสโมติกเกิดเร็วขึ้นและลดการสลายตัวของเซลล์ ผลการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลพบว่าผลไม้ที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งจะเกิดสีน้ำตาลมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการแช่ที่นานขึ้น ส่วนการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในน้ำสกัดที่สกัดด้วยออสโมติกลดเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลลงได้เมื่อระยะเวลาการสกัดสั้นลง โดยทำการแช่

เยือกแข็งเพื่อปรับสภาพ โดยการแช่เยือกแข็งก่อนการสกัดด้วยสารละลายออสโมติกส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลลดลง

ตารางที่ 16 ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งของตัวอย่างควบคุมและเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน

สภาวะ	ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)	ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (OD/g DW)		
		ตัวอย่างสด	หลังกระบวนการแช่ออสโมติก	ตัวอย่างแห้ง
ขึ้นมะม่วงชุดควบคุม		0.385±0.03 ^a	0.593±0.02 ^a	0.463±0.03 ^a
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า			0.470±0.19 ^{ab}	0.270±0.03 ^b
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว			0.289±0.11 ^{bc}	0.266±0.02 ^b
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	1	0.280±0.04 ^b	0.230±0.00 ^c	0.199±0.00 ^c
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว			0.221±0.05 ^c	0.218±0.01 ^c
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	2	0.280±0.04	0.171±0.01 ^c	0.204±0.01 ^c
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว			0.174±0.02 ^c	0.218±0.01 ^c

^{a, b} และ ^c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.4.4 การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenol oxidase (PPO activity)

การเกิดสีน้ำตาลจากการทำงานของเอนไซม์เป็นผลมาจากเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol Oxidase: PPO) ภายในเซลล์ของผลไม้มีโอกาสสัมผัส และทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลิก ปริมาณสาร PPO ในตัวอย่างของมะม่วงสดมีปริมาณที่สูงเนื่องจาก เอนไซม์ PPO มีในพืชเป็นปกติ แต่เมื่อทำการวัดกิจกรรมของเอนไซม์ PPO หลังกระบวนการแช่ออสโมติกของทุกผลการทดลอง พบว่าปริมาณเอนไซม์ PPO มีปริมาณลดลง ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 19 เนื่องจากได้ทำการเตรียมตัวอย่างก่อนการแช่ในสารละลายออสโมติก โดยใส่กรดซิตริกร้อยละ 1 ซึ่งเป็นสารยับยั้งการเกิดกิจกรรมเอนไซม์ PPO ได้ เช่นเดียวกับ

สมฤดี ไทพาณิชย์ และ อิศารัตน์ แยมอาสา (2563) โดยรายงานว่าการใช้กรดซิตริกในช่วงร้อยละ 0.5-1.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสที่สกัดจากเนื้อกล้วยน้ำว้าได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนอุณหภูมิในการอบแห้งส่งผลให้ปริมาณกิจกรรม PPO มีปริมาณลดลงจากของสด แอสคอร์บิก ซึ่งกรดแอสคอร์บิกมีหน้าที่เป็นสารยับยั้งการเกิดเมลานิน ในการเตรียมสารละลายออสโมติกมีการปรับค่าพีเอชของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 2.5 ± 0.18 ซึ่งมีการกล่าวว่าการลดค่าพีเอช เป็นการลดการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้แช่เยือกแข็ง และในการเตรียมสารละลายออสโมติกมีการเติมกรด เนื่องจากเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสทำงานได้ดีที่สุดในช่วง 6.0-6.5 และถูกยับยั้งกิจกรรมที่พีเอชต่ำกว่า 3.0 (สงวนศรี เจริญเหรียญ, 2558) เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบในการทดลองใช้อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมในการเกิดกิจกรรมของเอนไซม์ PPO โดยรายงานว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในเกิดกิจกรรม PPO อยู่ในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมจะส่งผลให้เอนไซม์มีกิจกรรมลดลง โดยความร้อนสามารถยับยั้งการทำงานของ PPO ได้เนื่องจากความร้อนจะทำให้เอนไซม์ซึ่งเป็นโปรตีนเสียสภาพตามธรรมชาติ และไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ เช่นเดียวกับ (Wang และคณะ, 2007) รายงานว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกิจกรรมของเอนไซม์ PPO คืออุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยจะพบว่ากิจกรรม PPO ในเนื้อมะม่วงจะเกิดสูงที่สุด และในที่นี้พบว่าในตัวอย่างแห้งของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งมีปริมาณ PPO ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากสาร PPO จะถูกยับยั้งเกือบทั้งหมดถ้าค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของตัวอย่างมีค่าต่ำกว่า 0.65 (Korbet และคณะ, 2013)



ตารางที่ 17 กิจกรรมของเอนไซม์ PPO ของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และ มะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สถานะ	กิจกรรมของเอนไซม์ PPO (Unit/ 1 g dry matter)		
		ตัวอย่างสด ^{ns}	หลังกระบวนการ แช่ออสโมติก	ตัวอย่างแห้ง
50	ขึ้นมะม่วงสด	132.52±3.94	69.10±8.65 ^{bc}	67.20±4.71 ^c
	ควบคุม			
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่าน การแช่เยือกแข็ง		60.90±4.94 ^c	68.41±3.96 ^c
	แบบซ้ำ			
60	ขึ้นมะม่วงที่ผ่าน การแช่เยือกแข็ง		61.22±0.46 ^{bc}	73.48±0.14 ^{bc}
	แบบเร็ว			
	ขึ้นมะม่วงสด	131.37±11.67	119.52±9.38 ^a	108.95±6.44 ^a
	ควบคุม			
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่าน การแช่เยือกแข็ง		85.18±18.06 ^b	87.61±6.77 ^b
	แบบซ้ำ			
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่าน การแช่เยือกแข็ง		69.02±12.56 ^{bc}	88.79±5.46 ^b
	แบบเร็ว			

^{a, b} และ ^c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

สำหรับการศึกษาการทำแห้งที่สภาวะการเก็บรักษาตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และ -40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน นำมาแช่ในสารละลายออสโมติกและทำการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส และทำการศึกษากิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส พบว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการเก็บรักษาทั้งในตัวอย่างหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และตัวอย่างแห้งมีกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 20 โดยจะพบว่าเมื่อทำการเก็บรักษาด้วยการแช่เยือกแข็งจะเป็นการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสให้มีค่าที่ต่ำกว่าตัวอย่างมะม่วงสดและตัวอย่างมะม่วงที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งและไม่ได้ทำการเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาเกี่ยวกับการแช่เยือกแข็งมะละกอที่ทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 0, 4 และ 8 เดือน พบว่าการเก็บรักษาด้วยการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 8 เดือนช่วย

ยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสมีค่าเท่ากับ 2.56, 2.83 และ 2.2.3 Δ ABS/นาที่/ มิลลิกรัมของเนื้อมะละกอ ตามลำดับ (Brannan และWang, 2017)

ตารางที่ 18 กิจกรรมของเอนไซม์ PPO ของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และ มะม่วงแช่อบแห้ง ของตัวอย่างควบคุมและเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน

สถานะ	ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)	กิจกรรมของเอนไซม์ PPO (Unit/ 1 g dry matter)		
		ตัวอย่างสด ^{ns}	หลังกระบวนการแช่ออสโมติก	ตัวอย่างแห้ง
ชั้นมะม่วงชุดควบคุม		131.37±11.67	119.52±9.38 ^a	108.95±6.44 ^a
ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า			85.18±18.06 ^b	87.61±6.77 ^{bc}
ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว			69.02±12.56 ^b	88.79±5.46 ^b
ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	1	119.29±9.29	59.01±3.86 ^b	71.07±1.23 ^{cd}
ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว			58.90±4.90 ^b	69.10±5.66 ^d
ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	2	119.29±9.29	57.94±4.47 ^b	69.66±4.77 ^d
ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว			61.71±1.43 ^b	73.55±2.55 ^{bcd}

^{a, b, c} และ ^d หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.4.5 ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TPA) เป็นการทดสอบโดยการให้แรงกด (Compression test) ลงบนชิ้นมะม่วงบริเวณตรงกลางชิ้น จำนวน 2 ครั้ง เป็นการจำลองการใช้ฟันบดอาหาร ผลการทดสอบได้กราฟระหว่างแรง (Force) กับเวลา หรือการเปลี่ยนแปลง (Deformation) ของอาหาร กราฟที่ได้จากการทดสอบ เรียกว่ากราฟ TPA สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายเนื้อสัมผัสของอาหารได้หลากหลาย แสดงในตารางที่ 20 พบว่าค่าความแข็ง (Hardness) ส่วนค่าการยึดติด (Adhesiveness) และค่าการเกาะติด (Cohesiveness) ของตัวอย่างที่มีการเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่เยือกแข็งแบบ QF และ SF และทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งเท่ากับ 249.89 กรัมและ 279.34 กรัม เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเตรียมตัวอย่างสภาวะอื่นๆ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Gumminess) และค่าความเคี้ยวได้ (Chewiness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อมีการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจากการแช่เยือกแข็งส่งผลให้เกิดการทำลายโครงสร้างของเซลล์และเมื่อเซลล์ที่แตกสัมผัสกับอากาศร้อนทำให้ความร้อนเข้าสู่ภายในเซลล์ง่ายขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำออกอย่างรวดเร็ว



ตารางที่ 19 เนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เชื่อมอบแห้งที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สถานะ	Hardness (g)	Adhesiveness (g.sec)	Springiness ^{ns}	Cohesiveness	Gumminess (g) ^{ns}	Chewiness ^{ns}
50	ชิ้นมะม่วงสุดควบคุม	160.36±48.74 ^b	-13.45±0.38 ^{ab}	1.05±0.25	0.77±0.07 ^a	119.77±33.23	120.84±37.45
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการ แช่เยือกแข็งแบบช้า	172.92±66.50 ^{ab}	-10.59±3.65 ^a	0.97±0.03	0.77±0.03 ^a	132.57±51.34	127.35±46.67
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการ แช่เยือกแข็งแบบเร็ว	231.22±47.71 ^{ab}	-13.69±2.75 ^{ab}	0.94±0.04	0.74±0.08 ^a	167.79±30.96	158.62±25.11
60	ชิ้นมะม่วงสุดควบคุม	146.20±35.15 ^b	-15.52±1.48 ^{ab}	0.97±0.07	0.76±0.06 ^a	106.95±21.90	100.48±12.71
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการ แช่เยือกแข็งแบบช้า	279.34±6.76 ^a	-17.28±2.32 ^b	1.07±0.31	0.66±0.13 ^b	159.44±8.80	165.93±20.16
	ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการ แช่เยือกแข็งแบบเร็ว	249.89±13.35 ^{ab}	-17.05±0.41 ^b	1.07±0.29	0.73±0.08 ^a	171.65±15.92	177.17±29.08

a, b และ c หมายความว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{ns} หมายความว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

สำหรับการศึกษาการทำแห้งที่สภาวะการเก็บรักษาตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และ -40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน นำมาแช่ในสารละลายออสโมติกและทำการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็ง (Hardness) ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Gumminess) และค่าความเคี้ยวได้ (Chewiness) แสดงดังตารางที่ 21 ในตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว QF และเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 2 เดือนส่งผลให้มีค่าความแข็งสูงสุด เป็น 371.37 กรัม ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Gumminess) เป็นค่า 352.95 กรัม และค่าความเคี้ยวได้ (Chewiness) เป็น 378.02 เมื่อเปรียบเทียบกับ การเตรียมตัวอย่างสภาวะอื่นๆ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน เป็นระยะเวลาที่นานขึ้น ส่งผลให้ภายในโครงสร้างหรือเนื้อเยื่อพืชเกิดความเสียหาย ซึ่งเกิดช่องว่างระหว่างเซลล์ จึงเกิดอัตราการแพร่ผ่านระหว่างสารละลายกับเซลล์เนื้อเยื่อได้ง่ายขึ้น (Chassagne-Berces และคณะ, 2009) และจากการตกผลึกใหม่ของผลึกน้ำแข็ง เนื่องจากมีความผันผวนของอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษาการจึงส่งผลให้เกิดการตกผลึกซ้ำซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มขนาดและรูปร่างของผลึกน้ำแข็งให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (Fell, 2016) ซึ่งส่งผลให้เกิดการทำลายโครงสร้างของเซลล์และเมื่อเซลล์ที่แตกสัมผัสกับอากาศร้อนทำให้ความร้อนเข้าสู่ภายในเซลล์ง่ายขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำออกอย่างรวดเร็ว (Floury และคณะ, 2008) ส่วนค่าการยึดติด (Adhesiveness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) และค่าการเกาะติด (Cohesiveness) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)



ตารางที่ 20 เนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่มีมอบแห้งของตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 และ 2 เดือน

สถานะ	ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)	Hardness (g)	Adhesiveness (g.sec) ^{ns}	Springiness (sec/sec) ^{ns}	Cohesiveness (g.sec/g.sec) ^{ns}	Gumminess (g)	Chewiness
ชั้นมะม่วงชุดควบคุม	ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	146.20±35.15 ^c	-15.52±1.48	0.97±0.07	0.76±0.02	106.95±21.90 ^b	100.48±12.71 ^b
	ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	279.34±6.76 ^b	-17.28±2.32	1.07±0.11	0.66±0.01	159.44±8.80 ^b	165.93±20.16 ^b
ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	249.89±13.35 ^b	-17.04±0.41	1.02±0.06	0.73±0.01	171.65±15.91 ^{ab}	177.17±29.08 ^{ab}
	ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	348.31±10.34 ^a	-28.18±10.86	0.97±0.02	0.65±0.09	207.89±0.76 ^{ab}	198.34±0.48 ^{ab}
ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	352.53±14.16 ^a	-27.66±12.97	0.98±0.01	0.66±0.13	227.49±143.85 ^{ab}	220.71±135.61 ^{ab}
	ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	352.91±8.07 ^a	-18.31±11.53	1.19±0.19	0.69±0.14	218.95±43.86 ^{ab}	238.94±19.84 ^{ab}
ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	371.37±14.70 ^a	-36.41±20.16	1.08±0.07	0.62±0.16	352.95±149.30 ^a	378.02±185.94 ^a

^{a, b} และ ^c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.4.6 ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (Total Phenolic Content)

จากการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu reagent โดยใช้หลักการการออกซิไดซ์จากการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลด้วยวิธี Folin-Ciocalteu reagent โดยใช้หลักการการออกซิไดซ์สารประกอบฟีนอล และรีดิวซ์สีเหลืองของ heteropolyphosphomolybdate-tungstate anions ได้สารสีน้ำเงิน ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการวัดสารประกอบฟีนอลทั่วไป ไม่ได้มีความจำเพาะเจาะจงว่าเป็นชนิดใดชนิดหนึ่ง โดยทำการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Gallic acid ที่ความเข้มข้นต่างๆ และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร พบว่าสารประกอบฟีนอลทั้งหมดในตัวอย่างสดมีปริมาณที่น้อยกว่าตัวอย่างหลังแช่กระบวนการออสโมติกและตัวอย่างแห้งของการเตรียมตัวอย่างทุกสถานะและการทำแห้งด้วยอุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยในตัวอย่างที่ตัวอย่างหลังแช่กระบวนการออสโมติกของทุกสถานะมีค่าอยู่ในช่วง 2.14-2.54 มิลลิกรัม แกลลิก/ กรัมตัวอย่างแห้ง ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนตัวอย่างแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 2.55-2.88 มิลลิกรัม แกลลิก/ กรัมตัวอย่างแห้ง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงดังตารางที่ 22 ทั้งนี้เนื่องจากการจะมีการสลายตัวเมื่อโดนความร้อน แต่ในขณะเดียวกันอาจมีสารประกอบฟีนอลบางชนิดเพิ่มขึ้นหลังให้ความร้อน เช่น กรดแกลลิก ซึ่งปกติจะอยู่ในรูปของแกลโลแทนนิน (gallotannin) ที่จับกับสารอื่น เช่น น้ำตาล ดังนั้นการทำแห้งจึงไปช่วยเร่งการแตกตัวแกลลิกที่เกาะอยู่กับสารอื่นให้เป็นอิสระมากขึ้น จึงทำให้สามารถวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลได้มากขึ้น (Rangkadilok และคณะ, 2005) ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยศึกษาการทำแห้งมะม่วงพบว่าตัวอย่างมะม่วงที่ทำแห้งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลมากกว่าตัวอย่างมะม่วงจาก 251.09 มิลลิกรัมแกลลิก/ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง เป็น 286.83 มิลลิกรัมแกลลิก/ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง (Nazmi Izli และคณะ, 2017)

ตารางที่ 21 ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และมะม่วงแช่อบแห้งที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สถานะ	ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (mg GAE/1 g dry matter)		
		ตัวอย่างสด ^{ns}	หลังกระบวนการ แช่ออสโมติก	ตัวอย่างแห้ง ^{ns}
50	ขึ้นมะม่วงสด	1.94±0.18	2.25±0.17 ^c	2.77±0.14
	ควบคุม			
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่าน การแช่เยือกแข็ง แบบช้า		2.50±0.10 ^a	2.88±0.08
60	ขึ้นมะม่วงที่ผ่าน การแช่เยือกแข็ง แบบเร็ว		2.54±0.04 ^a	2.85±0.09
	ขึ้นมะม่วงสด	1.63±0.06	2.14±0.15 ^c	2.55±0.17
	ควบคุม			
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่าน การแช่เยือกแข็ง แบบช้า		2.17±0.06 ^c	2.70±0.00
	ขึ้นมะม่วงที่ผ่าน การแช่เยือกแข็ง แบบเร็ว		2.38±0.00 ^{ab}	2.71±0.07

^{a, b} และ ^c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

เมื่อทำการเลือกอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาก่อนการทำให้แห้งที่สถานะการเก็บรักษาตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และ -40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน นำมาแช่ในสารละลายออสโมติกและทำการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส พบว่าสารประกอบฟีนอลทั้งหมด ตัวอย่างสดมีปริมาณที่น้อยกว่าตัวอย่างหลังแช่กระบวนการออสโมติกและตัวอย่างแห้งของการเตรียมตัวอย่างทุกสถานะและในระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 1 เดือนและ 2 เดือน โดยมีปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดของตัวอย่างหลังแช่กระบวนการออสโมติกและตัวอย่างแห้งอยู่ในช่วง 2.14-2.40 มิลลิกรัมแกลลิก/ กรัมตัวอย่างแห้ง และ 2.40-2.71 มิลลิกรัมแกลลิก/ กรัมตัวอย่างแห้ง แสดงดังตารางที่ 23 ซึ่งพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดที่มากที่สุดในการเตรียมตัวอย่างก่อนการทำให้แห้ง คือสถานะการแช่เยือกแข็งแบบช้า SF เป็น 2.71±0.07 มิลลิกรัมแกลลิก/ กรัมตัวอย่างแห้ง และ

สภาวะการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว QF เป็น 2.70 ± 0.00 มิลลิกรัมแกลลิก/ กรัมตัวอย่างแห้ง ซึ่งในการแช่เยือกแข็งมีการเกิดผลึกน้ำแข็งภายในเซลล์ของเนื้อเยื่อซึ่งทำให้โครงสร้างของเซลล์แตกออกเป็นการช่วยทำให้การสกัดตัวทำละลายและทำให้การสกัดสารประกอบฟีนอลิกสูงขึ้น (Sogi และคณะ, 2015)

ตารางที่ 22 ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดของมะม่วงสด มะม่วงหลังกระบวนการแช่ออสโมติก และมะม่วงแช่อิมมอบแห้ง ของตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือนและ 2 เดือน

สภาวะ	ระยะเวลาการเก็บรักษา (เดือน)	ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (mg Gallic acid/1 g dry matter)		
		ตัวอย่างสด ^{ns}	หลังกระบวนการแช่ออสโมติก	ตัวอย่างแห้ง
ขึ้นมะม่วงชุดควบคุม		1.63±0.06	2.14±0.15 ^c	2.55±0.17 ^{abc}
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า			2.17±0.06 ^{bc}	2.70±0.00 ^a
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว			2.38±0.00 ^{ab}	2.71±0.07 ^a
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	1	1.82±0.06	2.40±0.01 ^a	2.63±0.05 ^{ab}
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว			2.40±0.02 ^{ab}	2.55±0.04 ^{abc}
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า	2	1.82±0.06	2.37±0.03 ^{abc}	2.40±0.02 ^b
ขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว			2.39±0.03 ^{ab}	2.47±0.01 ^{bc}

^{a, b} และ ^c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. การแช่เยือกแข็งมีผลต่อกระบวนการออสโมติกของมะม่วงแช่อิ่มที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 38 องศาบริกซ์ ซึ่งสถานะที่ทำให้เกิดการสมดุลเร็วที่สุด ได้แก่ การเตรียมขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าใช้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลเวลาเพียง 16 ชั่วโมง การเตรียมขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วใช้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 20 ชั่วโมง และขึ้นมะม่วงชุดควบคุม (ที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง) ใช้ระยะเวลามากที่สุดถึง 24 ชั่วโมง และเมื่อมีการเตรียมขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลาที่นานขึ้นโดยมีระยะเวลาในการเก็บรักษา 1 เดือนและ 2 เดือน ทำให้ลดระยะเวลาในการแช่กระบวนการออสโมซิสเหลือเพียง 14 ชั่วโมง
2. การแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิในการทำแห้ง 50 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีอัตราการทำแห้งที่สูงกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของทุกสถานะในการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งสถานะขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า และทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นที่สุดเพียง 16 ชั่วโมง โดยสมการ Page มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งได้ดีที่สุด
3. การแช่เยือกแข็งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง อุณหภูมิมีผลต่อปริมาณความชื้นและค่าออสโมติกแอสคิตีวิตี้ เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิการทำแห้ง 50 และ 60 องศาเซลเซียส ต่อลักษณะปรากฏและค่าสี ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล ค่ากิจกรรมเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส และค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และทำการเลือกอุณหภูมิสำหรับการทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในกึ่งทำแห้งขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือน และ 2 เดือน ซึ่งการเก็บรักษาด้วยการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 2 เดือน ส่งผลให้ค่าสี ความสว่าง L^* มีค่าสูง ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลและค่ากิจกรรมเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส มีค่าต่ำโดยเฉพาะในขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า ส่วนผลของเนื้อสัมผัสของขึ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 2 เดือนส่งผลให้ค่า Hardness ค่าความแข็งสูงสุด และปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดมีค่าลดลงเมื่อทำการเก็บรักษาที่นานขึ้น

ภาคผนวก

การวัดปริมาณความชื้นด้วยวิธี Hot air oven (AOAC, 2000)

1 การเตรียมตัวอย่าง

1.1 มะม่วงสด สุ่มตัวอย่างในแต่ละชุดการทดลองมาปั่นละเอียดให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องโฮมจิไนซ์

1.2 มะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง สุ่มตัวอย่างมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยกรรไกร และผสมให้เข้ากัน

2. วิธีการวิเคราะห์

2.1 ชั่งน้ำหนักกระป๋องอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น ทิ้งทิ้งไว้และทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้น และทำการชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

2.2 ใส่ตัวอย่างสดและตัวอย่างแห้งลงในกระป๋องอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้นประมาณ 3-5 กรัม บันทึกน้ำหนักกระป๋องอะลูมิเนียมรวมกับตัวอย่าง และนำไปอบโดยเปิดฝาในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.3 ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที

2.4 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน และนำมาคำนวณปริมาณความชื้นโดยใช้สูตรแสดงดังสมการที่

$$MC (\%) = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100$$

เมื่อ MC หมายถึง ค่าความชื้นในหน่วยเปอร์เซ็นต์

W_i หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ

W_f หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ

วัดค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (Browning index, BI) ดัดแปลงจากวิธีของ (Baloch และคณะ, 1973)

1. การเตรียมตัวอย่าง

1.1 มะม่วงสด สุ่มตัวอย่างในแต่ละชุดการทดลองมาปั่นละเอียดให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องโฮมจิไนซ์

1.2 มะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง สุ่มตัวอย่างมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยกรรไกร และผสมให้เข้ากัน

2. วิธีการวิเคราะห์

2.1 ชั่งน้ำหนัก 3 กรัม โดยบันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ลงในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยง

2.2 เติม 2% acetic acid ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้นาน 10 นาที ปั่นให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮมจิ

ไนซ์

- 2.3 นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8000 rpm นาน 15 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- 2.4 นำส่วนใสมาทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 วัดความเข้มข้นของสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นในเนื้อมะม่วง อาศัยค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดจากมะม่วงที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer โดยใช้อะซิติลความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็น Blank รายงานหน่วยเป็น (OD/g Dry solid)

การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenol oxidase (PPO activity) ดัดแปลงจากวิธีการของ (Banerjee และคณะ, 2015)

1. การเตรียมอย่าง

- 1.1 มะม่วงสด สุ่มตัวอย่างในแต่ละชุดการทดลองมาปั่นละเอียดให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องโฮโมจิไนซ์

- 1.2 มะม่วงแช่อบแห้ง สุ่มตัวอย่างมะม่วงแช่อบแห้งมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ด้วยกรรไกร และผสมให้เข้ากัน

2. วิธีการวิเคราะห์

- 2.1 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างโดยชั่งตัวอย่างมะม่วงสด จำนวน 5 กรัม และชั่งตัวอย่างแห้งจำนวน 3 กรัม บันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน และใส่ลงในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยง
- 2.2 นำมาใส่สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมฟอสเฟต 0.2 M (pH 6.8) ปริมาณ 15 มิลลิลิตร ทำการปั่นผสมด้วยเครื่องโฮโมจิไนซ์เป็นเวลา 30 วินาที
- 2.3 นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 12000 rpm ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาทีด้วยเครื่องแยกสารแบบหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกสารละลายและตะกอนออกจากกัน
- 2.4 สารละลายส่วนใสที่ได้มาวิเคราะห์หา PPO activity โดยนำสารละลายส่วนใสปริมาณ 0.5 มิลลิลิตรผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมฟอสเฟต 0.2 M (pH 6.8) ปริมาณ 2.5 มิลลิลิตรทำปฏิกิริยากับสารละลาย catechol 1 M ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที โดยทำการควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในอ่างทำความร้อน
- 2.5 วัดค่าการดูดกลืนแสงทันทีที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer โดยกิจกรรมของเอนไซม์ PPO 1 หน่วย คือ การเพิ่มขึ้น 0.01 ในระยะเวลา 1 นาที รายงานหน่วยเป็น (Units/g Dry solid)

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (Total phenolic contents) (ดัดแปลงจาก Singleton และ Rossi, 1965)

1. การเตรียมสารสกัด

- 1.1 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างโดยชั่งตัวอย่างมะม่วงสด จำนวน 3 กรัม และชั่งตัวอย่างแห้งจำนวน 1 กรัม ใส่ลงในหลอดขนาด 50 มิลลิลิตร

- 1.2 เติมเมทานอลที่มีความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงไปในหลอดที่มีตัวอย่าง ทำการผสมให้เข้าด้วยเครื่อง Vortex เป็นเวลา 15 วินาที
- 1.3 นำไปเข้าเครื่องอัลตราโซนิก ที่มีความถี่ 45 kHz เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรองสารสกัดที่ได้ด้วยกระดาษกรอง Whatman no. 4 ใส่ขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่หุ้มด้วยถุงดำเพื่อป้องกันการสัมผัสกับแสง
- 1.4 นำส่วนของมะม่วงที่สกัดแล้วมาทำการสกัดซ้ำ 2 ครั้ง โดยใช้เติมเมทานอลที่มีความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ ในปริมาตร 15 และ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ และปรับปริมาตรสุดท้ายของสารสกัดให้ได้ 50 มิลลิลิตร
- 1.5 ค่อยๆ รินสารละลายที่ได้จากขวดปรับปริมาตรใส่ขวดสีชาและชาเยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาทำการวิเคราะห์

2. การเตรียมสารละลาย

2.1 สารละลาย Folin and Ciocalteu's phenol reagent ที่มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ในน้ำกลั่น ปิเปต Folin and Ciocalteu's phenol reagent ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2.2 สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่มีความเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์ (มวล/ปริมาตร) ในน้ำกลั่น

ชั่ง Na_2CO_3 ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่งจำนวน 7.5 กรัม จากนั้นทำการละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร

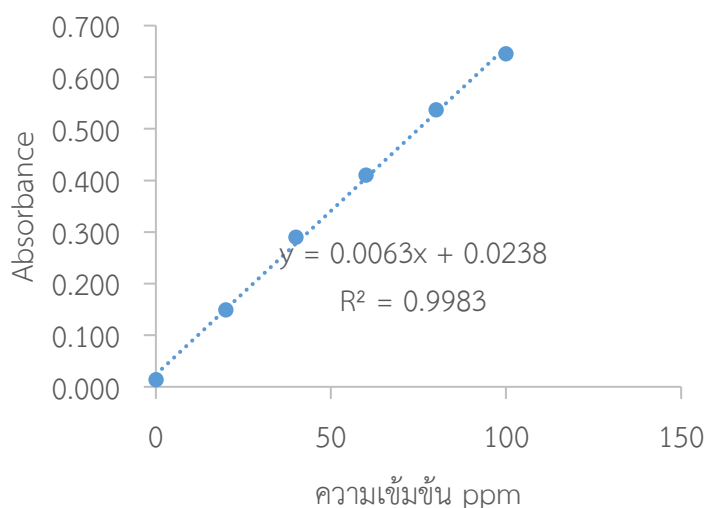
2.3 สารมาตรฐานกรดแกลลิก

โดยชั่งกรดแกลลิกด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง จำนวน 0.1000 ± 0.0010 กรัม พร้อมบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นละลายกรดแกลลิกด้วยเมทานอลที่มีความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ซึ่งใช้เป็นสารสกัด จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร และติดฉลากข้างขวดให้เป็นสารละลายเข้มข้น (stock solution) เตรียมสารมาตรฐานกรดแกลลิกที่มีความเข้มข้นต่างๆ โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกจากสารละลายเข้มข้น ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเมทานอลที่มีความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) จะได้สารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกที่มีความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

3. การเตรียมกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid standard curve)

ปิเปตสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกที่เตรียมไว้ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ลงในขวดสีหลอดทดลองที่หุ้มด้วยถุงดำเพื่อป้องกันการแสง เติมสารละลาย Folin and Ciocalteu's phenol reagent ที่มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงไป จากนั้นผสมให้เข้าด้วยเครื่อง Vortex เป็นเวลา 15 วินาที และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์ (มวล/ปริมาตร) ลงไปปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร ผสม

ให้เข้าด้วยเครื่อง Vortex เป็นเวลา 15 วินาที และตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 120 นาที ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร รายงานหน่วยเป็น (mg gallic/g Dry solid)



ภาพที่ 20 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (A) กับค่าความเข้มข้นของกรดแกลลิก (Gallic acid) ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร

ค่าความแน่นเนื้อ (Firmness)

ทำการวัดความแน่นเนื้อของมะม่วงระหว่างการแช่สารละลายออสโมติกทุกๆ 2 ชั่วโมง โดยวัดที่บริเวณจุดกึ่งกลางของชิ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Textuer analyzer) โดยใช้หัววัดสแตนเลสรูปทรงกระบอก (stainless steel probe, p/2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัววัด 2 มิลลิเมตร ค่าความแน่นเนื้อที่ได้เป็นการวัดค่าแรงสูงสุดที่หัววัดกดทะลุจำนวน 1 ครั้ง จากนั้นบันทึกค่าแรงกดสูงสุดในหน่วยนิวตัน (N)

โหมดการวัด คือ measure force in compression

ความเร็วก่อนการวัด (pre-test speed) 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที

ความเร็วในการวัด (test speed) 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที

ความเร็วหลังการวัด (post-test speed) 10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที

ระยะทางในการวัด (distance) 5.0 มิลลิเมตร

การวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (water activity; aw)

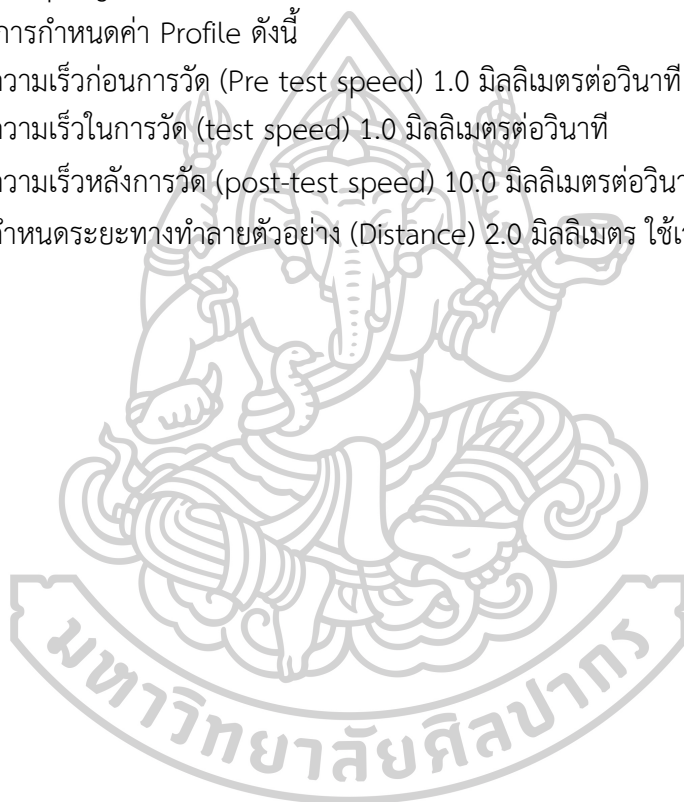
วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ โดยใส่ตัวอย่างมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง ที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดเท่าๆ กัน ประมาณ 3 กรัมลงในถ้วยสำหรับวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ และทำการ

วิเคราะห์ค่าแอมพลิจูดด้วยเครื่องวัดค่าแอมพลิจูดแอมพลิจูดที่อุณหภูมิ 25 ± 0.2 องศาเซลเซียส ทำวิเคราะห์ 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง

วิเคราะห์เนื้อสัมผัสแบบ Texture Profile Analysis (TPA)

ทำการวัดเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง ที่มีขนาดความยาว 6 เซนติเมตร กว้าง 4 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร โดยทำการวัดที่บริเวณจุดกึ่งกลางของชิ้น ใช้หัววัดสแตนเลสรูปทรงกระบอก (stainless steel probe, p/2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัววัด 2 มิลลิเมตร ทำการวัดจำนวน 8 ชิ้นต่อชุดการทดลอง ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายเนื้อสัมผัสของอาหาร ได้แก่ Hardness, Adhesiveness, Springiness, Cohesiveness Gumminess และ Chewiness ในการวัดจะมีการกำหนดค่า Profile ดังนี้

- ความเร็วก่อนการวัด (Pre test speed) 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ความเร็วในการวัด (test speed) 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ความเร็วหลังการวัด (post-test speed) 10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที
- กำหนดระยะทางทำลายตัวอย่าง (Distance) 2.0 มิลลิเมตร ใช้เวลา 5 วินาที



รายการอ้างอิง

- Ade-Omowaye, B. I. O., Taiwo, K. A., Eshtiaghi, N. M., Angersbach, A., and Knorr, D. (2003). Comparative evaluation of the effects of pulsed electric field and freezing on cell membrane permeabilisation and mass transfer during dehydration of red bell peppers. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4(2), 177-188. doi:[https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(03)00020-1)
- Ahmed, I., Qazi, I. M., and Jamal, S. (2016). Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 29-43. doi:10.1016/j.ifset.2016.01.003
- Ajila, C., Naidu, A., Bhat, S. G., and Prasad, U. (2007). Bioactive compounds and antioxidant potential of mango peel extract. *Food Chemistry*, 105, 982-988. doi:10.1016/j.foodchem.2007.04.052
- Akharume, F. U., Singh, K., and Sivanandan, L. (2016). Characteristics of apple juice and sugar infused fresh and frozen blueberries. *Lwt*, 73, 448-457. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.041>
- Akoy, E. (2014). Effect of Drying Temperature on Some Quality Attributes of Mango Slices. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 4, 91-99.
- Alfaro, L., Siramard, S., Chouljenko, A., and Sathivel, S. (2018). Effects of liquid nitrogen pretreatment on the osmotic dehydration and quality of cryogenically frozen blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.). *Food Bioscience*, 22, 165-169. doi:10.1016/j.fbio.2018.02.006
- Ando, Y., Hagiwara, S., Nabetani, H., Sotome, I., Okunishi, T., Okadome, H., et al. (2018). Improvements of drying rate and structural quality of microwave-vacuum dried carrot by freeze-thaw pretreatment. *Lwt*, 100. doi:10.1016/j.lwt.2018.10.064
- Aregbesola, O. A., Ogunsina, B. S., Sofolahan, A. E., and Chime, N. N. (2015). Mathematical modeling of thin layer drying characteristics of dika (*Irvingia gabonensis*) nuts and kernels. *Nigerian Food Journal*, 33(1), 83-89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nifoj.2015.04.012>

- Arévalo-Pinedo, A., and Xidieh Murr, F. E. (2007). Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 80(1), 152-156. doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.05.005
- Baloch, A. K., Buckle, K. A., and Edwards, R. A. (1973). Measurement of non-enzymic browning of dehydrated carrot. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 24(4), 389-398. doi:<https://doi.org/10.1002/jsfa.2740240406>
- Banerjee, A., Suprasanna, P., Variyar, P. S., and Sharma, A. (2015). Gamma irradiation inhibits wound induced browning in shredded cabbage. *Food Chemistry*, 173, 38-44. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.166>
- Bilbao-Sainz, C., Sinrod, A., Powell-Palm, M. J., Dao, L., Takeoka, G., Williams, T., et al. (2019). Preservation of sweet cherry by isochoric (constant volume) freezing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 108-115. doi:10.1016/j.ifset.2018.10.016
- Bozkir, H., and Ergün, A. R. (2020). Effect of sonication and osmotic dehydration applications on the hot air drying kinetics and quality of persimmon. *Lwt*, 131, 109704. doi:10.1016/j.lwt.2020.109704
- Brannan, R., and Wang, G. (2017). Effect of Frozen Storage on Polyphenol Oxidase, Antioxidant Content, and Color of Pawpaw (*Asimina triloba* [L.] Dunal) Fruit Pulp. *Journal of Food Research*, 6, 93. doi:10.5539/jfr.v6n3p93
- Chassagne-Berces, S., Fonseca, F., Citeau, M., and Marin, M. (2010). Freezing protocol effect on quality properties of fruit tissue according to the fruit, the variety and the stage of maturity. *LWT - Food Science and Technology*, 43(9), 1441-1449. doi:10.1016/j.lwt.2010.04.004
- Chassagne-Berces, S., Poirier, C., Devaux, M.-F., Fonseca, F., Lahaye, M., Pigorini, G., et al. (2009). Changes in texture, cellular structure and cell wall composition in apple tissue as a result of freezing. *Food Research International*, 42(7), 788-797. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.03.001>
- Chayjan, R., Salari, K., and Shadidi, B. (2012). Modeling some drying characteristics of garlic sheets under semi fluidized and fluidized bed conditions. *Res. Agr. Eng.*, 58. doi:10.17221/42/2011-RAE
- Cheema, S., and Sommerhalter, M. (2015). Characterization of polyphenol oxidase activity in Ataulfo mango. *Food Chemistry*, 171, 382-387. doi:10.1016/j.foodchem.2014.09.011

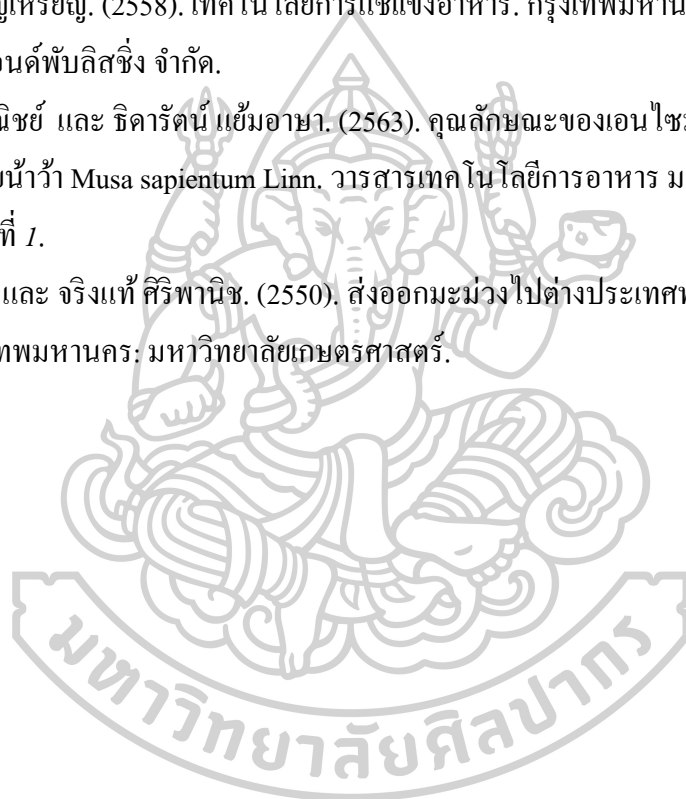
- Chung, H.-S., Kim, D.-S., Kim, H.-S., Lee, Y.-G., and Seong, J.-H. (2013). Effect of freezing pretreatment on the quality of juice extracted from *Prunus mume* fruit by osmosis with sucrose. *LWT - Food Science and Technology*, 54(1), 30-34.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.05.016>
- Dandamrongrak, R., Young, G., and Mason, R. (2002). Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering*, 55(2), 139-146. doi:[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00028-6)
- Ergün, A. R., Yanat, M., and Baysal, T. (2020). The effects of the novel home freezing system on microstructure, color, antioxidant activity, and microbiological properties of strawberries. *International Journal of Refrigeration*. doi:10.1016/j.ijrefrig.2020.10.013
- Eshtiaghi, M. N., Stute, R., and Knorr, D. (1994). High-Pressure and Freezing Pretreatment Effects on Drying, Rehydration, Texture and Color of Green Beans, Carrots and Potatoes. *Journal of Food Science*, 59(6), 1168-1170. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb14668.x>
- Fell, P. J. (2016). *Food Processing Technology* (4th ed.). UK: Woodhead Publishing
- Floury, J., Le Bail, A., and Pham, Q. T. (2008). A three-dimensional numerical simulation of the osmotic dehydration of mango and effect of freezing on the mass transfer rates. *Journal of Food Engineering*, 85(1), 1-11. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.06.011
- Galetto, C. D., Verdini, R. A., Zorrilla, S. E., and Rubiolo, A. C. (2010). Freezing of strawberries by immersion in CaCl₂ solutions. *Food Chemistry*, 123(2), 243-248.
doi:10.1016/j.foodchem.2010.04.018
- Guiamba, I., Ahrné, L., Khan, M. A. M., and Svanberg, U. (2016). Retention of β -carotene and vitamin C in dried mango osmotically pretreated with osmotic solutions containing calcium or ascorbic acid. *Food and Bioprocess Processing*, 98, 320-326.
doi:10.1016/j.fbp.2016.02.010
- Jha, P. K., Xanthakis, E., Chevallier, S., Jury, V., and Le-Bail, A. (2019). Assessment of freeze damage in fruits and vegetables. *Food Res Int*, 121, 479-496.
doi:10.1016/j.foodres.2018.12.002
- Kim, H., Moon, J. Y., Kim, H., Lee, D.-S., Cho, M., Choi, H.-K., et al. (2010). Antioxidant and antiproliferative activities of mango (*Mangifera indica* L.) flesh and peel. *Food Chemistry*, 121(2), 429-436. doi:10.1016/j.foodchem.2009.12.060

- Korbel, E., Attal, E.-H., Grabulos, J., Lluberas, E., Durand, N. I., Morel, G., et al. (2013). Impact of temperature and water activity on enzymatic and non-enzymatic reactions in reconstituted dried mango model system. *European Food Research and Technology*, 237. doi:10.1007/s00217-013-2026-6
- Kowalska, H., Lenart, A., and Leszczyk, D. (2008). The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 86, 30-38. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.09.006
- Li, Y., Jin, Y., Li, H., Borrion, A., Yu, Z., and Li, J. (2018). Kinetic studies on organic degradation and its impacts on improving methane production during anaerobic digestion of food waste. *Applied Energy*, 213, 136-147. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.033>
- Liu, F. X., Fu, S. F., Bi, X. F., Chen, F., Liao, X. J., Hu, X. S., et al. (2013). Physico-chemical and antioxidant properties of four mango (*Mangifera indica* L.) cultivars in China. *Food Chem*, 138(1), 396-405. doi:10.1016/j.foodchem.2012.09.111
- Ma, Andrea, T., Ramírez-Villatoro, G., and Rosa, N. A. (2010). Polyphenol oxidase and peroxidase activities in mangoes stored at chilling temperature. *Acta Horticulturae*, 864, 395-402. doi:10.17660/ActaHortic.2010.864.54
- Nazmi Izli, İzli, G., and Taşkın, O. (2017). Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 37. doi:10.1590/1678-457x.28316
- Noiwan, D., Suppakul, P., Joomwong, A., Uthaibutra, J., and Rachtanapun, P. (2017). Kinetics of Mango Fruits (*Mangifera indica* cv. 'Nam Dok Mai Si Thong') Quality Changes during Storage at Various Temperatures. *Journal of Agricultural Science*, 9, 199. doi:10.5539/jas.v9n6p199
- Nsonzi, F., and Ramaswamy, H. S. (1998). OSMOTIC DEHYDRATION KINETICS OF BLUEBERRIES. *Drying Technology*, 16(3-5), 725-741. doi:10.1080/07373939808917432
- Oduola, K., and Oforkansi, B. (2016). Mathematical Model of Thin-Layer Drying Process in a Plantain Sample. *International Journal of Engineering Research*, 5, 364.
- Patiño-Rodríguez, O., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., and Pacheco-Vargas, G. (2020). Pulp and peel of unripe stenopermocarpic mango (*Mangifera indica* L. cv Ataulfo) as an

- alternative source of starch, polyphenols and dietary fibre. *Food Research International*, 138, 109719. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109719>
- Polinati, R., Faller, A. L., and Fialho, E. (2010). The effect of freezing at -18 °C and -70 °C with and without ascorbic acid on the stability of antioxidant in extracts of apple and orange fruits. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 1814-1820. doi:10.1111/j.1365-2621.2010.02333.x
- Pott, I., Neidhart, S., Mühlbauer, W., and Carle, R. (2005). Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 6(4), 412-419. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2005.05.004>
- Rangkadilok, N., Worasuttayangkurn, L., Bennett, R. N., and Satayavivad, J. (2005). Identification and Quantification of Polyphenolic Compounds in Longan (*Euphoria longana* Lam.) Fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(5), 1387-1392. doi:10.1021/jf0403484
- Rayman ErgÜN, A., GÜRlek, N., and Baysal, T. (2020). Kiraz Domateslerde Donma Hızının Kaliteye Etkisi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 317-327. doi:10.29133/yyutbd.670610
- Robles-Sánchez, R. M., Rojas-Graü, M. A., Odriozola-Serrano, I., González-Aguilar, G. A., and Martín-Belloso, O. (2009). Effect of minimal processing on bioactive compounds and antioxidant activity of fresh-cut 'Kent' mango (*Mangifera indica* L.). *Postharvest Biology and Technology*, 51(3), 384-390. doi:<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.09.003>
- Sarkar, T., Salaudinn, M., Hazra, S. K., and Chakraborty, R. (2020). Effect of cutting edge drying technology on the physicochemical and bioactive components of mango (Langra variety) leather. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100074. doi:10.1016/j.jafr.2020.100074
- Shen, G., Zhang, L., Hu, T., Li, Z., Chen, A., Zhang, Z., et al. (2020). Preparation of potato flour by freeze-thaw pretreatment: Effect of different thawing methods on hot-air drying process and physicochemical properties. *Lwt*, 133, 110157. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110157>
- Singleton, V. L., and Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144. Retrieved from <http://www.ajevonline.org/content/16/3/144.abstract>

- Sogi, D. S., Siddiq, M., and Dolan, K. D. (2015). Total phenolics, carotenoids and antioxidant properties of Tommy Atkin mango cubes as affected by drying techniques. *LWT - Food Science and Technology*, 62(1), 564-568. doi:10.1016/j.lwt.2014.04.015
- Wang, J., Jiang, W., Wang, B., Liu, S., Gong, Z., and Luo, Y. (2007). Partial properties of polyphenol oxidase in mango (*Mangifera Indica* L. CV. "TAINONG") pulp. *Journal of Food Biochemistry*, 31, 45-55. doi:10.1111/j.1745-4514.2007.00097.x
- Yasunaga, E., Fukuda, S., Takata, D., Spreer, W., Sardud, V., and Nakano, K. (2018). Quality Changes in Fresh Mango Fruits (*Mangifera indica* L. 'Nam Dok Mai') Under Actual Distribution Temperature Profile from Thailand to Japan. *Environment Control in Biology*, 56, 45-49. doi:10.2525/ecb.56.45
- Yoruk, R., and Marshall, M. (2003). Physicochemical properties and function of plant polyphenol oxidase: A review. *Journal of Food Biochemistry*, 27, 361-422. doi:10.1111/j.1745-4514.2003.tb00289.x
- Zhang, Y., Zhao, J.-H., Ding, Y., Xiao, H.-W., Sablani, S. S., Nie, Y., et al. (2018). Changes in the vitamin C content of mango with water state and ice crystals under state/phase transitions during frozen storage. *Journal of Food Engineering*, 222, 49-53. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.003>
- Zhao, J.-H., Liu, F., Pang, X.-L., Xiao, H.-W., Wen, X., and Ni, Y.-Y. (2016). Effects of different osmo-dehydrofreezing treatments on the volatile compounds, phenolic compounds and physicochemical properties in mango (*Mangifera indica* L.). *International Journal of Food Science & Technology*, 51(6), 1441-1448. doi:<https://doi.org/10.1111/ijfs.13113>
- จริงแท้ ศรีพานิช. (2549). ชีววิทยาหลังการเก็บเกี่ยวและการวางของพืช. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรวิทยาเขตกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร
- ปิยดา อารี และ วิษนี มีโต. (2560). การต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสของสารสกัด มะม่วงน้ำดอกไม้สุก (*Mangifera indica* Linn.). Paper presented at the การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, อาคารเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ พระนครศรีอยุธยา ศูนย์หัตถา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา.

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเพียร จิรชัย. (2542). หลักการแปรรูปและถนอมอาหาร: โปรแกรมวิชา
เกษตรศาสตร์. กาญจนบุรี
- วิลโลว์ รังสาดทอง. (2546). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร (พิมพ์ครั้งที่ 3 ed.). กรุงเทพฯ: บริษัท เท็กซ์
แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด.
- ศิริธร ศิริอมรพรรณ และนเรศ มีโส. (2552). การวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในมะม่วง กลิ้ว
และมะละกอ. ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนาการศาสตร์ คณะเทคโนโลยี.
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
- สงวนศรี เจริญเหรียญ. (2558). เทคโนโลยีการแช่แข็งอาหาร. กรุงเทพมหานคร: บริษัท สหมิตรพริน
ติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด.
- สมฤดี ไทพานิชย์ และ ธิดารัตน์ แยมอายุ. (2563). คุณลักษณะของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสใน
กลี๋ยงน้ำว่า *Musa sapientum* Linn. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม ปีที่ 5,
ฉบับที่ 1.
- อภิธา บุญศิริ และ จริ่งแท้ ศิริพานิช. (2550). ส่งออกมะม่วงไปต่างประเทศอย่างไร.
กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุภาวดี สมคะเน
วัน เดือน ปี เกิด	15 กันยายน 2537
สถานที่เกิด	นครปฐม
วุฒิการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีอาหาร)
ที่อยู่ปัจจุบัน	30 หมู่ 4 ตำบลดอนแฝก อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม
ผลงานตีพิมพ์	Wiriawatthana, C. Somkane, S. Komonsing, N. Khuwijitjaru, P. and Mahayothee, B. 2018. Prevention of Browning Formation in Jasmine Flower (<i>Jasminum sambac</i>) During Postharvest Storage. The 44th Congress on Science and Technology of Thailand. Bangkok, 29-31 October, 2018. (ไม่มี fulltext) สุภาวดี สมคะเน ปราโมทย์ คุวิจิตรจรรู และบุศราภรณ์ มหาโยธี. 2563. อิทธิพลของการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 10

