



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

..... วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)

ปริญญา

..... วิทยาศาสตร์การอาหาร

สาขา

..... วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

ภาควิชา

เรื่อง ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อเนื่องสัปดาห์และสารประกอบเพกทินของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

Effect of Freezing Rates and Freeze-Thaw Cycles on Texture and Pectic Substances of Mango (*Mangifera indica* L. cv. Nam Dok Mai Sri Thong)

นามผู้วิจัย นางสาวกรรณิการ์ โอ้วเจริญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... รองศาสตราจารย์ สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... อาจารย์กนิษฐพร วังโน, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วรณิ จิระภาคกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(..... รองศาสตราจารย์ กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อเนื่องสามพัลส์
และสารประกอบเพกทินของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

Effect of Freezing Rates and Freeze-Thaw Cycles on Texture and Pectic Substances of Mango
(*Mangifera indica* L. cv. Nam Dok Mai Sri Thong)

โดย

นางสาวกรรณิการ์ โอ้วเจริญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กรณีการ โอ้วเจริญ 2555: ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อเนื่อง
สัมผัสและสารประกอบเพกทินของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D. 103 หน้า

มะม่วงสุกมีช่วงอายุการเก็บรักษาสั้น เกิดการเสื่อมเสียได้ง่าย การแช่เยือกแข็งจึงเป็นทางเลือกหนึ่งซึ่ง
ช่วยในการถนอมอาหารให้มีคุณลักษณะคงเดิม อย่างไรก็ตามวิธีการถนอมอาหารนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ
เนื้อสัมผัสนำไปสู่การนิ่มและได้ คุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อัตราเร็วที่ใช้ในการแช่
เยือกแข็งรวมทั้งอุณหภูมิในการขนส่งและกระจายสินค้า กระบวนการเหล่านี้ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์
ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการแช่เยือกแข็ง (fast freezing (FF), medium freezing
(MF) และ slow freezing (SF)) และการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ (1-3 รอบ) ต่อเนื้อสัมผัส (วัดด้วยเครื่องมือ
และการประเมินทางประสาทสัมผัส) โครงสร้างระดับจุลภาค ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง
และสารประกอบเพกทิน ซึ่งได้แก่ ของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (AIS) เพกทินทั้งหมด (TP) เพกทินที่
ละลายน้ำได้ (WSP) และเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेट (ASP) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง โดยใช้
มะม่วงสดเป็นตัวอย่างควบคุม จากผลการทดลอง พบว่า ค่า AIS และ TP ของตัวอย่างมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่าน
การแช่เยือกแข็งทั้ง 3 ระดับ ของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ (1-3 รอบ) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง
สถิติ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามปริมาณ WSP, ASP และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งมีแนวโน้ม
เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ ในการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1 ตัวอย่างที่ผ่านการ
แช่เยือกแข็งแบบ SF มีปริมาณ WSP, ASP และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งสูงกว่าอัตราการ
แช่เยือกแข็งอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 3 ปริมาณ WSP
และ ASP ของแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ขณะที่ค่าความแน่น
เนื้อและคะแนนความแน่นเนื้อของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบ FF, MF และ SF มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ
มะม่วงสด ค่าความแน่นเนื้อและคะแนนความแน่นเนื้อลดลง เมื่อจำนวนรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลาย
น้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้น แม้ว่าการแช่เยือกแข็งทำให้ค่าความแน่นเนื้อและคะแนนความแน่นเนื้อลดลง มะม่วงที่ผ่านการ
แช่เยือกแข็งแบบ FF มีความแน่นเนื้อสูงที่สุด นอกจากนี้ โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างมะม่วงแสดงให้เห็น
ว่า พผนังเซลล์ของตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งถูกทำลายโดยผลึกน้ำแข็ง ทำให้เซลล์เกิดการหดตัวและยุบตัวลง
ผนังเซลล์ของตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบ SF ถูกทำลายชัดเจนกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบ MF
และ FF ในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการแช่เยือกแข็งและ
กระบวนการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อคุณภาพของผลไม้ที่มีลักษณะนิ่ม เช่น
มะม่วงสุก

Kannika Owcharoen 2012: Effect of Freezing Rates and Freeze-Thaw Cycles on Texture and Pectic Substances of Mango (*Mangifera indica* L. cv. Nam Dok Mai Sri Thong). Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Associate Professor Sanguansri Charoenrein, Ph.D. 103 pages.

Ripe mangoes have a short shelf life. Because of their perishability, freezing is one of preservation techniques that helps preserve their original attributes. However, freezing usually causes textural changes leading to softening in fruit. The quality of frozen-thawed fruit depends on many factors such as optimal freezing rate including proper transportation and distribution chain. These processes had an effect on quality of products. Therefore, the objective of this research was to study the effect of freezing rates (fast freezing (FF), medium freezing (MF) and slow freezing (SF)) and freeze-thaw cycles (1-3 cycles) on texture (instrumental measurement and sensory evaluation), microstructure, drip loss and pectic substances of mango cv. 'Nam Dok Mai Sri Thong' fruit were determined. The pectin contents, i.e. alcohol insoluble solids (AIS), total pectin (TP), water soluble pectin (WSP) and ammonium oxalate soluble pectin (ASP). Fresh mango was used as a control. The results showed that the AIS and TP contents of fresh and freeze-thawed sample with three freezing rates in all freeze-thaw cycles were not significantly different ($p > 0.05$). However, the WSP, ASP and drip loss showed an increase tendency with repeating freeze-thaw cycles. For the 1st cycle, SF sample had significantly higher WSP, ASP and drip loss than those with other freezing rates ($p \leq 0.05$). For the 3rd cycles, the WSP and ASP of three freezing rates were not significantly different ($p > 0.05$). Whereas a reduction in firmness values and firmness scores were observed after FF, MF and SF as compared with fresh mango. The firmness values and firmness scores were decreased with repeating freeze-thaw cycles. Although freezing reduced firmness values and firmness scores, FF samples had the highest firmness. Furthermore, microstructure showed that the cell wall of frozen samples were destroyed by ice crystal formation thus cell shrinkage and collapse were occurred. The degradation of cell walls was more obvious for SF than for MF and FF of each cycle. This study confirms that freezing rates and repeated freezing and thawing processes have an obvious impact on the quality of soft fruit such as ripe mango.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สงวนศรี เจริญเหรียญ อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก เป็นอย่างสูง ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความรู้ อบรมสั่งสอน ให้ความช่วยเหลือ
ทั้งในด้านคำปรึกษา ด้านการค้นคว้าข้อมูล ตลอดจนความรู้เกี่ยวกับการทำวิจัยและตรวจแก้ไข
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณ ดร. กนิฐพร วังใน อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรณิ จิรภาคย์กุล ประธานในการสอบปากเปล่า
ขั้นสุดท้าย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รณิ สงวนศิริกุล ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้
คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตลอด
ระยะเวลาที่ศึกษา ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์แห่งนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชา
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการใช้
เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ห้อง 2412 ทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจ คำแนะนำในยามที่
ท้อหรือมีอุปสรรค และให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกาย แรงใจ อย่างเต็มที่ อีกทั้งยังมอบมิตรภาพที่ดี
จนข้าพเจ้ามีกำลังใจฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้
อบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และคำปรึกษาที่ดี พี่และน้องที่คอยเป็นห่วงและให้กำลังใจกันเสมอมา และ
ครูอาจารย์ทุกท่านของข้าพเจ้า

กรรณิการ์ โอ้วเจริญ

มีนาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
วิธีการ	34
ผลและวิจารณ์	40
สรุปและข้อเสนอแนะ	71
สรุป	71
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี	84
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส	88
ภาคผนวก ค ข้อมูลประกอบผลการทดลอง	95
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	103

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณค่าทางโภชนาการของมะม่วงสุก	5
2	อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งและอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งที่ระดับต่างๆ	41

ตารางผนวกที่

ก1	ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์	96
ก2	ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณเพกทินทั้งหมด	97
ก3	ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้	98
ก4	ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेट	99
ก5	ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง	100
ก6	ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส	101
ก7	ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อคะแนนความแน่นเนื้อที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัส	102

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารในระหว่างการแช่เยือกแข็ง	7
2 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเนื้อเยื่อระหว่างการแช่เยือกแข็งแบบช้า	9
3 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเนื้อเยื่อระหว่างการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	9
4 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส	19
5 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	19
6 โครงสร้างทางเคมีของเพกทินชนิดต่างๆ	21
7 โครงสร้างทางเคมีของ rhamnogalacturonan II ซึ่งมีไฮโมกาเล็กทูโรแนนเป็นแกนหลัก และมีแขนงหลัก 4 แขนง ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด	22
8 การเชื่อมต่อของเพกทินบริเวณมิลเคิลลาเมลล่า	23
9 การเชื่อมต่อของเซลล์ด้วยมิลเคิลลาเมลล่า	24
10 สูตรโครงสร้างของกรดเพกติก	24
11 สูตรโครงสร้างของเพกทิน	25
12 สูตรโครงสร้างของโปรโทเพกทิน	25
13 แบบจำลองแสดงภาพการจับตัวกันของไฮโมกาเล็กทูโรแนนด้วยพันธะไฮออน โดยมีแคลเซียมเป็นตัวกลาง ในรูปแบบที่เหมือนถาดไข่ เรียกว่า egg-box	26
14 แผนภาพการแช่เยือกแข็งมะม่วงด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (SF) แบบปานกลาง (MF) และแบบเร็ว (FF)	41
15 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์	43
16 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณเพกทินทั้งหมด	44
17 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้	47
18 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลเลต	49
19 การสกัดเพกทินที่ละลายน้ำได้จากมะม่วงสด	51
20 การสกัดเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลเลตจากมะม่วงสด	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	กลไกการทำลายเพกทินจากโครงสร้าง egg-box ด้วยผลึกน้ำแข็งและการสกัดเพกทินด้วยน้ำ	53
22	กลไกการทำลายเพกทินจากโครงสร้าง egg-box ด้วยผลึกน้ำแข็งและการสกัดเพกทินด้วยสารละลายแอมโมเนียมออกซาลेट	54
23	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่งของมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง	57
24	ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง	59
25	ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส	62
26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อและปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้	64
27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อและปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेट	64
28	ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อคะแนนความแน่นเนื้อที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัส	66
29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคะแนนความแน่นเนื้อจากการประเมินทางประสาทสัมผัส	68
30	ลักษณะปรากฏของชิ้นมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง	70
ภาพผนวกที่		
ก1	สีของเนื้อมะม่วงในระหว่างการสุกที่ระยะต่างๆ	85
ก2	ลำดับการสกัดสารประกอบเพกทินจากมะม่วง	87
ข1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนดของวัน	94

ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อเนื่องสัมผัส และสารประกอบเพกทินของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

Effect of Freezing Rates and Freeze-Thaw Cycles on Texture and Pectic Substances of Mango (*Mangifera indica* L. cv. Nam Dok Mai Sri Thong)

คำนำ

มะม่วงเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของไทย เป็นไม้ผลที่มีผู้นิยมบริโภคมากชนิดหนึ่งในประเทศและสามารถผลิตเป็นสินค้าส่งออกได้ เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง อุดมด้วยแร่ธาตุและวิตามิน เช่น โพแทสเซียมและวิตามินซี นอกจากนี้ มะม่วงสุกยังเป็นแหล่งของเส้นใยอาหารและสารแคโรทีนอยด์ที่มีความสำคัญต่อร่างกาย โดยเฉพาะสารเบต้าแคโรทีน ที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระและเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ในร่างกาย (Tharanathan *et al.*, 2006) อย่างไรก็ตาม มะม่วงสุกมีช่วงอายุการบริโภคสั้นประมาณ 2-3 วัน ที่อุณหภูมิห้อง หรือ 2-3 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 10-15 องศาเซลเซียส (Yahia, 1998) ทำให้ต้องชะลอการสุกและการเน่าเสีย เพื่อสามารถขนส่งไปยังผู้บริโภคที่อยู่ห่างไกล อีกทั้งมะม่วงเป็นผลไม้ที่ให้ผลผลิตตามฤดูกาล จึงทำให้ช่วงฤดูกาลผลิตมะม่วงมีราคาตกต่ำ ดังนั้น การนำมะม่วงสุกมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มะม่วงสุกแช่เยือกแข็ง จึงเป็นการช่วยลดปัญหามะม่วงล้นตลาดและยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลมะม่วงได้อีกทางหนึ่ง

คุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (Sousa *et al.*, 2007) เนื่องจากอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งส่งผลต่อขนาดและตำแหน่งของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น (Allan *et al.*, 1999) ผู้วิจัยจึงตั้งสมมติฐานว่าอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งที่ต่างกันอาจจะมีผลต่อเนื้อสัมผัสของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง อย่างไรก็ตาม วิธีการแช่เยือกแข็งที่ดีและเหมาะสมเพียงอย่างเดียวจะไม่ช่วยให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งดีที่สุดได้ เพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งอาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการขนส่ง การเก็บรักษา และการวางจำหน่าย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เกิดการละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็งซ้ำ (freeze-thaw cycles) ทำให้คุณภาพของอาหารลดลงเช่นเดียวกับการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราการแช่เยือกแข็งแบบซ้ำได้ (Karel *et al.*, 1975; Fellows, 1990) มีผลทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อของ

ผลไม้ ทำให้การสูญเสียเนื้อภายหลังจากทำลายเพิ่มขึ้น (Van Buggenhout *et al.*, 2006) ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และการยอมรับของผู้บริโภค

สารประกอบเพกทินมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลไม้ โดยมีการศึกษาการนิ่มของมะม่วง (Tucker and Seymour, 1991; Muda *et al.*, 1995; Ketsa *et al.*, 1998) และเคปกูสเบอรี (Majumder and Mazumdar, 2002) ในระหว่างการสุก พบว่า การนิ่มเกิดร่วมกับการละลายของสารประกอบเพกทิน ดังนั้น การที่ความแน่นเนื้อของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและละลายน้ำแข็งมีค่าลดลง คาดว่าการแช่เยือกแข็งน่าจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสารประกอบเพกทินของมะม่วง

โดยการศึกษาเป็นการจำลองการเกิดการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะเร่งอย่างรุนแรงที่อาจเกิดในระหว่างการขนส่ง การเก็บรักษา การวางจำหน่าย จนกระทั่งการบริโภค จากการตรวจสอบเอกสาร พบงานวิจัยจำนวนมากศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพโดยใช้การจำลองการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำในสตาร์ช (starch) ชนิดต่างๆ ได้แก่ เจลสตาร์ชข้าว (Arunyanart and Charoenrein, 2008; Charoenrein *et al.*, 2008, 2011) เจลสตาร์ชมันสำปะหลัง (Muadklay and Charoenrein, 2008) เจลสตาร์ชเหหัว (Lan *et al.*, 2008) และขนมปัง (Bhattacharya *et al.*, 2003) ซึ่งยังไม่มีการศึกษาถึงผลของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำในผลไม้ ผู้วิจัยจึงตั้งสมมติฐานว่า จำนวนรอบของการแช่เยือกแข็งและทำลายอาจทำให้โครงสร้างและองค์ประกอบของผนังเซลล์ของมะม่วงเกิดความเสียหาย ซึ่งน่าจะส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของมะม่วงเป็นอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งที่ระดับต่างๆ และการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ต่อการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส โครงสร้างระดับจุลภาค และสารประกอบเพกทินซึ่งเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ ซึ่งคาดว่าผลการศึกษานี้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมที่สามารถนำไปใช้ได้ ตลอดจนได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาเชิงลึกและใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการนิ่มของมะม่วงหลังการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำได้

วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส และสารประกอบเพกทินของมะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองแช่เยือกแข็ง



การตรวจเอกสาร

1. มะม่วง

มะม่วง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Mangifera indica* L. จัดอยู่ในวงศ์ *Anacardiaceae* เป็นไม้ผลเขตร้อนไม่ผลัดใบ มีแหล่งกำเนิดในประเทศอินเดีย และประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ไทย พม่า และมาเลเซีย (Tharanathan *et al.*, 2006) ในปัจจุบันมะม่วงเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของหลายประเทศ โดยเฉพาะประเทศไทยมีการส่งผลมะม่วงไปจำหน่ายต่างประเทศ มีมูลค่าหลายสิบล้านบาท คุณภาพของผลมะม่วงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความต้องการของตลาด และธุรกิจการส่งออกของมะม่วง ผลมะม่วงที่มีคุณภาพดีนั้นต้องมีความแก่ที่เหมาะสม รูปร่างดี สะอาด ผิวพรรณเกลี้ยงเกลา ปราศจากโรคแมลงหรือรอยขีดใดๆ (สนั่น, 2527)

มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เป็นมะม่วงประเภทรับประทานผลสุกที่มีผู้นิยมปลูกกันมาก การเจริญเติบโต ออกดอกมาก ใช้เวลาตั้งแต่ออกดอกจนถึงผลแก่ประมาณ 115 วัน หรือตั้งแต่ติดผลจนถึงผลแก่ประมาณ 90-111 วัน ผลมีขนาดใหญ่ มีน้ำหนักประมาณ 350 กรัม ผลกลมยาว ก้นแหลม เนื้อมาก เมล็ดเล็ก เมื่อดิบมีรสเปรี้ยวจัด ผิวสีเขียวปนขาว เมื่อสุกผิวผลมีสีเหลืองมีกลิ่นหอม รสหวานมีเล็กน้อย เปลือกบางจึงทำให้ชอกช้ำได้ง่าย ถ้าเก็บเกี่ยวเมื่อแก่จัด แล้วนำไปบ่มจะมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (soluble solids) ประมาณ 19-21 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการเก็บเกี่ยวมะม่วงนั้น ความแก่อ่อนในการเก็บเกี่ยวมีความสำคัญโดยตรงต่อคุณภาพของมะม่วงที่ใช้ในการบริโภคและอายุการเก็บรักษา การเก็บเกี่ยวมะม่วงจะเก็บในระยะพัฒนาเต็มที่ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากลักษณะต่างๆ (Tharanathan *et al.*, 2006) เช่น

1. ระยะอ่อน ประมาณ 21 วัน หลังจากวันที่ออกผล เซลล์มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว
2. ระยะการเจริญเติบโตเต็มที่ ประมาณ 21-49 วัน เซลล์มีการขยายและเจริญเติบโต
3. ระยะสุก ประมาณ 49-77 วัน เป็นระยะที่มีการหายใจและพัฒนาไปจนถึงการสุก
4. ระยะสุกงอม ประมาณ 77 วัน ขึ้นไป เป็นระยะหลังการสุกและเริ่มมีเชื้อจุลินทรีย์และเกิดการเน่าเสียขึ้น

องค์ประกอบทางเคมีของมะม่วงแตกต่างกันไปตามพันธุ์ และความแก่อ่อน องค์ประกอบหลักที่พบมากในมะม่วงสุก คือ น้ำ โดยพบว่ามะม่วงสุกมีปริมาณความชื้นสูงมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ คาร์โบไฮเดรตประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเนื้อมะม่วงสุก นอกจากนี้มะม่วง

ยังเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะวิตามินซี เบต้าแคโรทีนและแร่ธาตุ แต่มีปริมาณของโปรตีนและไขมันต่ำ (Tharanathan *et al.*, 2006) คุณค่าทางโภชนาการของมะม่วงสุก ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณค่าทางโภชนาการของมะม่วงสุก

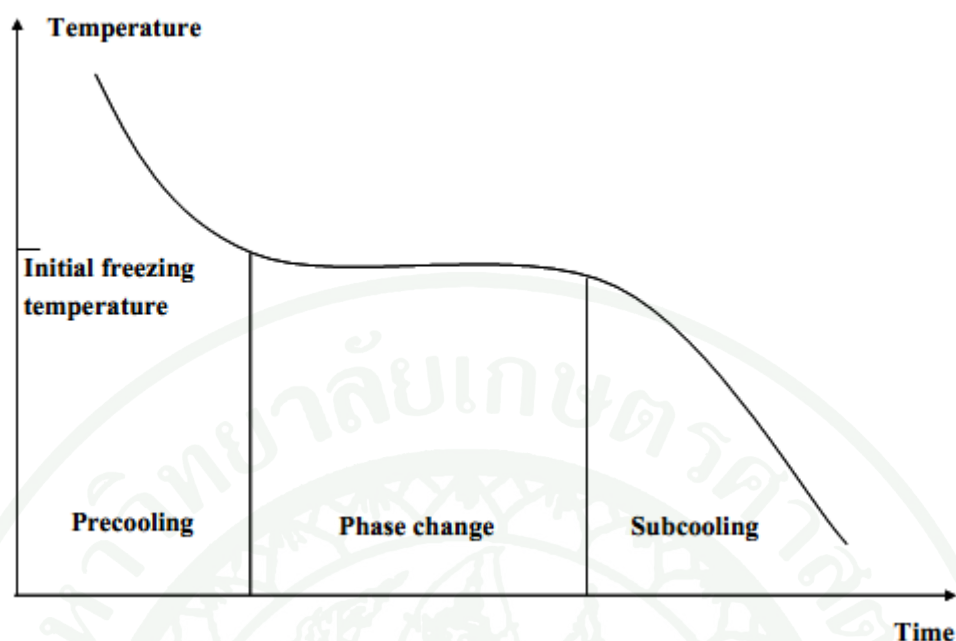
คุณค่าทางโภชนาการ	ปริมาณต่อ 100 กรัมของเนื้อมะม่วงสุก	
	มะม่วง ¹	มะม่วงน้ำดอกไม้ ²
พลังงาน (แคลอรี)	62.1-63.7	60
ความชื้น (กรัม)	78.9-82.8	ไม่มีข้อมูล
โปรตีน (กรัม)	0.36-0.40	0.6
ไขมัน (กรัม)	0.30-0.53	0.3
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	16.20-17.18	15.9
น้ำตาลฟรุกโทส (กรัม)	ไม่มีข้อมูล	3.05
เส้นใย (กรัม)	0.85-1.06	0.5
เถ้า (กรัม)	0.34-0.52	ไม่มีข้อมูล
เบตาแคโรทีน (ไมโครกรัม)	ไม่มีข้อมูล	873
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	6.1-12.8	10
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	5.5-17.9	15
เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.20-0.63	0.3
วิตามินเอ (มิลลิกรัม)	0.135-1.872	0.133
ไทอะมิน (มิลลิกรัม)	0.020-0.073	ไม่มีข้อมูล
ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม)	0.025-0.068	ไม่มีข้อมูล
ไนอะซิน (มิลลิกรัม)	0.025-0.707	ไม่มีข้อมูล
วิตามินซี (มิลลิกรัม)	7.8-172.0	36
ทริปโตเฟน (มิลลิกรัม)	3-6	ไม่มีข้อมูล
เมไทโอนีน (มิลลิกรัม)	4	ไม่มีข้อมูล
ไลซีน (มิลลิกรัม)	32-37	ไม่มีข้อมูล

ที่มา: ¹ Tharanathan *et al.* (2006); ² กรมอนามัย (2544)

2. การแช่เยือกแข็ง

การถนอมอาหารโดยการแช่เยือกแข็งเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้นาน หากมีการดำเนินการอย่างถูกต้องเหมาะสมจะช่วยรักษาคุณภาพทั้งในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นรส สี ไว้ได้สูงมาก เมื่อเทียบกับวิธีถนอมอาหารอื่นๆ แต่จะสามารถรักษาลักษณะเนื้อสัมผัสไว้ได้ปานกลางเท่านั้น แม้ว่าการแช่เยือกแข็งจะเป็นวิธีที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีถนอมอาหารอื่นๆ ก็ตาม แต่ก็ยังมีผลในการทำลายผลิตภัณฑ์ที่นำไปแช่เยือกแข็งได้ ความรุนแรงของการทำลายนั้นขึ้นกับลักษณะของกระบวนการแช่เยือกแข็งและผลิตภัณฑ์ (ไพบูลย์, 2532)

การแช่เยือกแข็งเป็นการดึงความร้อนแฝง (latent heat) และความร้อนสัมผัส (sensible heat) ออกจากอาหารเพื่อทำให้อาหารมีอุณหภูมิลดลงถึง -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารในระหว่างการแช่เยือกแข็ง มีช่วงระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างกัน 3 ช่วง คือ precooling, phase change และ subcooling ดังภาพที่ 1 ในช่วง precooling เป็นช่วงเริ่มต้นของการแช่เยือกแข็ง ความร้อนสัมผัสของอาหารถูกดึงออกมา อุณหภูมิของอาหารจึงลดต่ำลงไปจนถึงจุดที่น้ำอิสระ (free water) เริ่มเกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง (ice crystals) ในช่วง phase change เป็นช่วงของการเปลี่ยนสถานะจากน้ำกลายเป็นน้ำแข็ง เมื่อลดอุณหภูมิลงอย่างต่อเนื่อง ความร้อนแฝงทั้งหมดจะถูกปล่อยออกมาขณะเกิดผลึกน้ำแข็ง ช่วงของการเกิด phase change มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง เนื่องจากส่งผลต่อโครงสร้างของผลึกน้ำแข็ง ส่วนช่วง subcooling เป็นช่วงการลดอุณหภูมิไปจนถึงอุณหภูมิของการแช่เยือกแข็งหรืออุณหภูมิในการเก็บรักษา ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งทั้งหมด ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานความร้อน (Persson and Londahl, 1993; Rahman, 1995; Sun and Zheng, 2006)



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารในระหว่างการแช่เยือกแข็ง

ที่มา: Sun and Zheng (2006)

2.1 หลักการแช่เยือกแข็ง

หลักการพื้นฐานในการแช่เยือกแข็ง คือ การลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำลงจนถึงระดับที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถจะดำเนินปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่อไปได้ ทำให้จุลินทรีย์ในอาหารหยุดการเจริญเติบโตและหยุดกระบวนการทางเมแทบอลิซึม โดยทั่วไปมักใช้อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า ซึ่งหลักการสำคัญ คือ การเปลี่ยนสถานะของน้ำในอาหารที่เป็นของเหลวให้เป็นผลึกน้ำแข็ง เพื่อมิให้น้ำนั้นสามารถทำหน้าที่ต่างๆ ในปฏิกิริยาเคมี (สายสนม, 2546)

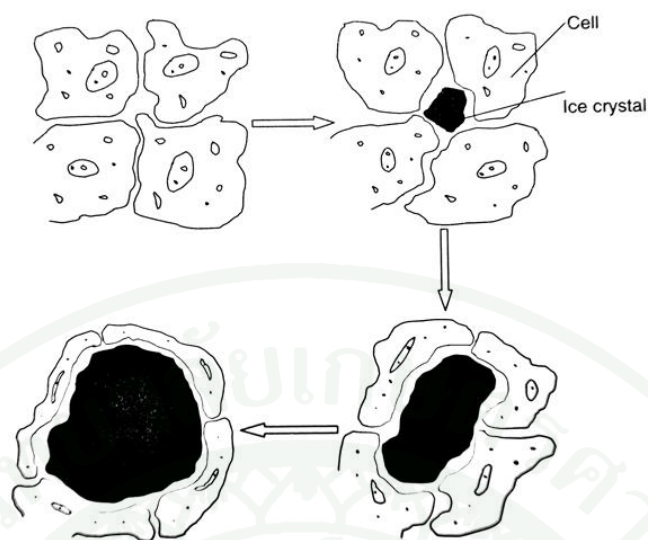
การเกิดผลึกน้ำแข็งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation) และการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (crystal growth) (Fellows, 1990) นิวเคลียสผลึกเริ่มเกิดเมื่อทำให้อุณหภูมิของอาหารต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง โดยโมเลกุลของน้ำมารวมตัวกันอย่างมีระเบียบจนเป็นอนุภาคเล็กๆ ซึ่งสมดุลกับน้ำที่อยู่รอบๆ ส่วนการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งเป็นขั้นตอนที่เกิดต่อเนื่องจากการเกิดนิวเคลียสผลึก โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่จากส่วนที่เป็นของเหลวไปสู่ผิวของผลึกที่เกิดขึ้นและโมเลกุลของตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่ออกจากผลึก ส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยทั่วไปโมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนตัวมาเกาะกับนิวเคลียสผลึกที่ก่อตัวแล้วมากกว่าที่จะ

ก่อนนิวเคลียสผลึกขึ้นใหม่ เพราะ โมเลกุลของน้ำในสภาวะที่เป็นของเหลวมีขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้ในอัตราเร็วสูงและจะหยุดลงเมื่อกระทบกับผิวหน้าของนิวเคลียสผลึก อัตราการก่อนิวเคลียสผลึกและการเพิ่มขนาดผลึกจะเป็นตัวกำหนดขนาดของผลึก ซึ่งมีความสำคัญมาก เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องถึงคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง

2.2 อัตราการแช่เยือกแข็ง (freezing rate)

ในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งจะเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นภายในอาหาร การเปลี่ยนแปลงขนาดของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง หลังการละลายน้ำแข็ง การเพิ่มขนาดของผลึกมักจะเกิดขึ้นในระหว่าง 1 เดือนแรกของการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในสภาวะแช่เยือกแข็ง ถ้าผลึกน้ำแข็งเริ่มต้นมีขนาดเล็กก็จะมีโอกาสในการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งได้น้อยกว่าผลึกน้ำแข็งเริ่มต้นที่มีขนาดใหญ่ (Boast, 1985)

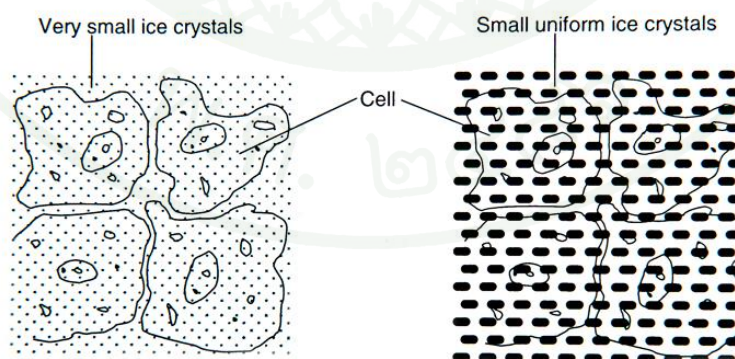
อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งมีความสำคัญ เนื่องจากมีผลต่อขนาดและตำแหน่งของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับคุณภาพของอาหารหลังทำละลายและการยอมรับของผู้บริโภค การแช่เยือกแข็งแบบช้า (slow freezing) ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ภายนอกเซลล์ เนื่องจาก การแช่เยือกแข็งแบบช้ามีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ น้ำภายนอกเซลล์จึงมีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำภายในเซลล์ ดังนั้นน้ำภายนอกเซลล์จึงเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งก่อน ผลึกน้ำแข็งจะมีความดันไอดำกว่าบริเวณภายในเซลล์ น้ำภายในเซลล์ถูกดึงมาเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น (Sun and Zheng, 2006) ทำให้เซลล์หดตัวลง เกิดการแตกของเซลล์ข้างเคียง ดังภาพที่ 2 และเกิดการสูญเสียน้ำรวมทั้งสารที่มีคุณค่าทางอาหารเมื่อผ่านการทำละลาย ทำให้คุณภาพของอาหารลดลง (Fellows, 1990)



ภาพที่ 2 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเนื้อเยื่อระหว่างการแช่เยือกแข็งแบบช้า

ที่มา: Sun and Zheng (2006)

ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (rapid freezing) จะได้ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กสม่ำเสมอกระจายอยู่ทั่วทั้งภายในและภายนอกเซลล์ จึงไม่ทำให้เซลล์เกิดการหดตัว เซลล์เกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 3 ทำให้อาหารที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีคุณภาพดีกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้า (Fellows, 1990)



ภาพที่ 3 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเนื้อเยื่อระหว่างการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

ที่มา: Sun and Zheng (2006)

อัตราการแช่เยือกแข็ง เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระบบการแช่เยือกแข็ง สามารถแบ่งได้เป็นการแช่เยือกแข็งแบบช้า (slow freezing) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (rapid หรือ quick หรือ fast freezing) และการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมาก (ultrarapid freezing) หลักในการกำหนดอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งในระดับต่างๆ นั้น มีอยู่หลายวิธี (สายสนม, 2546) ได้แก่

1. การเปลี่ยนอุณหภูมิต่อหน่วยเวลา ถ้าอุณหภูมิลดลง 1 องศาเซลเซียสต่อนาที จัดได้ว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ถ้าอุณหภูมิลดลง 50 องศาเซลเซียสต่อนาที จัดได้ว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว
2. เวลาที่ผ่านไปในช่วงที่ผลิตภัณฑ์เริ่มเกิดผลึกน้ำแข็งและอุณหภูมิก่อนข้างคงที่ ถ้าอุณหภูมิในช่วงของ phase change กินเวลา 1 ชั่วโมง จัดเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ถ้าอุณหภูมิในช่วงของ phase change กินเวลา 1-2 นาที จัดเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว
3. ลักษณะการเกิดขึ้นของผิวหน้าของน้ำแข็ง (nature of ice front) ถ้ามีน้ำแข็งเกิดขึ้นเป็นแผ่นจนแยกส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลวได้ จัดว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ถ้าการเกิดผลึกน้ำแข็งเป็นจำนวนมากมายไม่มีชั้นแยกแสดงให้เห็นชัดเจนแต่สามารถแยกชั้นให้เห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ถ้าการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กมองไม่เห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมาก
4. ความเร็วของการเกิดผิวหน้าน้ำแข็ง (velocity of ice front) อัตราการแช่เยือกแข็งตัดสินโดยอาศัยความเร็วของผิวหน้าน้ำแข็งที่เคลื่อนที่เข้าไปจากผิวนอกของผลิตภัณฑ์เป็นหน่วยระยะทางต่อเวลา (เซนติเมตรต่อชั่วโมง) เช่น ถ้าเกิดผิวหน้าน้ำแข็งด้วยอัตรา 0.1-0.3 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ถือว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ถ้าเกิดผิวหน้าน้ำแข็งด้วยอัตรา 0.3-1 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ถือว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งปกติ ถ้าเกิดผิวหน้าน้ำแข็งด้วยอัตรา 1-10 เซนติเมตรต่อชั่วโมง จัดเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว
5. ตำแหน่งที่เกิดผลึกน้ำแข็ง ถ้าเป็นการแช่เยือกแข็งแบบช้าผลึกน้ำแข็งจะเกิดนอกเซลล์ แต่ถ้าเป็นการแช่เยือกแข็งแบบเร็วผลึกน้ำแข็งจะเกิดในเซลล์ด้วย

ส่วน International Institute of Refrigeration (IIR) ระบุว่าอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถคำนวณได้จากการใช้ความลึก (เซนติเมตร) ของตัวอย่างจากผิวด้านนอกเข้าไปถึงใจกลาง ตัวอย่าง หาร์ดวอร์ชช่วงเวลา (ชั่วโมง) โดยเริ่มคำนวณจากระยะเวลาเมื่อผิวด้านนอกตัวอย่างมีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จนถึงเวลาที่ใจกลางตัวอย่างมีอุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส IIR กำหนดเกณฑ์ของอัตราการแช่เยือกแข็ง คือ ถ้าการแช่เยือกแข็งมีอัตราเร็วต่ำกว่า 1 เซนติเมตรต่อชั่วโมง จัดว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (slow) ถ้าการแช่เยือกแข็งมีอัตราเร็วเป็น 1-5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง จัดว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบกึ่งเร็ว (semi-quick) ถ้าการแช่เยือกแข็งมีอัตราเร็วเป็น 5-10 เซนติเมตรต่อชั่วโมง จัดว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (quick) ถ้าการแช่เยือกแข็งมีอัตราเร็วมากกว่า 10 เซนติเมตรต่อชั่วโมง จัดว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมาก (very quick)

สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารบางอย่างต้องการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ได้ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กจำนวนมาก และก่อให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด แต่ในบางผลิตภัณฑ์อัตราการแช่เยือกแข็งอาจไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และในบางผลิตภัณฑ์อาจไม่เหมาะสมต่อการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (รุ่งนภา, 2535) ดังนั้น การใช้อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสม จะทำให้ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งมีคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสที่ดี ซึ่งอัตราเร็วที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งจะแตกต่างกันในผลไม้แต่ละชนิด จากการตรวจสอบเอกสาร มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพผักและผลไม้แช่เยือกแข็ง ได้แก่

Chassagne-Berces *et al.* (2010) ศึกษาอัตราการแช่เยือกแข็ง 3 ระดับ คือ การแช่เยือกแข็งแบบช้าที่อัตราเร็ว 1 องศาเซลเซียสต่อนาที (-20 องศาเซลเซียส) การแช่เยือกแข็งแบบปานกลางที่อัตราเร็ว 8 องศาเซลเซียสต่อนาที (-80 องศาเซลเซียส) และการแช่เยือกแข็งแบบเร็วที่อัตราเร็ว 310 องศาเซลเซียสต่อนาที (-196 องศาเซลเซียส) ต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (firmness และ young's modulus) ในผลไม้ 2 ชนิด คือ มะม่วงพันธุ์ *Mangifera indica* L. cv. "KENT" และแอปเปิ้ล 2 พันธุ์ (Golden Delicious; Go และ Granny Smith; Gr) พบว่า การแช่เยือกแข็งทำให้ค่าเนื้อสัมผัส (firmness และ young's modulus) ลดลง โดยการแช่เยือกแข็งมีผลต่อเนื้อสัมผัสของแอปเปิ้ลมากกว่ามะม่วง ซึ่งการแช่เยือกแข็งที่ -80 องศาเซลเซียส ทำลายเนื้อสัมผัสของมะม่วงและแอปเปิ้ลน้อยที่สุด ขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบช้า (-20 องศาเซลเซียส) และการแช่เยือกแข็งที่ -196 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าเนื้อสัมผัสของมะม่วงและแอปเปิ้ลต่ำกว่าการแช่เยือกแข็งที่ -80 องศาเซลเซียส เนื่องจากการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กจำนวนมาก จึงทำลายเนื้อสัมผัสน้อยกว่า ขณะที่การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งจำนวนน้อยแต่มีขนาดใหญ่ ซึ่งทำลายเนื้อสัมผัสได้มากกว่า และการแช่เยือกแข็งที่

-196 องศาเซลเซียส ทำให้เซลล์เกิดการแตก ส่งผลให้เนื้อสัมผัสถูกทำลายเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ การกำจัดน้ำออกจากตัวอย่างร่วมกับการทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็ก จะทำให้รอยแตกของผนังเซลล์เกิดน้อยลงและเนื้อสัมผัสถูกทำลายน้อยกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้า อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยไม่ได้ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพกทิน และปริมาณของเหลวที่สูญเสีย หลังการละลายน้ำแข็ง ซึ่งอาจใช้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลไม้ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งที่ต่างกันได้

Chassagne-Berces *et al.* (2009) ศึกษาอัตราการแช่เยือกแข็ง 3 ระดับ คือ การแช่เยือกแข็งแบบช้าที่อัตราเร็ว 0.9 องศาเซลเซียสต่อนาที (-20 องศาเซลเซียส) การแช่เยือกแข็งแบบปานกลางที่อัตราเร็ว 8.1 องศาเซลเซียสต่อนาที (-80 องศาเซลเซียส) และการแช่เยือกแข็งแบบเร็วที่อัตราเร็ว 310 องศาเซลเซียสต่อนาที (-196 องศาเซลเซียส) ต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (firmness และ young's modulus) และโครงสร้างระดับจุลภาคของแอปเปิ้ล พบว่า การแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (-80 องศาเซลเซียส) ทำให้ความแน่นเนื้อ (firmness) ของแอปเปิ้ลลดลงน้อยที่สุด (54 เปอร์เซ็นต์) รองลงมาคือการแช่เยือกแข็งแบบช้า (-20 องศาเซลเซียส) และแบบเร็ว (-196 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีความแน่นเนื้อลดลง 79 และ 91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วมีค่า young's modulus ลดลง 97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่มีค่า young's modulus ลดลงถึง 99 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโครงสร้างของเซลล์ เมื่อศึกษาด้วย macrovision พบว่า การแช่เยือกแข็งแบบช้า (-20 องศาเซลเซียส) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลล์ โดยผนังเซลล์เกิดการยุบตัวลง ทำให้ช่องว่างระหว่างเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (-80 องศาเซลเซียส) ทำให้โครงสร้างของเซลล์มีลักษณะคล้ายกับแอปเปิ้ลสดมากที่สุด ขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (-196 องศาเซลเซียส) ทำให้เซลล์เกิดรอยแตกขึ้น ส่วนลักษณะของแวคิวโอล เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดคอนโฟคอล เลเซอร์สแกนนิ่ง สามารถสังเกตเห็นแวคิวโอลได้ชัดเจนเต็มเซลล์ในแอปเปิ้ลสด ขณะที่แอปเปิ้ลที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วต่างๆ ทำให้แวคิวโอลเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยโตนพลาสซึ่งอยู่รอบๆ แวกิวโอลถูกทำลายหลังจากแอปเปิ้ลผ่านการแช่เยือกแข็ง นอกจากนี้ เมื่อศึกษานาฬิกาของผลึกน้ำแข็ง ด้วย cryo-scanning electron microscopy พบว่า แอปเปิ้ลที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (-196 องศาเซลเซียส) เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กจำนวนมาก และการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (-80 องศาเซลเซียส) ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย ซึ่งการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วทั้งสองนี้มีผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร ขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบช้า (-20 องศาเซลเซียส) ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ที่สุด โดยมีขนาด 10-30 ไมโครเมตร ทำให้รูปร่างของผนังเซลล์ผิดปกติมากกว่าการแช่เยือกแข็งที่อัตราเร็วอื่นๆ

Sousa *et al.* (2007) ศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและอัตราการทำละลายต่อเนื้อสัมผัสและลักษณะทางประสาทสัมผัสของราสเบอร์รี่และแบล็คเบอร์รี่ โดยศึกษาอัตราการแช่เยือกแข็ง 4 ระดับ คือ การแช่เยือกแข็งด้วยไนโตรเจนเหลว (อัตราเร็วสูง) การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -88, -40 และ -24 องศาเซลเซียส และอัตราการทำละลาย 2 ระดับ คือ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และ 5 องศาเซลเซียส พบว่า การแช่เยือกแข็งราสเบอร์รี่ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส อัตราเร็ว 3.3 องศาเซลเซียสต่ออนาที ทำละลายที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส อัตราเร็ว 0.05 องศาเซลเซียสต่ออนาที และการแช่เยือกแข็งแบล็คเบอร์รี่ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส อัตราเร็ว 2.2 องศาเซลเซียสต่ออนาที ทำละลายที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส อัตราเร็ว 0.12 องศาเซลเซียสต่ออนาที ทำให้เนื้อเยื่อของพารนไคมาีความสมบูรณ์มากที่สุด และมีความแน่นเนื้อสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการแช่เยือกแข็งที่อัตราเร็วอื่นๆ ขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบความเร็วสูงในผลไม้ทั้งสองชนิดทำให้โครงสร้างของเซลล์ถูกทำลาย เกิดการแตกของผนังเซลล์ เมื่อนำมาทำละลายทำให้ของเหลวภายในเซลล์ไหลซึมออกมา และเซลล์สูญเสียความดันเต่ง อย่างไรก็ตาม การแช่เยือกแข็งที่ความเร็วสูงทำลายโครงสร้างเซลล์ของแบล็คเบอร์รี่น้อยกว่าราสเบอร์รี่ นอกจากนี้ ผู้ทดสอบสามารถระบุความแตกต่างของความแน่นเนื้อระหว่างราสเบอร์รี่สดและราสเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งได้ ขณะที่ในแบล็คเบอร์รี่ผู้ทดสอบไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ แสดงว่าโครงสร้างของแบล็คเบอร์รี่สามารถทนสภาวะในการแช่เยือกแข็งและการทำละลายได้ดีกว่าราสเบอร์รี่

Van Buggenhout *et al.* (2006) ศึกษาอัตราการแช่เยือกแข็งต่อค่าความแข็ง (hardness) และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (drip loss) ของสตรอเบอร์รี่ โดยศึกษาอัตราการแช่เยือกแข็ง 4 ระดับ คือ การแช่เยือกแข็งแบบช้า (-18 องศาเซลเซียส) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (-25 องศาเซลเซียส) การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก (-80 องศาเซลเซียส) และการแช่เยือกแข็งด้วยความดันสูง (อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส ความดัน 200 เมกะปาสกาล) พบว่า การแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้ค่าความแข็ง ลดลง 87 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับสตรอเบอร์รี่สด และมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง 40 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้สตรอเบอร์รี่มีค่าความแข็งมากกว่าการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วอื่นๆ เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งไม่แตกต่างกันมาก

Otero *et al.* (2000) ศึกษาอัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงและพีชทั้งลูก โดยเปรียบเทียบวิธีการแช่เยือกแข็งแบบช้า (air-blast) การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก และการแช่เยือกแข็งโดยใช้ความดันสูง (high pressure shift freezing: HPSF) อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ความดัน 200 เมกะปาสกาล พบว่า การแช่เยือกแข็งแบบช้า ก่อให้เกิดความเสียหายกับเซลล์มากที่สุด

เนื่องจากเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ตัวอย่างถูกทำลายจากผิวหน้าไปสู่บริเวณศูนย์กลางของผล ขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กจำนวนมากทั้งภายในและภายนอกเซลล์ แม้ว่าการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีนี้จะมีอัตราเร็วว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้าเป็นสองเท่า แต่ยังคงทำให้ตัวอย่างเกิดความเสียหายโดยเกิดรอยแตกที่ผนังเซลล์ของมะม่วงและพีช ส่วนการแช่เยือกแข็งด้วยความดันสูงมีอัตราการแช่เยือกแข็งต่ำกว่าการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก แต่การแช่เยือกแข็งด้วยความดันสูงไม่ทำให้เกิดรอยแตกขึ้น เนื่องจากเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กและสม่ำเสมอกระจายทั่วทั้งตัวอย่าง ในระหว่างการแช่เยือกแข็งมีการปลดปล่อยความดัน เพื่อลดและป้องกันการขยายตัวของผลึกน้ำแข็ง ดังนั้น การแช่เยือกแข็งโดยใช้ความดันสูงเป็นวิธีการแช่เยือกแข็งที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ซึ่งไม่ทำให้เกิดรอยแตกขึ้น

Allan-Wojtas *et al.* (1999) ศึกษาอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งบลูเบอร์รี่ โดยใช้ความเร็วลมในการแช่เยือกแข็งต่างกัน ที่อัตราการแช่เยือกแข็ง 3 ระดับ คือ การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (อุณหภูมิ -34 องศาเซลเซียส, 150 วินาที) การแช่เยือกแข็งแบบปานกลางโดยใช้ IQF (อุณหภูมิ -34 องศาเซลเซียส, 330 วินาที) และการแช่เยือกแข็งแบบช้า (อุณหภูมิ -34 องศาเซลเซียส, 21 ชั่วโมง) ต่อปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง เบอร์รี่ที่ถูกทำลาย (damaged berries) การรั่วไหลของแอนโทไซยานิน (anthocyanin leakage) และโครงสร้างระดับจุลภาค พบว่า การแช่เยือกแข็งแบบช้ามีปริมาณเบอร์รี่ที่ถูกทำลาย และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งมากที่สุด ขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบปานกลางมีการรั่วไหลของแอนโทไซยานินมากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้า เมื่อศึกษาโครงสร้างเซลล์ของบลูเบอร์รี่ด้วย cold stage scanning electron microscopy (cryo-SEM) พบว่า อัตราการแช่เยือกแข็งมีผลต่อเซลล์ โดยการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถสังเกตเห็นชนิดของเนื้อเยื่อและโครงสร้างของเซลล์ได้อย่างชัดเจน เซลล์พารานโคไมมีความเด่นเพิ่มขึ้นและมีน้ำแข็งอยู่ภายนอกเซลล์เล็กน้อย เกิดรอยแตกขึ้นบ้าง องค์ประกอบของเซลล์ส่วนใหญ่ยังไม่ถูกทำลายมากนัก ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการเคลือบด้วยไข (waxy) บนผนังเซลล์ ขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบช้ามีน้ำแข็งอยู่ภายนอกเซลล์เป็นจำนวนมาก เกิดรอยแตกขนาดใหญ่และผนังเซลล์ฉีกขาด ทำให้เกิดการรั่วไหลของของเหลวภายในเซลล์ในระหว่างการทำละลายน้ำแข็ง เซลล์มีลักษณะหดตัว เนื่องจากการสูญเสีย น้ำ เซลล์มีรูปร่างผิดปกติ สามารถระบุองค์ประกอบของเซลล์ได้เพียงบางตำแหน่งเท่านั้น ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางทำให้เกิดรอยแตกที่ผนังเซลล์เป็นบางแห่ง มีน้ำแข็งเป็นชั้นบางๆ ปกคลุมบางส่วนของเซลล์

Kidmose and Kaack (1999) ศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีต่างๆ (cryogenic freezing และ blast freezing) ต่อเนื้อสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการของหน่อไม้ฝรั่ง พบว่า การแช่เยือกแข็งด้วยวิธี cryogenic freezing และ blast freezing ทำให้เนื้อสัมผัส (shear force) ปริมาณวิตามินซี คลอโรฟิลล์และ dietary fibre ไม่แตกต่างกัน ขณะที่การแช่เยือกแข็งด้วยวิธี cryogenic freezing สามารถลดปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งได้มากกว่าการแช่เยือกแข็งด้วยวิธี blast freezing

ศุติพร (2540) ศึกษาผลของชนิดเครื่องแช่เยือกแข็ง 2 ชนิด คือ air blast freezer และ cryogenic freezer ในมะม่วง 2 พันธุ์ คือ พันธุ์น้ำดอกไม้และพันธุ์โชคอนันต์ ต่อความแน่นเนื้อ การสูญเสียน้ำหนักหลังละลายน้ำแข็ง ปริมาณวิตามินซี การเกิดสีน้ำตาล การยอมรับด้านสี ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม พบว่า มะม่วงทั้ง 2 พันธุ์ ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง cryogenic freezer สูญเสียน้ำหนักหลังละลายน้ำแข็งและเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง air blast freezer ขณะที่มะม่วงทั้ง 2 พันธุ์ ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง cryogenic freezer มีความแน่นเนื้อ ปริมาณวิตามินซี การยอมรับด้านสี ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงกว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง air blast freezer นอกจากนี้ ศึกษาผลของอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง cryogenic freezer 3 ระดับ คือ อุณหภูมิ -70, -90 และ -110 องศาเซลเซียส พบว่า การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -90 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งมะม่วงทั้ง 2 พันธุ์ ทำให้มะม่วงมีการสูญเสียน้ำหนักหลังละลายน้ำแข็งต่ำ ขณะที่มีความแน่นเนื้อและความชอบโดยรวมสูงกว่าการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -70 และ -110 องศาเซลเซียส

ศรีสุวรรณ (2533) ศึกษาผลของชนิดเครื่องแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็ง โดยแช่เยือกแข็งเงาะพันธุ์โรงเรียนด้วย air blast freezer และ plate freezer พบว่า การแช่เยือกแข็งด้วย air blast freezer ทำให้การสูญเสียน้ำหนักของเงาะที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง และการเกิดสีน้ำตาลสูงกว่าการแช่เยือกแข็งด้วย plate freezer ขณะที่การแช่เยือกแข็งด้วย plate freezer ได้รับคะแนนการยอมรับด้านเนื้อสัมผัสสูงกว่าการแช่เยือกแข็งด้วย air blast freezer และศึกษาลิ้นจี่พันธุ์โสมฮวยปอกเปลือกและควั่นเมล็ดแช่เยือกแข็งด้วย air blast freezer, plate freezer และ cryogenic freezer พบว่า การแช่เยือกแข็งด้วย air blast freezer และ plate freezer ทำให้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งสูงกว่าการแช่เยือกแข็งด้วย cryogenic freezer ขณะที่การแช่เยือกแข็งด้วย cryogenic freezer มีความแน่นเนื้อ ปริมาณวิตามินซี และคะแนนการยอมรับด้านเนื้อสัมผัสสูงกว่าการแช่เยือกแข็งด้วย air blast freezer และ

plate freezer นอกจากนี้ ศึกษาถึงสิ่งที่ต้องเลือกแช่เยือกแข็งด้วย air blast freezer และ cryogenic freezer พบว่า การแช่เยือกแข็งด้วย air blast freezer ทำให้การสูญเสียน้ำหนักของสินค้าที่ผ่านการแช่เยือกแข็งสูงกว่าการแช่เยือกแข็งด้วย cryogenic freezer ขณะที่การแช่เยือกแข็งด้วย cryogenic freezer มีปริมาณวิตามินซีสูงกว่าการแช่เยือกแข็งด้วย air blast freezer จากผลการทดลองนี้ พบว่า การแช่เยือกแข็งด้วย cryogenic freezer ทำให้ผลไม้มີคุณภาพดีที่สุด เนื่องจากการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วเซลล์ ส่งผลให้เนื้อเยื่อของผลไม้เกิดความเสียหายน้อย ขณะที่การแช่เยือกแข็งด้วย air blast freezer และ plate freezer เป็นการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งช้ากว่า ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่กว่าและอยู่ภายนอกเซลล์ ซึ่งสามารถทำลายเนื้อเยื่อของผลไม้ได้มากกว่า

2.3 การทำละลายอาหารแช่เยือกแข็ง (thawing)

การทำละลายอาหารแช่เยือกแข็ง หมายถึง กระบวนการที่ตรงข้ามกับการแช่เยือกแข็ง จัดเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง เพื่อให้ผลึกน้ำแข็งละลายกลับสู่สภาพเดิม ก่อนที่จะนำผลิตภัณฑ์ไปบริโภคหรือแปรรูปต่อไป โดยเวลาที่ใช้ในการทำละลายอาหารแช่เยือกแข็งเป็นเวลาที่เริ่มจากจุดที่อาหารมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการเก็บรักษาจนถึงจุดที่ไม่มีผลึกน้ำแข็งคงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ หรืออาจอธิบายได้ว่า เป็นเวลาที่อุณหภูมิใจกลางของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1 หรือ 0 องศาเซลเซียส (มนต์ราม, 2550) การทำละลายอาหารแช่เยือกแข็งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปล่อยให้ละลายตามธรรมชาติที่อุณหภูมิ 18-20 องศาเซลเซียส การปล่อยให้ น้ำไหลผ่านผลิตภัณฑ์ และการทำละลายในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิ 4-6 องศาเซลเซียส เป็นต้น (รัชนิ, 2541)

2.4 การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ (freeze-thaw cycles)

การเก็บรักษาโดยวิธีแช่เยือกแข็ง เป็นวิธีการถนอมรักษาอาหารที่มีประสิทธิภาพ โดยสามารถป้องกันการเน่าเสียของอาหารได้ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งอาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการขนส่ง การเก็บรักษา และการวางจำหน่าย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เกิดการละลายน้ำแข็งและการแช่เยือกแข็งซ้ำ (สุทธวัฒน์, 2548; Jittinandana *et al.*, 2005) คุณภาพของอาหารก็จะลดลงเช่นเดียวกับการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (Karel *et al.*, 1975; Fellows, 1990) ซึ่งมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อของผลไม้และผลิตภัณฑ์หลังการละลายน้ำแข็ง มีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (drip loss)

เพิ่มขึ้น (Pham and Mawson, 1997) ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งนี้เป็นดัชนีประเมินความเสียหายที่เซลล์ได้รับจากการแช่เยือกแข็ง (Skrede, 1996)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งเป็นอย่างมาก จากการตรวจเอกสาร มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ได้แก่

Surjadinata *et al.* (2001) ศึกษาผลของความชื้นเริ่มต้นก่อนการแช่เยือกแข็ง (3 และ 5 เปอร์เซ็นต์) และจำนวนรอบในการแช่เยือกแข็งและการทำละลาย (0, 1, 3, 6, 9 และ 12 รอบ) ต่อเนื้อสัมผัสของ pecan โดยนำ pecan แช่ในตู้แช่เยือกแข็งข้ามคืน แล้วนำมาทำละลาย หลังจากนั้นนำ pecan กลับไปแช่ในตู้แช่เยือกแข็งซ้ำ วิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วย TPA หลังจากแช่เยือกแข็งและทำละลาย 0, 1, 3, 6, 9 และ 12 รอบ พบว่า การแช่เยือกแข็งซ้ำมีผลต่อเนื้อสัมผัสของ pecan ทำให้ค่าเนื้อสัมผัส gumminess และ chewiness มีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง cycles ขณะที่การแช่เยือกแข็งที่ความชื้นเริ่มต้น 3 เปอร์เซ็นต์ มีการเปลี่ยนแปลงค่า hardness, fracturability, gumminess และ chewiness ระหว่าง cycles ที่ 9 และ 12 และที่ความชื้นเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์ ค่า hardness, fracturability และ springiness เปลี่ยนแปลงระหว่าง cycles ที่ 1 และ 3 นอกจากนี้ เมื่อจำนวนรอบในการแช่เยือกแข็งและการทำละลายเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเนื้อสัมผัสลดลง เมื่อวิเคราะห์ด้วย TPA โดย pecan ที่มีความชื้นเริ่มต้น 3 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเนื้อสัมผัสลดลงน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์

Gormley *et al.* (2002) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสตอเบอร์รี่ เมื่อแช่เยือกแข็งด้วย blast freezer ที่อัตราเร็ว 3.75 เมตรต่อวินาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำสตอเบอร์รี่มาเก็บรักษาเป็นเวลา 8 เดือน ที่สภาวะต่างๆ ดังนี้ 1.) อุณหภูมิผันผวน โดยใช้อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ เก็บที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-14 ชั่วโมง แล้วนำออกมาเก็บที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 34-38 ชั่วโมง จากนั้นนำกลับมาเก็บที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-22 ชั่วโมง ต่อเนื่องกัน หลังจากนั้นนำมาเก็บที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 เดือน 2.) อุณหภูมิคงที่ ที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส และ 3.) อุณหภูมิคงที่ ที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส พบว่า หลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 0, 1, 2, 4 และ 8 เดือน แล้วนำสตอเบอร์รี่มาทำละลายที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 15 ชั่วโมง วิเคราะห์ลักษณะทางประสาทสัมผัส เนื้อสัมผัส (shear) ค่าสี ปริมาณวิตามินซี พบว่า การเก็บสตอเบอร์รี่ที่อุณหภูมิผันผวน มีความเหนียว (toughness) สูงกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส และ -60 องศาเซลเซียส ขณะที่เก็บสตอเบอร์รี่ที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส สามารถรักษาวิตามินซีไว้ได้ดี แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสีมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบ

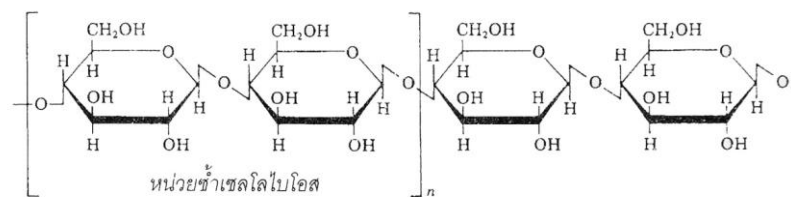
กับสีของสโตรเบอร์รีสด นอกจากนี้ระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อค่าสี โดยทำให้ค่าสี hunter 'a' ลดลง เมื่อเก็บเป็นเวลา 8 เดือน และค่า hue angle มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีการสูญเสียค่าสี redness เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษา

Fahloul *et al.* (1996) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษา โดยนำถั่ว pea testa ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำกลับไปไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำซ้ำเป็นจำนวน 3 รอบ วิเคราะห์ค่า fracture toughness และศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเซลล์ของถั่ว pea testa ที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง เมื่อนำถั่ว pea testa มาแช่เยือกแข็งและทำละลายจำนวน 3 รอบ ทำให้ค่า fracture toughness ลดลง 18 เปอร์เซ็นต์ ผลึกน้ำแข็งที่เกิดจากการแช่เยือกแข็ง-ละลาย น้ำแข็งสามารถทำลายเซลล์พารานไคมาของถั่ว pea testa ได้ ขณะที่ macrosclereid cells ไม่ถูกทำลายภายใต้สภาวะนี้

3. องค์ประกอบของผนังเซลล์พืช

ผนังเซลล์ของพืชประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตประมาณ 90-95 เปอร์เซ็นต์ และโปรตีนเพียง 5-10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น องค์ประกอบย่อยของคาร์โบไฮเดรตสามารถจำแนกตามการละลายได้ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และเพกทิน (pectin) (จริงแท้, 2549)

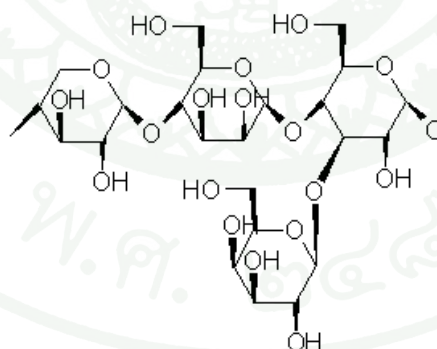
1. เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์เส้นยาวประกอบขึ้นจากหน่วยซ้ำของเซลโลไบโอส ซึ่งมีกลูโคสแต่ละตัวยึดกันอยู่ด้วยพันธะ β -1,4 ดังภาพที่ 4 จึงเรียกว่า β -1,4-glucan แต่ละโมเลกุลมีน้ำตาลกลูโคสมากถึง 2,000-20,000 โมเลกุล และเชื่อมเกาะกับโมเลกุลของเซลลูโลสอื่นๆ ด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นกลุ่มๆ กลุ่มละ 40 คู่ เรียกโครงสร้างในลักษณะนี้ว่าไมโครไฟบริล (microfibril) (McNeil *et al.*, 1984) เซลลูโลสจะฝังอยู่ในเมทริกซ์ของ noncellulosic polysaccharides และโปรตีน (Fischer and Bennett, 1991) ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ (primary cell wall)



ภาพที่ 4 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: วรรณ (2551)

2. เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลต่างชนิดกัน เช่น ไซโลกลูเคน (xyloglucan) กลูโคแมนแนน (glucomannan) และกาแล็กโทกลูโคแมนแนน (galactoglucomannan) (ภาพที่ 5) เป็นต้น (Tucker and Grierson, 1987) เฮมิเซลลูโลสในพืชใบเลี้ยงคู่ส่วนใหญ่เป็น ไซโลกลูเคนที่มี β -1,4-glucan เป็นแกนหลักของโมเลกุลเหมือนเซลลูโลส และมีน้ำตาลไซโลส (xylose) และกาแล็กโทส (galactose) เป็นโซ่ข้าง (Hayashi, 1989) เฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เชื่อม ไมโครไฟบริลของเซลลูโลสเข้าด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Keegstra *et al.*, 1973) และเชื่อมต่อกับเพกทินด้วยพันธะโคเวเลนต์ (McNeil *et al.*, 1984) มีสะสมอยู่บริเวณผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ



- Xylose - β (1,4) - Mannose - β (1,4) - Glucose -
- α (1,3) - Galactose

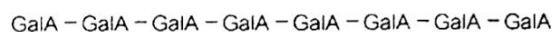
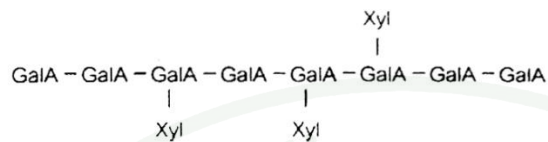
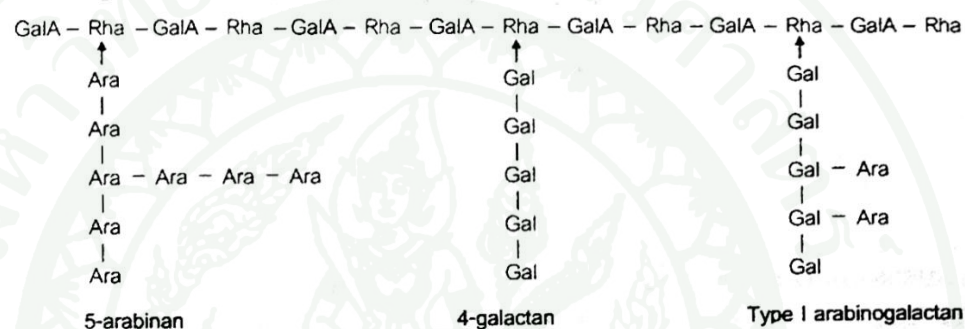
Hemicellulose

ภาพที่ 5 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: Carpita and McCann (2000)

3. เพกทินเป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีโครงสร้างของโมเลกุลค่อนข้างซับซ้อน

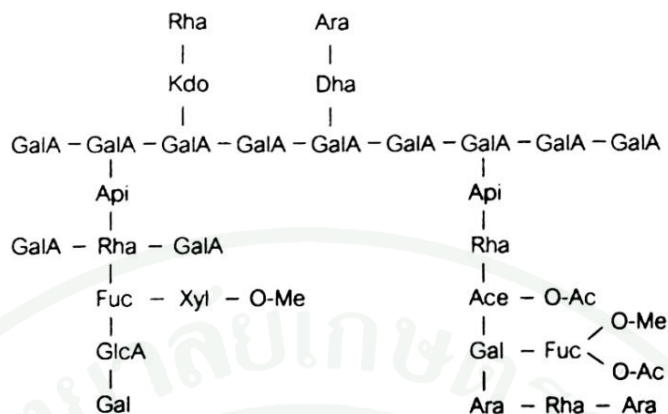
ประกอบด้วยกรดของน้ำตาลกาแล็กโทส หรือกรดกาแล็กทูโรนิก (galacturonic acid) เป็นหลัก มักมีแขนงซับซ้อน เพกทินที่พบมากมี 3 ชนิด ได้แก่ โฮโมกาแล็กทูโรแนน (homogalacturonan) ซึ่งเป็นโมเลกุลสายยาวของกรดกาแล็กทูโรนิกไม่มีแขนง (ภาพที่ 6ก) และมักมีกลุ่มเมทิล (methyl) เกาะที่กลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl) ของกรดกาแล็กทูโรนิก หรือมีน้ำตาลไซโลสเกาะกับโมเลกุลของกรดกาแล็กทูโรนิก (ภาพที่ 6ข) ซึ่งได้แก่ ไซโลกาแล็กทูโรแนน (xylogalacturonan) เพกทินอีกชนิดหนึ่งที่พบมาก ได้แก่ rhamnogalacturonan I (RG I) เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเรมโนส (rhamnose) สลับกับกรดกาแล็กทูโรนิก และมีแขนงของ β -galactan, α -arabinan หรือ อะราบินโนกาแล็กแทน (arabinogalactan) ณ ตำแหน่งของน้ำตาลเรมโนส (ภาพที่ 6ค) นอกจากนี้ยังมีเพกทินที่เปลี่ยนแปลงมาจากโฮโมกาแล็กทูโรแนน ได้แก่ rhamnogalacturonan II (RG II) ซึ่งมีแกนหลักเป็นโฮโมกาแล็กทูโรแนน แต่มีแขนงต่างกันถึง 4 แบบ แต่ละแขนงประกอบด้วยน้ำตาลชนิดต่างๆ (ภาพที่ 7) และอาจเกาะกันเป็นไดเมอร์โดยอาศัยอะตอมของโบรอนเป็นตัวเชื่อม เพกทินเหล่านี้เรียงตัวกันเป็นโครงข่ายประสานกับไมโครไฟบริลของเซลลูโลส (ภาพที่ 8) ทำให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรงขึ้น ทั้งนี้โดยอาศัยแขนงของ rhamnogalacturonan I เช่น อะราบินแนน (arabinan) (จริงแท้, 2549) ส่วนในบริเวณมิดเดิลลามลล่า (middle lamella) ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างเซลล์นั้น พบเพกทินเป็นส่วนใหญ่และเชื่อมต่อกัน ทำให้เซลล์ 2 เซลล์ เชื่อมติดกัน (Skrede, 1996) ดังภาพที่ 9 สารประกอบเพกทินประกอบด้วยพอลิเมอร์ 3 ชนิด คือ กรดเพกติก เพกทิน และ โปรโทเพกทิน (Kays, 1991)

(ก) **homogalacturonan (HGA)**(ข) **xylogalacturonan**(ค) **rhamnogalacturonan I (RG I)**

ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของเพกทินชนิดต่างๆ : (ก) homogalacturonan (ข) xylogalacturonan (ค) rhamnogalacturonan I, GalA = galacturonic acid

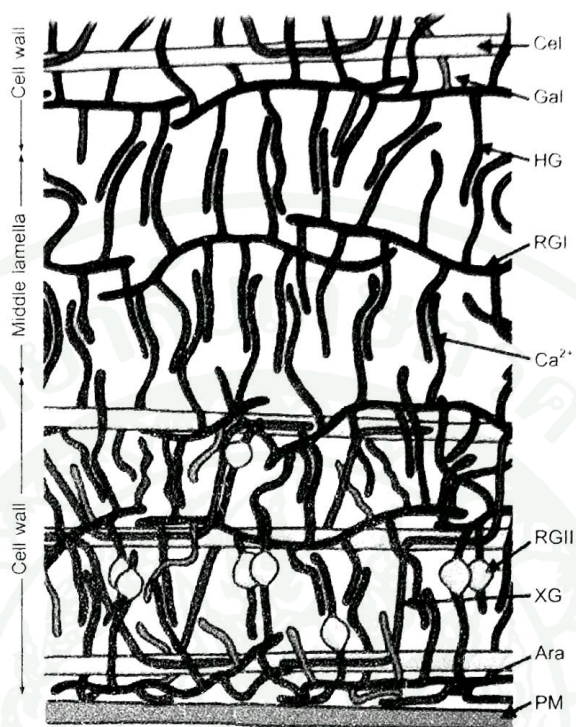
ที่มา: คัดแปลงจาก Carpita and McCann (2000)

RG II monomer



ภาพที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของ rhamnogalacturonan II ซึ่งมีไฮโมกาเล็กทูโรแนนเป็นแกนหลัก และมีแขนงหลัก 4 แขนง ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด Kdo = 3-deoxy-D-manno-2-octulosonic acid, Dha = 3-deoxy-D-lyxo-2-heptulosaric acid, Ace = Aceric acid (3-C'-carboxy-5-deoxy-L-xylose), Ome = O-methyl, OAc = O-acetyl

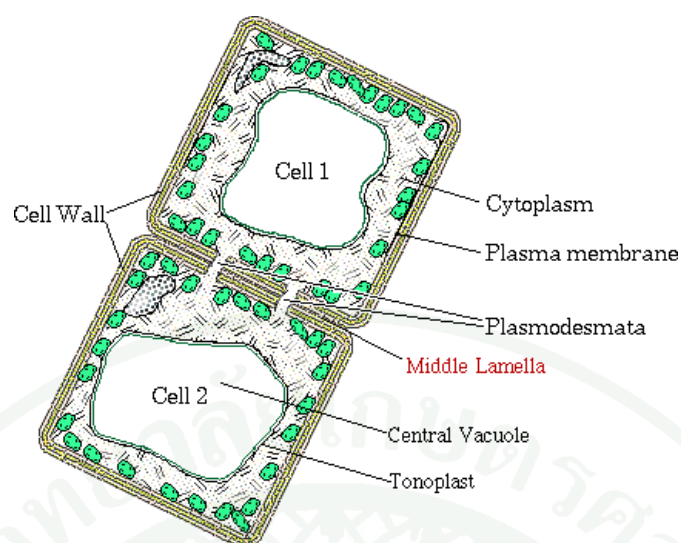
ที่มา: คัดแปลงจาก Carpita and McCann (2000)



ภาพที่ 8 การเชื่อมต่อของเพกทินบริเวณมิดเดิลลามลล่า

ในบริเวณรอยต่อระหว่างเซลล์หรือมิดเดิลลามลล่า องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเพกทินที่มีโมเลกุลของ rhamnogalacturonan I (RG I) เป็นแกนหลัก มีแขนงเป็นพอลิเมอร์ของ homogalacturonan (HG) galactan (Gal) และ arabinan (Ara) โมเลกุลของ (RG I) เชื่อมโยงถึงกันโดยอาศัยพันธะไอออนของแคลเซียมในบริเวณที่ไม่มีหมู่เมทิลของไฮโดรอกซีลิกนิน ส่วนในบริเวณผนังเซลล์มี cellulose (Cel) เป็นโมเลกุลหลักเกาะอยู่กันเป็นกลุ่ม ที่เรียกว่าไมโครไฟบริล แต่ละไมโครไฟบริลเชื่อมโยงถึงกันด้วยเฮมิเซลลูโลส โดยเฉพาะ xyloglucan (XG) ซึ่งเกาะอยู่กับเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ในบริเวณผนังเซลล์นี้ เพกทินมีพอลิเมอร์ของ rhamnogalacturonan II (RG II) เป็นแขนงของ RG I และอาจเชื่อมโยงอยู่กันเป็นคู่ PM = plasma membrane

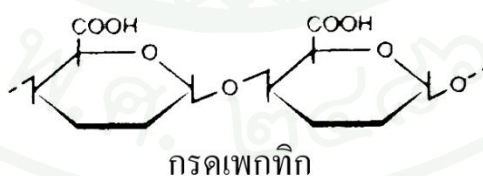
ที่มา: จริงแท้ (2549)



ภาพที่ 9 การเชื่อมต่อของเซลล์ด้วยมิลเดิลลามลล่า

ที่มา: Koning (2005)

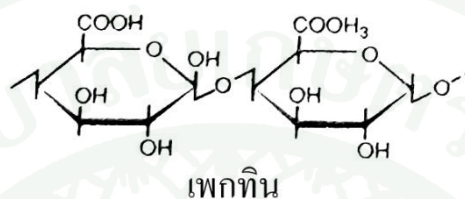
3.1 กรดเพกติก (pectic acid) พบในมิลเดิลลามลล่าและผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ เป็นพอลิเมอร์ของกรดกาแล็กทูโรนิกที่ไม่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์อยู่ในโมเลกุลเลย ดังภาพที่ 10 มีขนาดเล็กกว่าเพกทินและโปรโตเพกทิน ประกอบด้วยกรดกาแล็กทูโรนิกประมาณ 100 โมเลกุล กรดเพกติกนี้สามารถละลายน้ำได้ แต่อาจไม่ละลายถ้าหมู่คาร์บอกซิลของกรดกาแล็กทูโรนิกส่วนใหญ่เกาะกับแคลเซียมไอออนหรือแมกนีเซียมไอออน



ภาพที่ 10 สูตรโครงสร้างของกรดเพกติก

ที่มา: นิธิยา (2549)

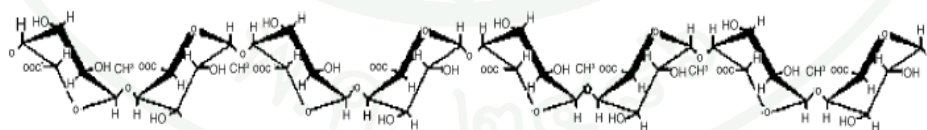
3.2 เพกทิน (pectin) มีขนาดใหญ่กว่ากรดเพกติก ประกอบด้วยกรดกาเล็กทโร- นิกประมาณ 200 โมเลกุล และหมู่คาร์บอกซิลของกรดกาเล็กทโรนิกส่วนใหญ่สร้างพันธะ เอสเทอร์กับหมู่เมทิล ดังภาพที่ 11 พบบริเวณมิลเคิลลาเมลล่า ผันงเซลล์ชั้นปฐมภูมิ และพบเป็น องค์ประกอบของไซโทพลาสซึมในเซลล์บางเซลล์



ภาพที่ 11 สูตรโครงสร้างของเพกทิน

ที่มา: นิธิยา (2549)

3.3 โปรโทเพกทิน (protopectin) มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าเพกทิน แต่หมู่คาร์- บอกซิลของกรดกาเล็กทโรนิกที่เป็นองค์ประกอบมักสร้างพันธะเอสเทอร์กับหมู่เมทิลน้อยกว่า เพกทิน ดังภาพที่ 12 โปรโทเพกทินเป็นสารประกอบเพกทินที่ไม่ละลายน้ำ และพบเป็น องค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์ในผลไม้ดิบ



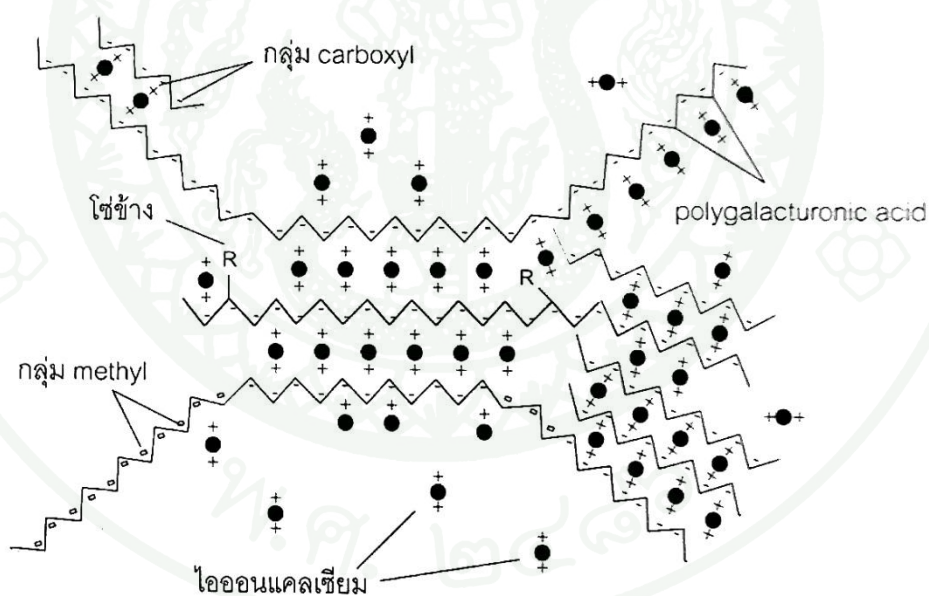
ภาพที่ 12 สูตรโครงสร้างของโปรโทเพกทิน

ที่มา: Jayani *et al.* (2007)

เพกทินที่ผนังเซลล์มีทั้งโมเลกุลที่เป็นเส้นยาวและโมเลกุลที่มีแขนงประสานกันเป็นโครงข่ายอยู่ด้วยกัน และอาจเชื่อมต่อกันด้วยไอออนของแคลเซียม เช่น โมเลกุลของไฮโมกาเล็กทูโรแนนที่ไม่มีเมทิล บนหมู่คาร์บอกซิล อาจเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไอออนโดยมีแคลเซียมเป็นตัวกลางในรูปแบบที่เรียกว่า junction zone ถ้าหลายๆ โมเลกุลเชื่อมต่อกันในลักษณะนี้ ทำให้ได้โครงสร้างที่เรียกว่า egg-box ช่วยยึดให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรงมากขึ้น (จริงแท้, 2549)

ดั่งภาพที่ 13

Torreggiani and Bertolo (2001) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลไม้เกี่ยวข้องกับ การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของผนังเซลล์ โดยการนิ่มของผลไม้เกิดจากการที่เซลล์เสียความสามารถในการเกาะติดกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของมิลเคิลลามาเลด้าของเซลล์ (คณัย, 2540) และมีความสัมพันธ์กับการนิ่มของมะม่วงในระหว่างการสุก Lazan *et al.*, 1993; Ali *et al.*, 1995; Ketsa *et al.*, 1999)



ภาพที่ 13 แบบจำลองแสดงภาพการจับตัวกันของไฮโมกาเล็กทูโรแนนด้วยพันธะไอออนโดยมีแคลเซียมเป็นตัวกลาง ในรูปแบบที่เหมือนถาดใส่ไข่ เรียกว่า egg-box เมื่อเส้นหยักแสดงพอลิเมอร์ของกรดกาเล็กทูโรนิก, (○) แทนหมู่เมทิล, (●) แทนไอออนของแคลเซียม

ที่มา: จริงแท้ (2549)

4. การสกัดเพกทิน

การสกัดเพกทินมักดำเนินการดังนี้ เริ่มจากการสกัดแยกเอาผนังเซลล์ออกจากส่วนอื่นๆ ของเนื้อเยื่อก่อน โดยทั่วไปจะทำการสกัดโดยใช้แอลกอฮอล์ เพื่อให้องค์ประกอบของผนังเซลล์ตกตะกอน ในขณะที่องค์ประกอบอื่นๆ ละลายออกไป เรียกสิ่งที่ถูกสกัดได้นี้ว่าของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (alcohol insoluble solid) หรือ AIS (จริงแท้, 2549) ซึ่งมีสารประกอบเพกทินเป็นองค์ประกอบ และสามารถวิเคราะห์ได้ในรูปของเพกทินทั้งหมด (total pectin) หรือ TP นอกจากนี้ยังสามารถแยกองค์ประกอบของผนังเซลล์เป็นส่วนต่างๆ โดยอาศัยความสามารถในการละลาย ซึ่งเพกทินที่ถูกเมทิลเลต (methylated) บนโมเลกุลมากกว่า 50 เปอร์เซนต์ จะถูกสกัดออกมาได้โดยใช้ น้ำ เพกทินที่ได้เรียกว่า water soluble pectin หรือเพกทินที่ละลายน้ำได้ ในขณะที่เพกทินที่ถูกเมทิลเลตบนโมเลกุลน้อยกว่า 50 เปอร์เซนต์ หรือเพกทินชนิด low methoxyl (LM) ไม่สามารถสกัดได้ด้วยสภาวะดังกล่าว เนื่องจากโครงสร้างกายภาพมีการสร้างพันธะต่อโลหะบวก (metallic cations) ชนิดต่างๆ โดยเฉพาะชนิดที่มีประจุบวกสอง (Saulnier and Thibault, 1987; Taboada *et al.*, 2010) ในการกำจัดไอออนของโลหะเหล่านี้ จึงจำเป็นต้องใช้สารเฉพาะ เช่น โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต (sodium hexametaphosphate) แอมโมเนียมออกซาลเลต (ammonium oxalate) เอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซิเตต (ethylenediaminetetraacetate; EDTA) และไซโคลเฮกซะเอมีนเตตระอะซิเตต (cyclohexanediaminetetraacetate; CDTA) (Barbier and Thibault, 1982) ซึ่งสารกลุ่มนี้สามารถจับกับไอออนบวกได้ ดังนั้น เพื่อให้ได้กระบวนการสกัดที่มีประสิทธิภาพ สารเหล่านี้จึงถูกนำไปใช้เป็นตัวสกัดเพกทินชนิดที่จับกับโลหะ เรียกเพกทินส่วนนี้ว่า chelating soluble pectin

การเปลี่ยนแปลงสารประกอบเพกทินเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลไม้ จากการตรวจเอกสาร มีงานวิจัยที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสารประกอบเพกทินในผลไม้ ได้แก่

Tandon and Kalra (1984) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพกทินในระหว่าง การสุกของมะม่วงพันธุ์ Dashehari พบว่า เมื่อมะม่วงที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 70 วัน ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (alcohol insoluble solids) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับมะม่วงที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 33 วัน หลังจากนั้นเมื่อมะม่วงมีอายุการเก็บเกี่ยว 100 วัน ของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์มีปริมาณลดลง เนื่องจากของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์เปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลและสามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ และมะม่วงที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 70 วัน ปริมาณเพกทินที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้น เป็นผลจากกิจกรรมของเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายเพกทินได้ ขณะที่ปริมาณเพกทินที่ละลายในด่าง

ลดลง เนื่องจากเพกตินที่ละลายได้ในค่า คือ โปรโทเพกติน ซึ่งจะพบมากในผลไม้ดิบ และเมื่อผลไม้สุก ปริมาณโปรโทเพกตินจะลดลง ส่วนเพกตินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेटและเพกตินทั้งหมด (total pectin) มีปริมาณสูงที่สุด หลังจากนั้นก็มีปริมาณคงที่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพกตินนี้เป็นสาเหตุของการสูญเสียความแน่นเนื้อ ทำให้มะม่วงเกิดการนิ่มในระหว่างการสุก

El-Zoghbi (1994) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียความแน่นเนื้อ องค์ประกอบของผนังเซลล์ และกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสุกของมะม่วงพันธุ์ Zebda Baladi พบว่า ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์และความแน่นเนื้อลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาลและเส้นใยถูกเปลี่ยนเป็นของแข็งที่ละลายได้ในแอลกอฮอล์ ในระหว่างการสุก นอกจากนี้ กิจกรรมของเอนไซม์พอลิกลาแล็กตูโรเนส (polygalacturonase) และเซลลูเลส (cellulase) เพิ่มขึ้น ขณะที่กิจกรรมของเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส (pectin methylesterase) ลดลง การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้เกิดการสูญเสียความแน่นเนื้อ ส่งผลให้มะม่วงเกิดการนิ่มขึ้น

Majumder and Mazumdar (2002) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพกตินของเคปกูสเบอร์รี่ (cape-gooseberry, *Physalis peruviana* L.) ในระหว่างการสุก พบว่า ปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้ ปริมาณเพกตินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेटและปริมาณเพกตินทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น ขณะที่ปริมาณเพกตินที่ละลายในกรดและเพกตินที่ละลายในค่ามีค่าลดลงในระหว่างการสุก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเพกตินเหล่านี้ ทำให้เนื้อสัมผัสของเคปกูสเบอร์รี่เกิดการนิ่มขึ้น

Fuchigami *et al.* (1997) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพกตินในแครอทที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยความดันสูง (high pressure freezing) โดยใช้ความดันที่ระดับต่างๆ (100, 200, 340, 400, 600 และ 700 เมกกะปาสกาล) ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส พบว่า ในระหว่างการแช่เยือกแข็งด้วยความดันสูงทำให้ระดับการเอสเทอริฟิเคชัน (degree of esterification) ของสารประกอบเพกตินลดลง โดยเกิดการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสในระหว่างการให้ความดัน ดังนั้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของ high methoxyl pectin มีค่าลดลง ขณะที่ปริมาณของ low methoxyl pectin มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของแครอทแช่เยือกแข็งได้ เนื่องจาก low methoxyl pectin สามารถจับกับไอออนของแคลเซียม ทำให้แครอทที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ความดันที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็ง คือ 200, 340 และ 400 เมกกะปาสกาล

Fuchigami *et al.* (1998) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพกทินในกะหล่ำปลี ที่ผ่านการต้มในน้ำเดือด (cooking) เป็นเวลา 1 และ 2 นาที พบว่า การต้มกะหล่ำปลีเป็นเวลา 2 นาที ทำให้กรดกาแล็กทูโรนิกลดลงเล็กน้อย โดยเฉพาะปริมาณของ high methoxyl pectin มีค่าลดลง ซึ่งการนี้ของกะหล่ำปลีที่ผ่านการต้มเนื่องมาจากการเกิด β -elimination ของหมู่เมทิลของ สารประกอบเพกทิน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการให้ความดันที่ระดับต่างๆ (100, 200, 340, 400 และ 700 เมกกะปาสกาล) ต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพกทินในกะหล่ำปลี พบว่า ความดันทำให้ระดับการเอสเทอร์ริฟิเคชันของสารประกอบเพกทินลดลง โดยการทำงานของ เอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอร์เรส ทำให้ปริมาณของ high methoxyl pectin มีค่าลดลง ขณะที่ ปริมาณของ low methoxyl pectin มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปเอนไซม์นี้จะอยู่ในผนังเซลล์พืช เมื่อ ผนังเซลล์ถูกทำลายโดยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส หรือการเกิดรอยชำ ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เกิดความเสียหาย ส่งผลให้เอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอร์เรส สามารถมีกิจกรรมขึ้นได้ ส่วนปริมาณเพกทินทั้งหมดของกะหล่ำปลีที่ผ่านการให้ความดันที่ 700 เมกกะปาสกาล มีค่าไม่แตกต่างจากกะหล่ำปลีที่ผ่านการลวกเป็นเวลา 1 และ 2 นาที

Alonso *et al.* (2005) ศึกษาผลของการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 10 นาที และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที ร่วมกับการแช่ในสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ก่อนการแช่เยือกแข็งของเชอร์รี่ ต่อค่าเนื้อสัมผัส และการเปลี่ยนแปลงของ สารประกอบเพกทิน พบว่า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ร่วมกับการ แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ และการให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที ร่วมกับการแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความ เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ หรือไม่แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ สามารถเพิ่มความแน่นเนื้อของ เชอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งได้ เนื่องจากความร้อนทำให้ผนังเซลล์เกิดความเสียหาย เอนไซม์ เพกทินเมทิลเอส-เทอร์เรสจึงสามารถทำปฏิกิริยากับเพกทินซึ่งเป็นซับสเตรท ทำให้เกิดการกำจัด หมู่เมทิล (de-esterification) ออกจากโมเลกุลของกรดกาแล็กทูโรนิกได้มากขึ้น ระดับการเอสเทอร์- ริฟิเคชันของเพกทินลดลง ปริมาณเพกทินที่ละลายใน EDTA (EDTA soluble fraction) มีค่าเพิ่มขึ้น มีผลให้ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ลดลง เนื่องจากการแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ทำให้ เกิดการสร้าง calcium bridges กับกรดกาแล็กทูโรนิกระหว่างสายของเพกทิน ส่งผลให้เนื้อสัมผัส ของเชอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณกรดยูโรนิก ทั้งหมดไม่แตกต่างกันระหว่างเชอร์รี่สดและเชอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งโดยการให้ความร้อนและ แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ก่อน

Chang *et al.* (1996) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสและสารประกอบเพกทินในระหว่างการ cooking ของถั่วแขก พบว่า ถั่วแขกสด ถั่วแขกที่ผ่านการ precooking (ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที), การ cooking (ต้มในน้ำเดือด 15 นาที) และการ precooking ก่อนการ cooking มีปริมาณเพกทินทั้งหมดไม่แตกต่างกัน ขณะที่การ precooking และการ precooking ก่อนการ cooking ทำให้ระดับการเอสเทอร์ริฟิเคชันมีค่าต่ำกว่าการ cooking โดยตรง ซึ่งระดับการเอสเทอร์ริฟิเคชันเกี่ยวข้องกับความแน่นเนื้อ ดังนั้น การ precooking ทำให้ถั่วแขกมีความแน่นเนื้อสูงที่สุด เนื่องจากความร้อนทำให้เอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอร์เรสมีกิจกรรมขึ้น เอนไซม์จะกำจัดหมู่เมทิล (de-esterification) ออกจากโมเลกุลของเพกทิน ทำให้เกิดหมู่คาร์บอกซิลอิสระ ซึ่งสามารถจับกับไอออนของแคลเซียม ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของถั่วแขกที่ผ่านการ precooking มีความแน่นเนื้อมากขึ้น

Prestamo *et al.* (1998) ศึกษาผลของการลวกและการแช่เยือกแข็งต่อเนื้อสัมผัสและสารประกอบเพกทินของแครอท พบว่า แครอทที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีความแน่นเนื้อลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับแครอทสด ขณะที่แครอทที่ผ่านการลวกมีความแน่นเนื้อลดลงเพียง 21.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนทำให้สารประกอบเพกทินเกิดเจลขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเพกทินบริเวณมิลเล็ลลาเมลล่าของเซลล์ถูกทำลาย ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลของการแช่เยือกแข็งมากกว่าการลวก โดยแครอทที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและแครอทที่ผ่านการลวกแล้วนำไปแช่เยือกแข็งมีปริมาณเพกทินสูงกว่าแครอทสดและแครอทที่ผ่านการลวกเพียงอย่างเดียว ซึ่งกระบวนการแช่เยือกแข็งทำให้ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ (water soluble pectin) และปริมาณเพกทินที่ละลายในโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟตซึ่งเป็นเพกทินชนิด low methoxyl pectin ที่จับกับแคลเซียม มีค่าสูงขึ้น โดยแครอทที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีปริมาณของเพกทินทั้งสองชนิดนี้สูงกว่าแครอทสด ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของแครอทที่ผ่านการแช่เยือกแข็งนุ่มกว่าแครอทสด

Galetto *et al.* (2010) ศึกษาผลของการแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ก่อนการแช่เยือกแข็งของสตรอเบอร์รี่ต่อสารประกอบเพกทินและระดับการเอสเทอร์ริฟิเคชันของเพกทิน พบว่า ปริมาณเพกทินทั้งหมดในของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ซึ่งแสดงอยู่ในค่าของกรดกาแล็กทูโรนิกและระดับการเอสเทอร์ริฟิเคชันของเพกทินของสตรอเบอร์รี่สด สตรอเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง สตรอเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ก่อนการแช่เยือกแข็ง และสตรอเบอร์รี่ที่ผ่านการเติมเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอร์เรสร่วมกับการแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ดังนั้น กระบวนการแช่เยือกแข็งไม่ทำให้เกิดการสูญเสียของปริมาณเพกทินทั้งหมดทั้งในระหว่างการแช่เยือกแข็ง การเก็บรักษา

และการทำลาย และไม่เกิดการ de-esterification ของเพกทินจากระบวนการแช่เยือกแข็งหรือจากการเติมเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอร์เรส

อย่างไรก็ตาม จากการสำรวจผลงานวิจัยทั้งหมดนี้ ยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลของการแช่เยือกแข็งโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบเพกทินซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์ในการช่วยให้ผลไม้มีความแน่นเนื้อ ซึ่งอาจนำผลที่ได้มาอธิบายการนิ่มของเนื้อสัมผัสในผลไม้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งได้ รวมถึงการศึกษาถึงโครงสร้างระดับจุลภาคเพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพกทินที่ถูกทำลายรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสให้ชัดเจนมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำในผลไม้ด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง (*Mangifera indica* L. cv. Nam Dok Mai Sri Thong) ที่ได้จากสวนในจังหวัดฉะเชิงเทรา

2. สารเคมี

2.1 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethylalcohol, Commercial grade, Thailand)

2.2 อะซิโตน (Acetone, Analytical grade, Merck, Germany)

2.3 แอมโมเนียมออกซาเลต (Ammonium oxalate, Analytical grade, Ajax Finechem, Australia)

2.4 กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid, Analytical grade, Merck, Germany)

2.5 สีข้อมแคลโคฟลูออไรท์ (Calcofluor white, Analytical grade, Sigma-Aldrich, Switzerland)

3. อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

3.1.1 เครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอเจนิกแบบพ่นไอไนโตรเจนเหลว (Cryogenic cabinet freezer, Mini Batch Freezer 1000L, Bangkok Industrial Gas Co., Ltd.)

3.1.2 ตู้แช่เยือกแข็ง (Chest freezer Sanyo, SF-C692NG)

3.1.3 ตู้ควบคุมอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Incubator; IPP400, Memmert, Germany)

3.1.4 สายเทอร์โมคอปเปิล (Thermocouple) และเครื่องบันทึกข้อมูล (Data-logger)

3.1.5 ถุงพลาสติกชนิด NY/LLDPE (Nylon/Linear low density polyethylene)

ความหนา 70 ไมครอน ขนาด 100 x 150 มิลลิเมตร

3.1.6 เครื่องปิดผนึกถุงพลาสติก

3.1.7 อุปกรณ์เครื่องครัว (มีด เขียง ถาด ฯลฯ)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ

3.2.1 อุปกรณ์ตรวจสอบคุณภาพทางเคมี

3.2.1.1 เครื่องปั่นผสม (Waring Laboratory Blender, USA)

3.2.1.2 เครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิต่ำ (Refrigerated centrifuge, Hitachi รุ่น Himec CR 20B2)

3.2.1.3 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot air oven, Memmert, ULE500, Germany)

3.2.1.4 เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer) และแท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)

3.2.1.5 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, Labomed รุ่น Spectronic 22)

3.2.2 อุปกรณ์ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

3.2.2.1 กล้องคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง (Axio Imager MI, Carl Zeiss PTe Ltd., Gottingen, Germany)

3.2.3 อุปกรณ์ตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพ

3.2.3.1 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer, Stable Micro System รุ่น TA-XTplus, UK)

3.2.4 อุปกรณ์ตรวจสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส

3.2.4.1 อุปกรณ์ทดสอบ อาทิ ถ้วยพลาสติก แก้วน้ำ

3.2.4.2 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

วิธีการ

1. การคัดเลือกวัตถุดิบ

นำมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองในระยะสุก อายุเก็บเกี่ยวผลผลิตอยู่ในช่วง 120 วัน ซึ่งเป็นมะม่วงที่ผ่านการบ่มมาจากสวน มีน้ำหนักผลอยู่ในช่วง 350-400 กรัม มาคัดให้มีคุณลักษณะใกล้เคียงกัน โดยพิจารณาจากสีของเนื้อมะม่วงให้มีสีเหลืองประมาณ 31-60% หรือมีความสุกอยู่ที่ระยะที่ 3 (ดังภาพที่แสดงในภาคผนวก ก) เนื้อสัมผัสนุ่มเล็กน้อย เมื่อใช้นิ้วกดที่ผลแล้วทำให้เนื้อมะม่วงเกิดการยุบตัวเพียงเล็กน้อย และตรวจสอบปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solids) โดยใช้ pocket refractometer ซึ่งมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้อยู่ในช่วง 18-20 บริกซ์

2. ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็งละลายน้ำแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสและสารประกอบเพกทินของมะม่วงแช่เยือกแข็ง

2.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

นำมะม่วงมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก ตัดเนื้อมะม่วงบริเวณหัวและท้ายของผลทิ้ง ใช้เฉพาะเนื้อมะม่วงบริเวณตรงกลางของผลมาศึกษา เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีความสม่ำเสมอมากที่สุด ตัดแบ่งมะม่วงให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกเต๋าขนาด $1.5 \times 1.5 \times 1.5$ เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่มีการผลิตเป็นมะม่วงแช่เยือกแข็งในทางการค้า วิเคราะห์สารประกอบเพกทิน ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค วัดเนื้อสัมผัส และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ด้านเนื้อสัมผัส) ตามวิธีการในข้อ 2.5, 2.6, 2.72 และ 2.8 ก่อนนำชิ้นมะม่วงไปแช่เยือกแข็ง

2.2 การแช่เยือกแข็ง

นำตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างตามข้อ 2.1 มาบรรจุในถุงในลอนชนิด NY/LLDPE ความหนา 70 ไมครอน ขนาด 100×150 มิลลิเมตร โดยบรรจุถุงละ 8 ชิ้น ปิดผนึก นำมะม่วงที่บรรจุใส่ถุงไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง 3 ระดับ คือ (1) อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (slow freezing, SF) ด้วยการแช่ในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

(2) อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (medium freezing, MF) และ (3) อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (fast freezing, FF) ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก โดยกำหนดสถานะในการแช่เยือกแข็งของอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางเป็นการลดอุณหภูมิของเครื่องไครโอจินิกเป็น -40 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งอุณหภูมิตรงกลางของตัวอย่างลดลงถึง -20 องศาเซลเซียส สำหรับการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ทำโดยลดอุณหภูมิของเครื่องไครโอจินิกเป็น -80 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งอุณหภูมิตรงกลางของตัวอย่างลดลงถึง -20 องศาเซลเซียส ติดตามและวัดอุณหภูมิของตัวอย่างในระหว่างการแช่เยือกแข็งด้วยการนำสายเทอร์โมคอปเปิล (thermocouple) ที่ต่ออยู่กับเครื่องบันทึกข้อมูล (data-logger) มาเสียบกับตัวอย่างมะม่วง โดยให้อยู่กึ่งกลางของตัวอย่าง บันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการแช่เยือกแข็ง จากนั้นนำตัวอย่างมาเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส คำนวณอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็ง (FR) ในหน่วยขององศาเซลเซียสต่อนาที ตามสมการของ Olivera and Salvadori (2009)

$$FR = \frac{T_i - T_f}{tf} \quad (1)$$

เมื่อ T_i : อุณหภูมิของตัวอย่างก่อนแช่เยือกแข็ง (21 ± 1 องศาเซลเซียส)

T_f : อุณหภูมิของตัวอย่างหลังแช่เยือกแข็ง (-20 ± 1 องศาเซลเซียส)

tf : เวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งตั้งแต่อุณหภูมิของตัวอย่างก่อนแช่เยือกแข็งถึงอุณหภูมิของตัวอย่างหลังแช่เยือกแข็ง

2.3 การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ

การแช่เยือกแข็งตัวอย่างมะม่วงที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน แล้วนำมาทำละลายตามวิธีการในข้อ 2.4 เป็นการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็ง รอบที่ 1 ส่วนตัวอย่างมะม่วงที่เหลือนำกลับไปแช่เยือกแข็งซ้ำในตู้แช่เยือกแข็งเช่นเดียวกับรอบที่ 1 จนครบ 3 รอบ วิเคราะห์สารประกอบเพกทิน ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง วัดเนื้อสัมผัส หลังการทำละลายน้ำแข็งรอบที่ 1, 2 และ 3 ตามวิธีการในข้อ 2.5-2.7 และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ด้านเนื้อสัมผัส) หลังการทำละลายน้ำแข็งรอบที่ 1 และ 2 ตามวิธีการในข้อ 2.8 โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างมะม่วงสด

2.4 การทำละลาย

นำตัวอย่างมาละลายน้ำแข็ง โดยนำตัวอย่างมะม่วงแช่เยือกแข็งมาวางในตู้ควบคุมอุณหภูมิค่าที่ 4 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอุณหภูมิตรงกลางของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเป็น 0 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้เวลาในการทำละลายทั้งหมด 4 ชั่วโมง

2.5 การวิเคราะห์เพกทิน

2.5.1 การสกัด

2.5.1.1 การสกัดของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (alcohol insoluble solids; AIS) คัดแปลงตามวิธีการของ McFeeters and Armstrong (1984) นำเนื้อมะม่วง 35 กรัม ปั่นกับสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องปั่นเป็นเวลา 2 นาที นำมากรองผ่านกระดาษกรอง whatman No. 1 สะดด้วยสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 75 มิลลิลิตร ล้างด้วยสารละลายอะซิโตนปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำของแข็งส่วนที่กรองได้ไปอบให้แห้งในตู้อบแบบลมร้อนอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก AIS

2.5.1.2 เพกทินทั้งหมด (total pectin; TP) คัดแปลงตามวิธีการของ Blumenkrantz and Asboe-Hansen (1973); Ahmed and Labavitch (1977) นำ AIS 0.01 กรัม (ที่ได้จากข้อ 2.5.1.1) ใส่ในหลอดทดลองที่บรรจุแท่งกวนแม่เหล็ก เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นปริมาตร 4 มิลลิลิตร ค่อยๆ กวนผสมเป็นเวลา 5 นาที หล่อเย็นหลอดทดลองในขณะที่กวนผสม ค่อยๆ หยดน้ำกลั่นปริมาตร 1 มิลลิลิตร กวนผสมต่อเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบเวลา ค่อยๆ หยดน้ำกลั่นปริมาตร 1 มิลลิลิตร อีกครั้ง แล้วกวนผสมต่อเป็นเวลา 5 นาที นำสารละลายมากรองผ่านกระดาษกรอง whatman No. 1 แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 50 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ปริมาณเพกทินทั้งหมด ตามวิธีการในข้อ 2.5.2

2.5.1.3 เพกทินที่ละลายน้ำได้ (water soluble pectin; WSP) คัดแปลงตามวิธีการของ Taboada *et al.* (2010) นำ AIS 0.05 กรัม (ที่ได้จากข้อ 2.5.1.1) ใส่ในหลอดหมุนเหวี่ยง (centrifuge tube) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร กวนผสมโดยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 30 นาที นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 7,000 x g เป็นเวลา 15 นาที กรองส่วนใสเก็บไว้ นำตะกอนมาเติม

น้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร ทำซ้ำจนครบ 3 ครั้ง ปรับปริมาตรส่วนไตที่ได้ด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ ตามวิธีการในข้อ 2.5.2

2.5.1.4 เพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาเลต (ammonium oxalate soluble pectin; ASP) ดัดแปลงตามวิธีการของ Taboada *et al.* (2010) นำตะกอนที่ได้จากข้อ 2.5.1.3 ละลายในสารละลายแอมโมเนียมออกซาเลตเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (pH 4.5) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร กวนผสมโดยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 30 นาที นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 7,000 x g เป็นเวลา 15 นาที กรองส่วนไตเก็บไว้ นำตะกอนมาเติมสารละลายแอมโมเนียมออกซาเลตปริมาตร 25 มิลลิลิตร ทำซ้ำจนครบ 3 ครั้ง ปรับปริมาตรส่วนไตที่ได้ด้วยสารละลายแอมโมเนียมออกซาเลตเป็น 100 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาเลต ตามวิธีการในข้อ 2.5.2

2.5.2 การวิเคราะห์

นำสารละลายตัวอย่างที่สกัดได้ 0.8 มิลลิลิตร เติมในสารละลายโซเดียมเตตระโบรเมตเข้มข้น 0.0125 โมลาร์ ปริมาตร 4.8 มิลลิลิตร (หล่อเย็นไว้ในอ่างน้ำเย็น) เขย่าให้เข้ากัน บ่มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ทำให้เย็น เติมสารละลายเมตะไฮดรอกซีไดฟีนิลเข้มข้น 0.15 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 80 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร เทียบกับ blank ของแต่ละตัวอย่าง โดย blank เตรียมได้จากสารละลายตัวอย่างที่ผ่านปฏิกิริยาเคมีด้วยวิธีเดียวกัน แต่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 80 ไมโครลิตร แทนเมตะไฮดรอกซีไดฟีนิล เปลี่ยนค่า A_{520} ที่ได้เป็นปริมาณเพกทิน โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกรด D-galacturonic ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 10-50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งผ่านปฏิกิริยาเคมีด้วยวิธีเดียวกัน

2.6 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วง

นำตัวอย่างมะม่วงสดมาตัดให้มีความหนา 1 มิลลิเมตร กว้าง 6 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร หยด calcofluor white ให้ท่วมชิ้นมะม่วง ทิ้งไว้ 10 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้ง นำชิ้นมะม่วงวางบน slice นำไปส่องด้วยกล้องคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง โดยใช้ excitation 488 นาโนเมตร และ emission 500-520 นาโนเมตร หลังจากนั้นนำชิ้นมะม่วงไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งที่ระดับต่างๆ แล้วเก็บรักษาไว้ในตู้แช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

นำมาทำละลาย และส่องด้วยกล้องคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่งที่การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็ง รอบที่ 1 2 และ 3

2.7 วิเคราะห์คุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง

2.7.1 การวัดปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง

ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (drip loss; DL) คัดแปลงตามวิธีการของ Lowithun and Charoenrein (2009) นำชิ้นมะม่วงวางบนกระดาษซับที่บรรจุในถุงซิปล็อก ปิดปากถุงให้สนิทและทิ้งไว้ให้น้ำแข็งละลายในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างมะม่วงคงที่ ชั่งน้ำหนัก วัดค่า 6 ชั่วโมง ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งต่อน้ำหนักแห้ง ตามสมการ

$$DL (\%) = \frac{W_t - W_o}{W_s \times TS} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_o : น้ำหนักของกระดาษซับก่อนละลายน้ำแข็ง

W_t : น้ำหนักของกระดาษซับหลังละลายน้ำแข็ง

W_s : น้ำหนักของตัวอย่างก่อนละลายน้ำแข็ง

TS : เปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งในตัวอย่าง (วิธีการวิเคราะห์และเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งเฉลี่ยของมะม่วง แสดงตามภาคผนวก ก และ ค5 ตามลำดับ)

2.7.2 การตรวจวัดเนื้อสัมผัส

ตรวจวัดเนื้อสัมผัสของตัวอย่างมะม่วงขนาด 1.5 x 1.5 x 1.5 เซนติเมตร ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) ใช้หัววัด P/36R เพื่อวัดค่าแรงจากการกดตัวอย่าง (compression test) โดยกำหนดสถานะในการวัด ดังนี้ ความเร็วก่อนกดลงบนตัวอย่าง (pre-test speed) เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วขณะกดตัวอย่าง (test speed) เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และความเร็วหลังจากกด (post-test speed) เท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยกดลงผิวของตัวอย่างลึกลงไป 50 เปอร์เซ็นต์ของความสูงของตัวอย่าง และวัดค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างจากค่าแรงกดสูงสุด (maximum force) ในหน่วยนิวตัน (N) วัดค่า 16 ชั่วโมง และหาค่าเฉลี่ย

2.8 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ด้านเนื้อสัมผัส) โดยประเมินเป็นความแน่นเนื้อของมะม่วง คัดแปลงตามวิธีการของ Meilgaard *et al.* (2007) ใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 7 คน (วิธีการฝึกฝนผู้ทดสอบตามภาคผนวก ข) เตรียมตัวอย่างโดยทำการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาประเมินดังนี้

ครั้งที่ 1 ประเมินตัวอย่างมะม่วงสด ซึ่งไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง

ครั้งที่ 2 ประเมินตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อัตราเร็วต่างๆ ที่การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งรอบที่ 1

ครั้งที่ 3 ประเมินตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อัตราเร็วต่างๆ ที่การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งรอบที่ 2

3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ในการทดลองใช้แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกแบบสมบูรณ์ (Random Complete Block Design; RCBD) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ ใช้โปรแกรม SPSS วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องวิจัยปริญญาโทและห้องปฏิบัติการส่วนกลาง ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

5. ระยะเวลาทำการวิจัย

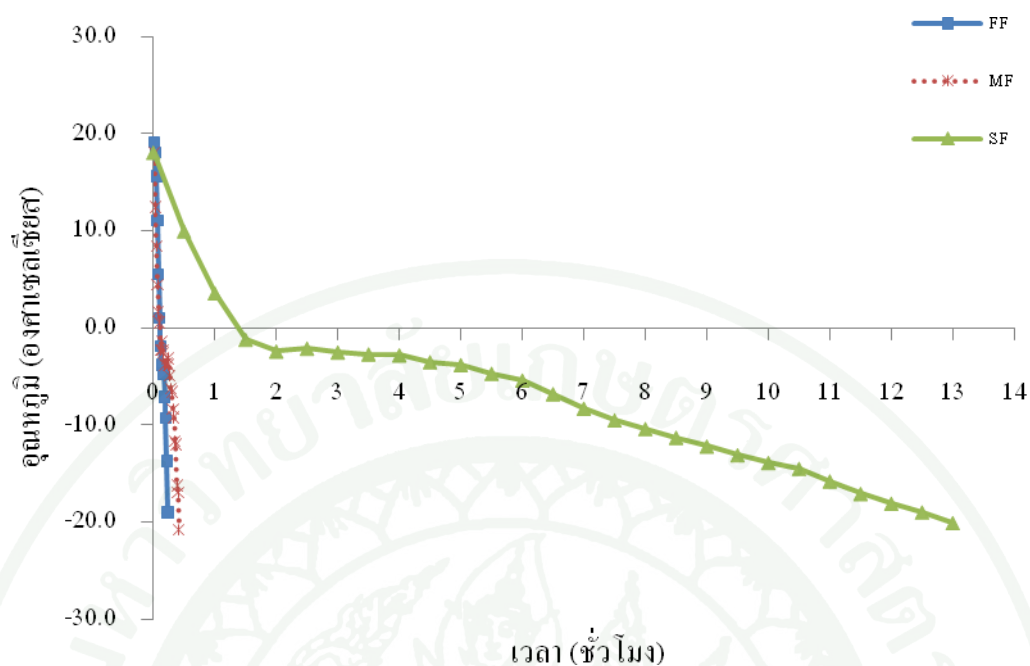
การทดลองเริ่มตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2553 ถึงสิ้นเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2554

ผลและวิจารณ์

1. อัตราการแช่เยือกแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็ง สำหรับงานวิจัยนี้ ศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็ง 3 ระดับ ได้แก่ อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ด้วยการแช่ในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบเร็ว ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก โดยการลดอุณหภูมิของเครื่องแช่เยือกแข็งไครโอจินิกเป็น -40 และ -80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การใช้อุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งต่างกัน ทำให้อัตราเร็วและเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งต่างกันด้วย ซึ่งช่วงระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงมีความสำคัญมากต่อคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง เนื่องจากส่งผลต่อโครงสร้างของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น (Sun and Zheng, 2006)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของมะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการแช่เยือกแข็ง แสดงดังภาพที่ 14 ซึ่งได้จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างชิ้นมะม่วงทรงลูกเต๋าด้านขนาด 1.5x1.5x1.5 เซนติเมตร ในระหว่างการแช่เยือกแข็ง โดยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีช่วงระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้ง 3 ช่วง คือ precooling, phase change และ subcooling อย่างชัดเจน ขณะที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วมีช่วง phase change สั้นมาก



ภาพที่ 14 แผนภาพการแข่งเยือกแข็งมะม่วงด้วยอัตราการแข่งเยือกแข็งแบบช้า (SF) แบบปานกลาง (MF) และแบบเร็ว (FF)

อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการแข่งเยือกแข็งและอัตราการแข่งเยือกแข็งของมะม่วงทั้ง 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 2 การแข่งเยือกแข็งแบบช้า (-20 องศาเซลเซียส) แบบปานกลาง (-40 องศาเซลเซียส) และแบบเร็ว (-80 องศาเซลเซียส) มีอัตราเร็ว 0.05, 1.69 และ 2.91 องศาเซลเซียสต่อนาที ตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการแข่งเยือกแข็งเพื่อลดอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างมะม่วงให้เป็น -20 องศาเซลเซียส ของการแข่งเยือกแข็งแบบช้า คือ 13 ชั่วโมง ขณะที่การแข่งเยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วใช้เวลาในการแข่งเยือกแข็งเพียง 25 และ 14 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 2 อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการแข่งเยือกแข็งและอัตราเร็วของการแข่งเยือกแข็งที่ระดับต่างๆ

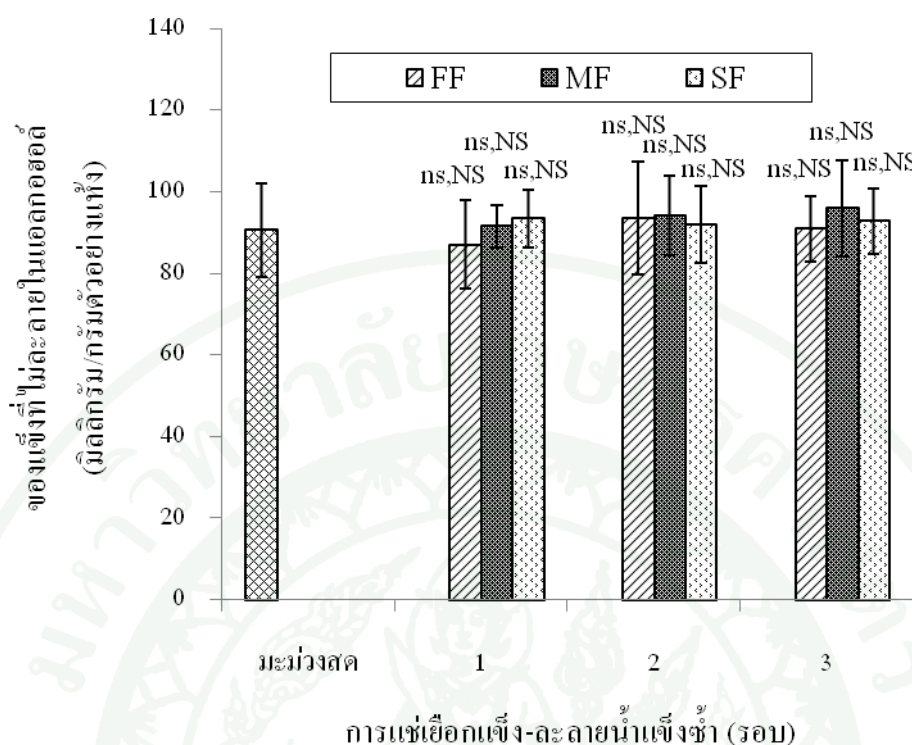
การแข่งเยือกแข็ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา	อัตราเร็ว (องศาเซลเซียสต่อนาที)
ช้า	-20	13 ชั่วโมง	0.05
ปานกลาง	-40	25 นาที	1.69
เร็ว	-80	14 นาที	2.91

2. ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อสารประกอบเพกทินของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

2.1 ของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (alcohol insoluble solids)

ของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (alcohol insoluble solids) หรือ AIS เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์ ซึ่งประกอบด้วย เกลือ โปรตีน สตาร์ช และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช (non-starch polysaccharides) ได้แก่ เพกทิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส (Reinders and Their, 1998)

จากการวิเคราะห์ค่า AIS ของตัวอย่างมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ดังแสดงในภาพที่ 15 และตารางผนวกที่ ค1 โดยค่า AIS ของตัวอย่างมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อัตราการแช่เยือกแข็งทั้ง 3 แบบ คือ การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว แบบปานกลาง และแบบช้า ของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1, 2 และ 3 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 87-95 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้ง การที่ค่า AIS ไม่แตกต่างกันในทุกตัวอย่าง สันนิษฐานว่าเนื่องจากการแช่เยือกแข็งไม่ได้เปลี่ยนองค์ประกอบของผนังเซลล์ โดยการเปลี่ยนแปลงของ AIS ในผลไม้ส่วนใหญ่มาจากการสุก ซึ่งในระหว่างการสุก AIS จะมีค่าลดลง เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำตาลที่ละลายได้ และการเปลี่ยนเส้นใย (fibre) ไปเป็นของแข็งที่ละลายได้ในแอลกอฮอล์ (El-Zoghbi, 1994) ดังนั้น กระบวนการแช่เยือกแข็งจึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของ AIS ซึ่งสอดคล้องกับ Fuchigami *et al.* (1995b) ที่รายงานว่า องค์ประกอบของ AIS ของแครอท ไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง



ภาพที่ 15 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์

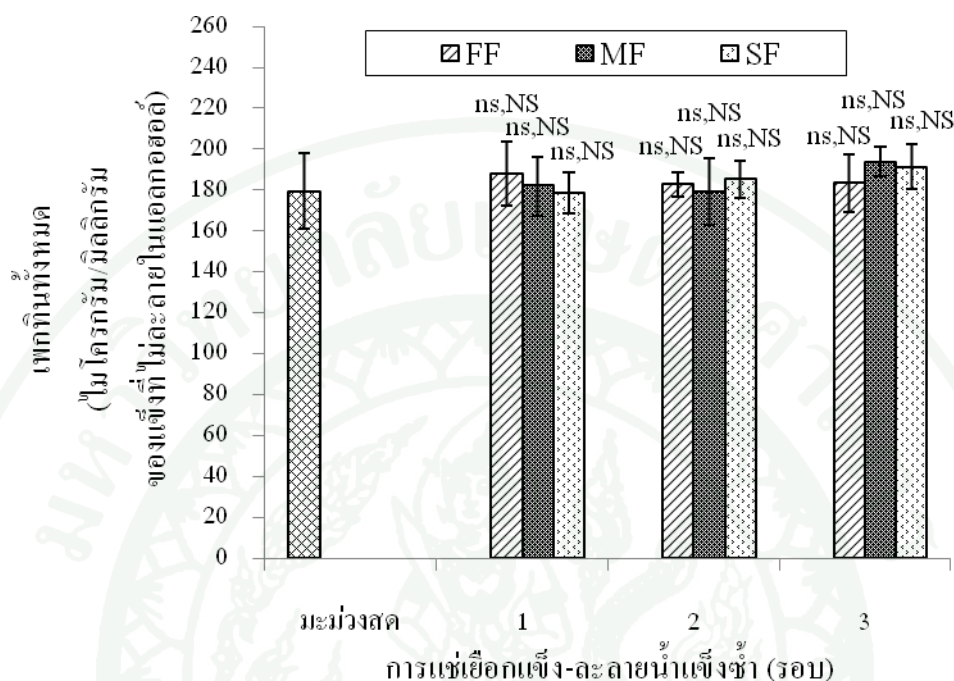
หมายเหตุ^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

2.2 เพกทินทั้งหมด (total pectin)

จากการวิเคราะห์ปริมาณเพกทินทั้งหมด (total pectin) ของมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง พบว่า อัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำไม่มีผลต่อเพกทินทั้งหมด ปริมาณเพกทินทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 178-193 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมของ AIS ดังแสดงในภาพที่ 16 และตารางผนวกที่ ค2 การที่ปริมาณเพกทินทั้งหมดไม่แตกต่างกันอาจเนื่องมาจากการแช่เยือกแข็งทำให้โครงสร้างของสายเพกทินเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณของเพกทินทั้งหมดยังคงเดิม

ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Galetto *et al.* (2010) ที่รายงานว่า ปริมาณเพกตินทั้งหมดของสตรอเบอร์รี่สดและสตรอเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและทำละลายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)



ภาพที่ 16 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณเพกตินทั้งหมด

หมายเหตุ ^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

2.3 เพกตินที่ละลายน้ำได้ (water soluble pectin)

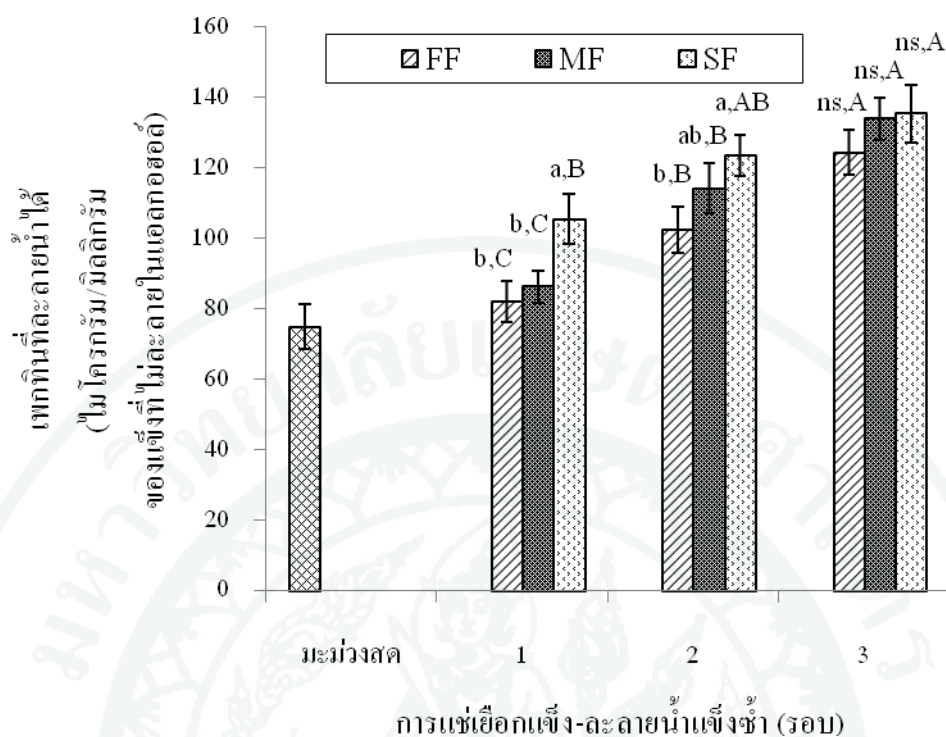
โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลไม้ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการสลายตัวของผนังเซลล์ ซึ่งการสลายตัวของผนังเซลล์มีความซับซ้อนมาก Yashoda *et al.* (2006) รายงานว่าการเปลี่ยนแปลงของผนังเซลล์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบเพกติน โดยโมเลกุลของเพกตินจะเกิดการแตกตัวของสายพอลิเมอร์ (depolymerization) ทำให้เพกตินมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นในระหว่างการสุก ซึ่งเกี่ยวข้องกับการนุ่มของเนื้อสัมผัสใน

ผลไม้วี ภาพที่ 17 และตารางผนวกที่ ค3 แสดงผลของการวิเคราะห์ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ของ มะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อัตราการแช่เยือกแข็งระดับต่างๆ และที่การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ 1-3 รอบ พบว่า มะม่วงสดมีปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุด ส่วน มะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและทำละลายน้ำแข็ง มีปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น เป็นผล มาจากเพกทินที่ผนังเซลล์ถูกทำลายเนื่องจากการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งในระหว่างการแช่เยือกแข็ง

เมื่อพิจารณาอัตราการแช่เยือกแข็งที่ระดับต่างๆ พบว่า ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบซ้ำมีปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้สูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1 และ 2 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการแช่เยือกแข็งแบบซ้ำทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ อยู่ภายนอกเซลล์ ซึ่งสามารถทำลายโครงสร้างเซลล์ได้มากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (Chassagne-Berces *et al.*, 2009) สอดคล้องกับ Roy *et al.* (2001) ที่ศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็ง 4 ระดับ ต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของแครอท ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (LM) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่า การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (4.5 และ 2.4 องศาเซลเซียสต่อนาที) สามารถสังเกตเห็น โครงสร้างของเนื้อเยื่อยึดติดกันแน่น เซลล์แต่ละเซลล์อยู่ชิดติดกันกับเซลล์ที่อยู่ใกล้เคียง การแช่เยือกแข็งที่อัตราเร็ว 4.5 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำให้เซลล์ไม่เกิดการแยกกัน เซลลูโลสและเพกทินอยู่ในสภาพค่อนข้างสมบูรณ์ ส่วนการแช่เยือกแข็งที่อัตราเร็ว 2.4 องศาเซลเซียสต่อนาที เซลล์เกิดการแยกบ้าง และเพกทินเกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อย โทโนพลาสต์ (tonoplast) เกิดการแตก แต่พลาสมาเลมมา (plasmalemma) ส่วนใหญ่ยังคงสภาพเดิม ขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบช้า (0.19 และ 0.05 องศาเซลเซียสต่อนาที) มีผลทำลายโครงสร้างของเนื้อเยื่อ เนื่องจากผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ ทำให้เซลล์เกิดการแยก พลาสมาเลมมา และโทโนพลาสต์ ถูกทำลาย ทำให้สูญเสียความดันเต่ง เซลล์เกิดการหดตัว โครงสร้างของเซลล์จับกันอย่างหลวมๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียสารประกอบเพกทินจากมิลเล็ลลาเมลล่าและผนังเซลล์

อย่างไรก็ตาม สำหรับการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 3 ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งในทุกอัตราการแช่เยือกแข็งมีปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สันนิษฐานว่า เนื่องจากปริมาณเพกทินที่ถูกทำลายจากการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1 และ 2 มีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งจึงไม่มีผลต่อการทำลายเพกทินในส่วนที่เหลือเมื่อผ่านการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 3

เมื่อพิจารณาการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำในตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบในการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้น โดยการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 3 มีปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้สูงที่สุด ($p \leq 0.05$) สันนิษฐานว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้นี้ เนื่องมาจากการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งในระหว่างการแช่เยือกแข็งซ้ำของแต่ละรอบ ทำให้เกิดการแตกสลายของสายเพกตินพอลิเมอร์ในมิลเคิลลามาเลดของผนังเซลล์ เกิดความเสียหายกับโครงสร้างของเพกติน ส่งผลให้สารประกอบเพกตินที่ไม่สามารถละลายได้ (insoluble pectic substances) เปลี่ยนเป็นส่วนของเพกตินที่ละลายได้ (soluble pectin fraction) (Ben-Arie *et al.*, 1979) ทำให้ปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้เพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Roy *et al.* (2001) ที่รายงานว่า กระบวนการแช่เยือกแข็งทำให้เพกตินที่ผนังเซลล์ถูกทำลายเป็นอย่างมาก โดยจะเกิดการแตกตัวของสายพอลิเมอร์และเกิดการละลายของเพกติน ส่งผลให้เพกตินพอลิเมอร์สลายตัวกลายเป็นเพกตินที่สั้นลงหรือมีขนาดเล็กลง เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของเพกตินลดลงทำให้ปริมาณของเพกตินที่ละลายน้ำได้เพิ่มมากขึ้น (Varanyanond *et al.*, 1999)



ภาพที่ 17 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้

หมายเหตุ ^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็ง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็ง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

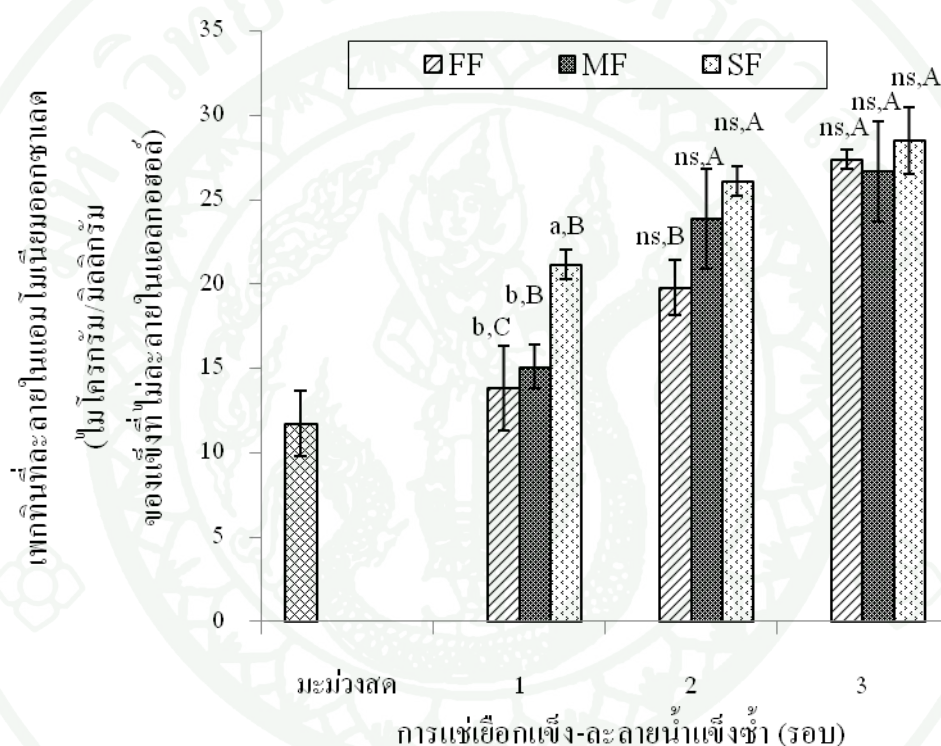
จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า ผลของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำมีอิทธิพลต่อปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้มากกว่าอัตราการแช่เยือกแข็ง

2.4 เพกตินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาเลต (ammonium oxalate soluble pectin)

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเพกตินมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส และการนิ่มของผลไม้ โดยทั่วไปเพกตินที่มีหมู่เมทอกซิลต่ำ (low-methoxyl pectins) หรือ กรดเพกติก (pectic acids) สามารถจับกับแคลเซียมและเกิดเป็น โครงสร้างพอลิเมอร์แบบเชื่อมข้าม ในลักษณะที่เรียกว่า egg-box ทำให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรง (Yu *et al.*, 1996) หากเพกตินในส่วน นี้ถูกทำลายจนเกิดความเสียหาย จะทำให้ความแน่นเนื้อของผลไม้ลดลง ซึ่งเพกตินที่ถูกทำลายนี้ สามารถละลายได้ในสารละลายแอมโมเนียมออกซาเลต Prestamo *et al.* (1998) รายงานว่า เพกตินที่ ละลายในแอมโมเนียมออกซาเลตมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้แครอทที่ผ่านการแช่เยือกแข็งเกิดการนิ่ม นอกจากนี้ Ketsa *et al.* (1998) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการนิ่มและการเปลี่ยนแปลงปริมาณ เพกตินที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ในระหว่างการสุกของมะม่วง พบว่า ปริมาณเพกตินที่ ละลายในแอมโมเนียมออกซาเลตเพิ่มขึ้น ทำให้ความแน่นเนื้อลดลง

ภาพที่ 18 และตารางผนวกที่ ค4 แสดงปริมาณเพกตินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซา- เลตของตัวอย่างมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง จากผลการทดลอง พบว่า ตัวอย่าง มะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีปริมาณเพกตินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาเลตสูงกว่ามะม่วงสด และการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลต่อปริมาณเพกตินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาเลต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำทำให้ปริมาณเพกตินที่ ละลายในแอมโมเนียมออกซาเลตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เพกตินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาเลต ของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า ของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1 มี ปริมาณสูงกว่าตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็ว ($p \leq 0.05$) ผลการ ทดลองที่ได้นี้อาจเนื่องมาจากการแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ (Sun and Zheng, 2006) ซึ่งสามารถทำลายโมเลกุลของเพกตินได้มากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและ แบบเร็ว เป็นผลให้เกิดการแตกสลายของเพกตินชนิดที่มีหมู่เมทอกซิลต่ำที่สามารถจับกับไอออน ของแคลเซียม เพกตินเหล่านี้จะสามารถละลายในตัวทำละลายออกซาเลตได้ เป็นผลให้ปริมาณ เพกตินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาเลตของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีปริมาณสูง กว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งที่อัตราการแช่เยือกแข็งอื่นๆ ขณะที่อัตราการแช่เยือกแข็งทั้ง 3 ระดับ ของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำในรอบที่ 2 และ 3 ไม่มีผลต่อปริมาณเพกตินที่ละลาย ในแอมโมเนียมออกซาเลต ($p > 0.05$) จากผลการทดลองนี้คาดว่าเนื่องจากผลึกน้ำแข็งที่เกิดจากการ แช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 2 และ 3 มีผลในการทำลายเพกตินมากกว่าอัตราการแช่เยือก

แข็ง ดังนั้น อิทธิพลของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำจึงบดบังผลของอัตราการแช่เยือกแข็งไปจนไม่สามารถเห็นความแตกต่างของเพกทินที่ถูกทำลายด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง ทำให้ปริมาณเพกทินที่ถูกทำลายมีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลทำให้เพิ่มจำนวนของผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ ทำให้เกิดการทำลายอย่างรุนแรงกับผนังเซลล์ ส่งผลให้มีปริมาณเพกทินที่ถูกทำลายเป็นจำนวนมาก จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำมีอิทธิพลต่อปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेटมากกว่าอัตราการแช่เยือกแข็ง



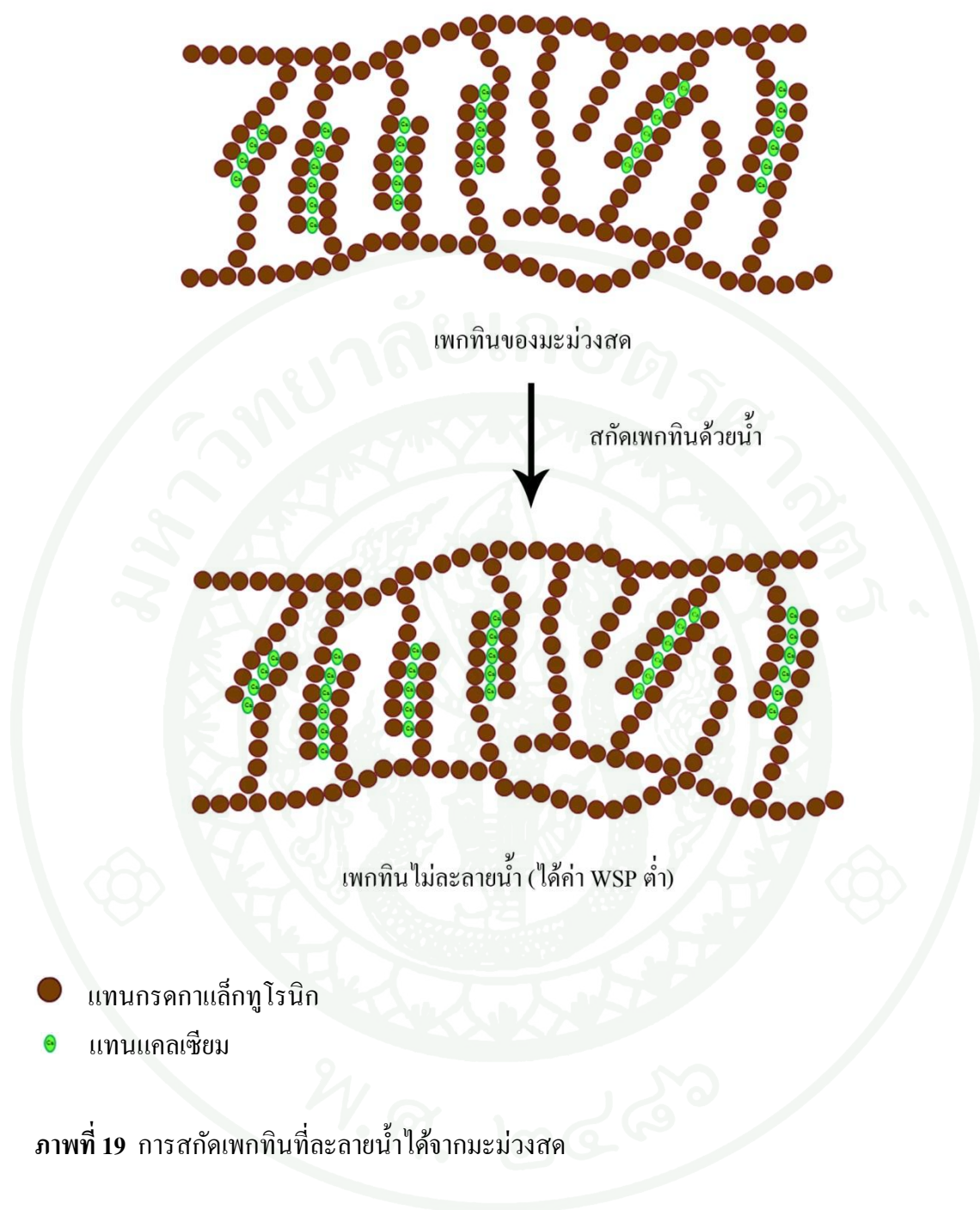
ภาพที่ 18 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेट

หมายเหตุ ^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็ง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

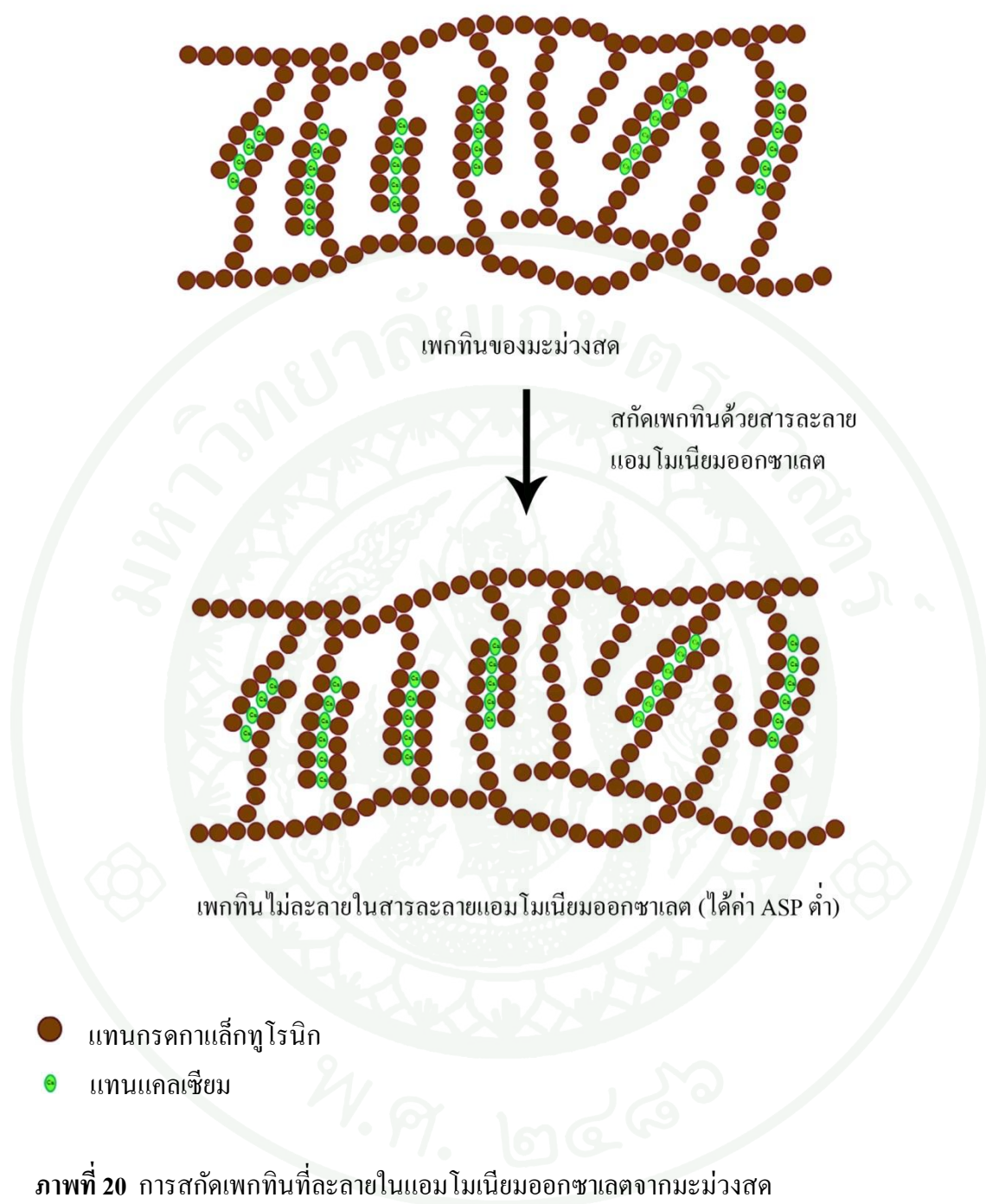
^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

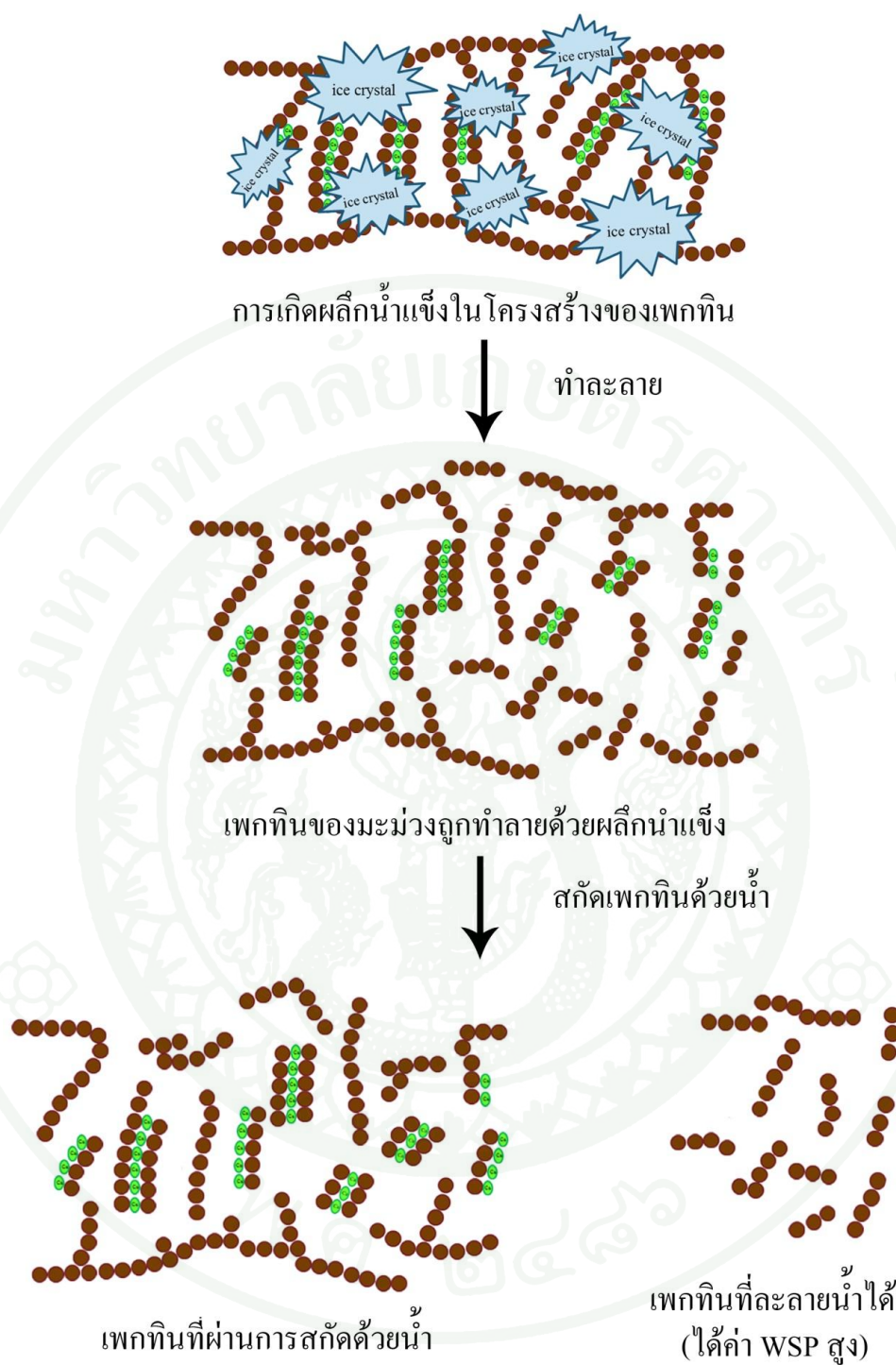
^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้สันนิษฐานว่าการเพิ่มขึ้นของเพกทินที่ละลายใน แอมโมเนียมออกซาลेटในตัวอย่างมะม่วงหลังแช่เยือกแข็ง เนื่องมาจากการเกิดของผลึกน้ำแข็ง ทำให้เกิดการแตกสลายของสายเพกทินที่มีโครงสร้างเป็นลักษณะเหมือน egg-box โดยไฮโดรเจน- แล็กทูโรแนนที่จับกับไอออนของแคลเซียมเกิดการแตกออกจากโครงสร้างของ egg-box และ ออกซาลेटไอออนซึ่งเป็นสารคีเลต (chelating agent) จะดึงแคลเซียมออกจากโมเลกุลของเพกทินที่ แตกออกจากโครงสร้าง egg-box เกิดเป็นเพกทินอิสระที่มีหมู่เมทอกซิลต่ำ (free low methoxyl pectin) หรือกรดเพกติก ซึ่งสามารถละลายได้ในสารละลายแอมโมเนียมออกซาลेट (Taboada *et al.*, 2010) ทำให้ปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेटเพิ่มขึ้น ด้วยสาเหตุนี้ จึงทำให้ เพกทินสูญเสียการยึดเหนี่ยวกันระหว่างพอลิเมอร์และถูกปลดปล่อยออกจากผนังเซลล์ในชั้นปฐุม ภูมิและมิลเคิลลามลล่า หรือยังคงจับกับผนังเซลล์แบบหลวมๆ (Roy *et al.*, 2001) เมื่อโครงสร้าง egg-box ถูกทำลาย ทำให้เกิดการสูญเสียความแข็งแรงของผนังเซลล์และมีผลต่อความแน่นเนื้อของ ผลไม้เป็นอย่างมาก ดังนั้น การแช่เยือกแข็งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบเพกทินที่เป็น โครงสร้างของเซลล์มะม่วง ทำให้ความแน่นเนื้อของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและละลาย น้ำแข็งแล้วมีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยการเปลี่ยนแปลงสารประกอบเพกทิน ของมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง สามารถสรุปเป็นกลไกดังแสดงในภาพที่ 19 – 22



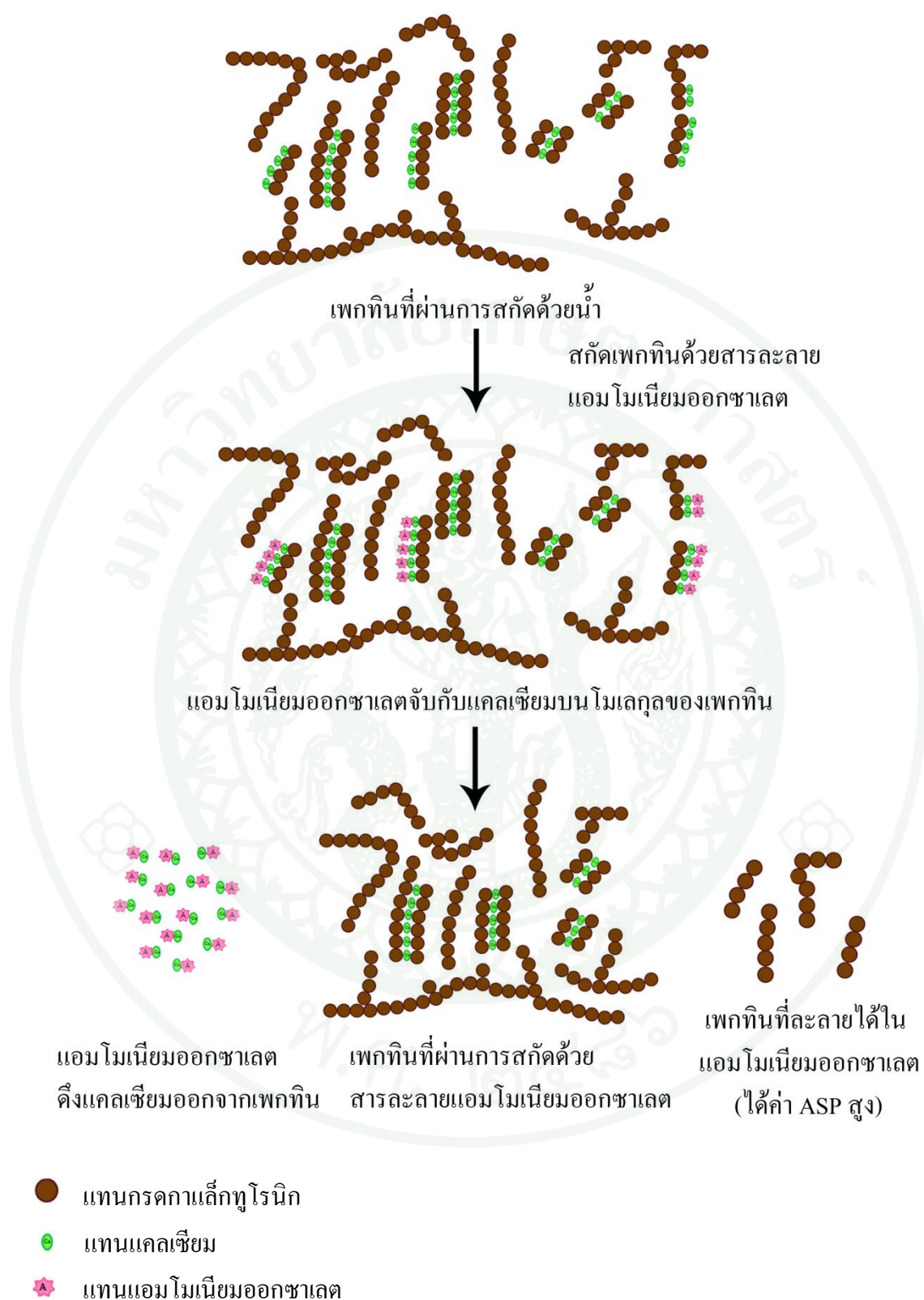
ภาพที่ 19 การสกัดเพกทินที่ละลายน้ำได้จากมะม่วงสด





- แทนกรดกาแล็กทูโรนิก
- แทนแคลเซียม

ภาพที่ 21 กลไกการทำลายเพกทินจากโครงสร้าง egg-box ด้วยผลึกน้ำแข็งและการสกัดเพกทินด้วยน้ำ



ภาพที่ 22 กลไกการทำลายเพกทินจากโครงสร้าง egg-box ด้วยฟลิกน้าแข็งและการสกัดเพกทินด้วยสารละลายแอมโมเนียมออกซาลेट

3. ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็งละลายน้ำแข็งซ้ำต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

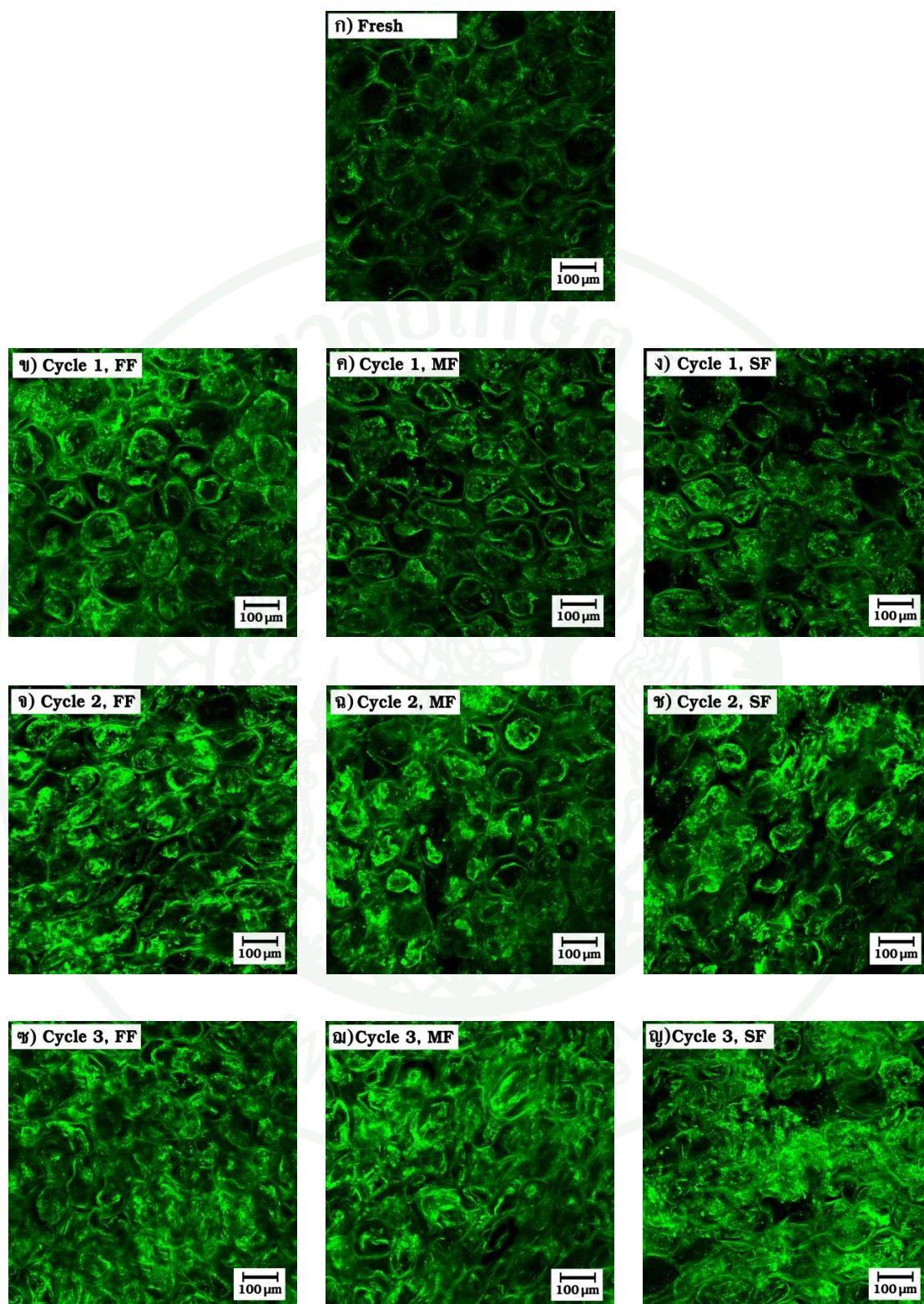
จากการพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง (CLSM) ซึ่งแสดงภาพของโครงสร้างระดับจุลภาคภายในเนื้อเยื่อของมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งที่ 3 ระดับ และการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ 1-3 รอบ (ภาพที่ 23) จากภาพสามารถสังเกตเห็นเซลล์และผนังเซลล์ของมะม่วงสดได้อย่างชัดเจน การจัดเรียงตัวของเซลล์หนาแน่นและมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งเนื้อเยื่อของมะม่วง ผนังเซลล์มีความสมบูรณ์ไม่เกิดการฉีกขาดและสามารถกักเก็บของเหลวภายในเซลล์ไว้ได้ เซลล์มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีความเต่งไม่หดตัว ดังแสดงในภาพที่ 23ก

สำหรับการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำในรอบที่ 1 ที่การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (-80 องศาเซลเซียส) ทำให้เซลล์เกิดความเสียหายน้อยที่สุด จะเห็นว่าเซลล์ยังสามารถคงรูปร่างเดิมไว้ได้ คือ มีลักษณะเป็นทรงกลมใกล้เคียงกับเซลล์ของมะม่วงสด ดังแสดงในภาพที่ 23ข ส่วนตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (-40 องศาเซลเซียส) โครงสร้างของเซลล์มีลักษณะแฟบเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 23ค และการแช่เยือกแข็งแบบช้า (-20 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากกับโครงสร้างของเซลล์ ซึ่งจะเห็นว่าความสม่ำเสมอของเซลล์ลดลง สามารถสังเกตเห็นช่องว่างระหว่างเซลล์ขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 23ง ซึ่งสอดคล้องกับ Chassagne-Berces *et al.* (2009) ที่ศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งของแอปเปิ้ล พบว่า การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลล์ และเซลล์เกิดการยุบตัวลง ทำให้ช่องว่างระหว่างเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส ทำให้โครงสร้างของเซลล์มีลักษณะคล้ายกับแอปเปิ้ลสดมากที่สุด

ในกรณีของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำในรอบที่ 2 สามารถสังเกตเห็นช่องว่างระหว่างเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีจำนวนมากขึ้น โดยตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว เซลล์มีลักษณะแฟบ หดตัวจนกระทั่งผิดรูปร่าง ดังแสดงในภาพที่ 23จ ส่วนตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง ผนังเซลล์เกิดการฉีกขาด ดังแสดงในภาพที่ 23ฉ และตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าเซลล์ที่ถูกทำลายมีจำนวนมากขึ้น เซลล์ยุบตัวลงและการติดกันกับเซลล์ข้างเคียงลดลง ดังแสดงในภาพที่ 23ช

นอกจากนี้ การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำในรอบที่ 3 สามารถสังเกตเห็นเซลล์ที่ยุบตัวมีจำนวนมากขึ้น เซลล์มีรูปร่างผิดปกติ ไม่สามารถคงรูปของเซลล์ไว้ได้ และเกิดการฉีกขาดของผนังเซลล์ ทำให้องค์ประกอบภายในเซลล์ไหลมารวมกัน ดังแสดงในภาพที่ 23 ข-ญ เซลล์ของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งถูกทำลายด้วยผลึกน้ำแข็ง ทำให้เซลล์เกิดการหดตัว และผิดรูปร่างไป

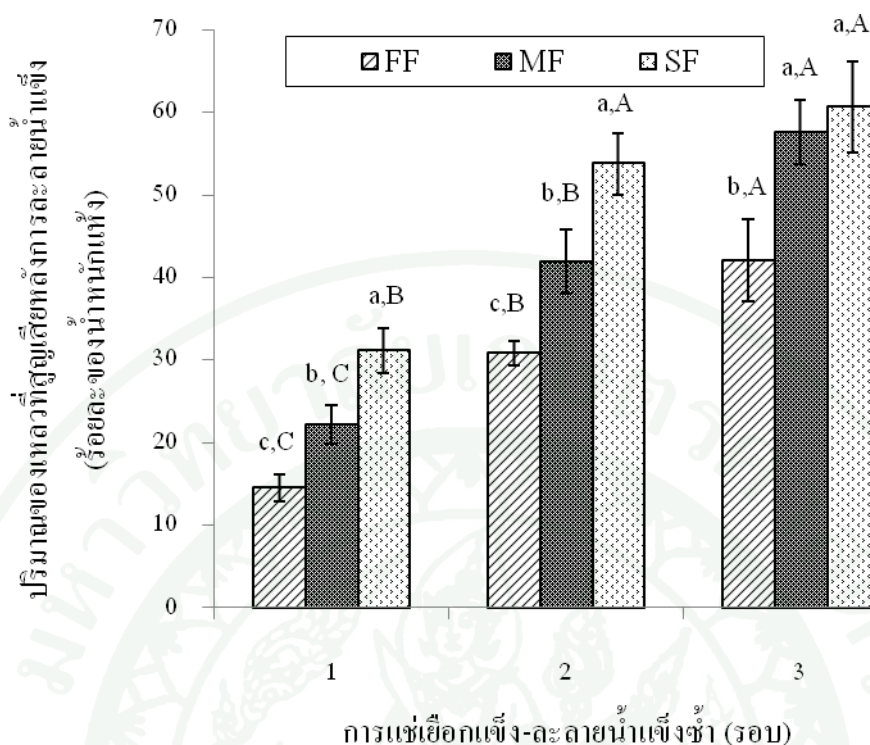
การแช่เยือกแข็งที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (-20 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดการสลายตัวของผนังเซลล์มากกว่าการแช่เยือกแข็งที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วในทุกๆ รอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ เนื่องจากการแช่เยือกแข็งที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (-20 องศาเซลเซียส) เป็นสาเหตุให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีจำนวนน้อยแต่ขนาดของผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลายและโครงสร้างของเซลล์เกิดความเสียหาย ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมแตกสลาย ความตึงของเซลล์ลดลง เซลล์เกิดการหดตัวและสูญเสียความแน่นเนื้อไป ในทางตรงกันข้ามการแช่เยือกที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (-40 องศาเซลเซียส) และแบบเร็ว (-80 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูงกว่า ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถรักษาโครงสร้างเซลล์ของมะม่วงแช่เยือกแข็งได้มากกว่า (Chassagne-Berces *et al.*, 2009) ซึ่งสอดคล้องกับผลของเพกทินที่ถูกทำลาย (ภาพที่ 17 และ 18) และสามารถละลายออกมาในตัวทำละลายที่ใช้สกัดได้



ภาพที่ 23 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่งของมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง

4. ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็งละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งที่ระดับต่างๆ และการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำทั้ง 3 รอบ แสดงในภาพที่ 24 และตารางผนวกที่ ค5 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบซ้ำมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งสูงที่สุด สำหรับการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบซ้ำมีค่าเท่ากับ 31.15 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งเพียง 14.56 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ยิ่งไปกว่านั้น ในการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 3 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบซ้ำมีค่าสูงถึง 60.70 เปอร์เซ็นต์ Fuchigami *et al.* (1995a) พบว่า ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของแครอทมีค่าสูงขึ้น เมื่ออัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งต่ำลง จากผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่า การแช่เยือกแข็งที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าเป็นสาเหตุให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้ผนังเซลล์แตก (Roy *et al.*, 2001) ผนังเซลล์ไม่สามารถกักเก็บของเหลวภายในเซลล์ไว้ได้ ทำให้เกิดการรั่วไหลของของเหลวภายในเซลล์ออกนอกเซลล์ ส่งผลให้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งมีค่าสูงขึ้น เมื่อจำนวนรอบในการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ จากผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่า โครงสร้างของมะม่วงเกิดการยุบตัวในระหว่างทำละลาย ส่งผลให้เซลล์สูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำและนำไปสู่การปลดปล่อยของเหลวออกนอกเซลล์ (Van Buggenhout *et al.*, 2006) ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายของโครงสร้างระดับจุลภาคภายในเนื้อเยื่อของมะม่วง (ภาพที่ 23)



ภาพที่ 24 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง

หมายเหตุ ^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็ง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

5. ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อเนื้อสัมผัสของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

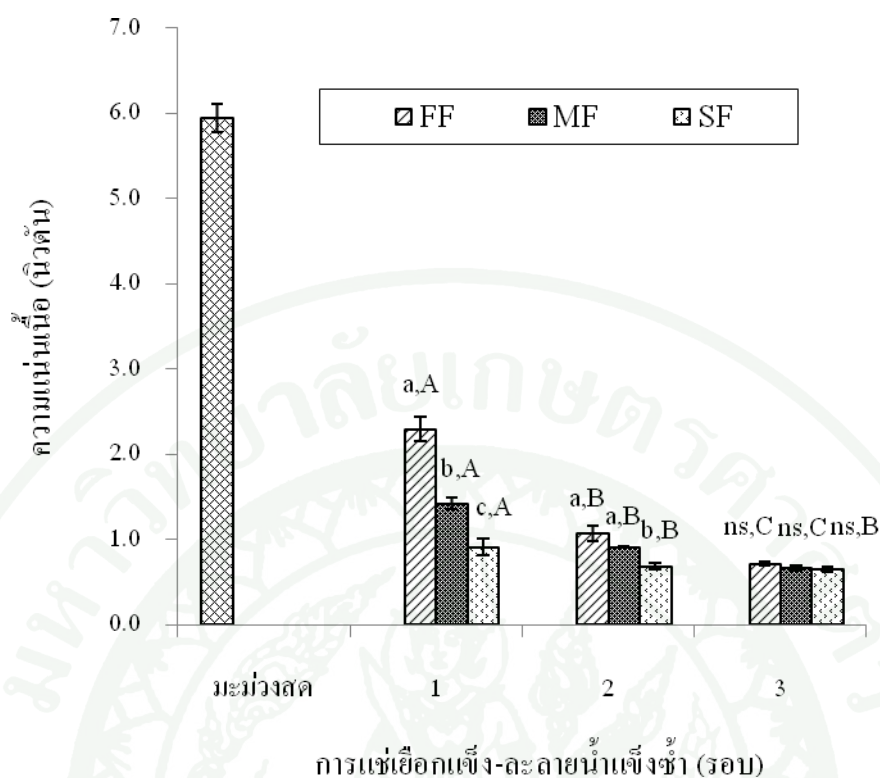
อัตราการแช่เยือกแข็งเป็นตัวกำหนดขนาดของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น จึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับความเสียหายของโครงสร้างเซลล์ด้วย ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสโดยตรง (Sousa *et al.*, 2007) โดยทั่วไปการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วเป็นที่ยอมรับกันว่าทำให้คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของอาหารแช่เยือกแข็งดีกว่าการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (Chassagne-Berces *et al.*, 2010)

ในการทดลองนี้วิเคราะห์เนื้อสัมผัสของมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง โดย การวัดความแน่นเนื้อด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและด้วยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

5.1 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส

ค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสของมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง แสดงดังภาพที่ 25 และตารางผนวกที่ 6 ซึ่งค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างได้มาจากค่าแรงกดสูงสุด (maximum force) จากผลการทดลอง พบว่า มะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและทำละลายมีค่าความแน่นเนื้อลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงสด (5.94 นิวตัน) สอดคล้องกับ Chassagne-Berces *et al.* (2010) ที่พบว่า มะม่วงและแอปเปิ้ลที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้ว ทำให้ความแน่นเนื้อมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์แตก เกิดความเสียหายกับผนังเซลล์ มีผลทำให้สูญเสียความแน่นเนื้อ เนื้อผลไม้นุ่มลง (Fennema *et al.*, 1973) และเมื่อพิจารณาที่อัตราการแช่เยือกแข็ง ของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1 พบว่า ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว มีค่าความแน่นเนื้อ (2.30 นิวตัน) สูงกว่าตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (1.43 นิวตัน) และแบบช้า (0.92 นิวตัน) ตามลำดับ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่กล่าวว่าอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งที่ต่างกันมีผลต่อเนื้อสัมผัสของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ส่วนการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 2 ค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีค่าต่ำที่สุด ต่างกับตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและแบบเร็วอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีมาก่อน (Chassagne-Berces *et al.*, 2009; Chassagne-Berces *et al.*, 2010) ที่ศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อเนื้อสัมผัสของผลไม้ แสดงให้เห็นว่าการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำลายเนื้อสัมผัสน้อยกว่าอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ขณะที่การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่กว่า ซึ่งทำลายโครงสร้างของเซลล์ได้มากกว่า (Charoenrein and Reid, 1989) ขณะที่การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 3 ของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกด้วยอัตราเร็วทั้ง 3 แบบ มีค่าความแน่นเนื้อไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) คาดว่าเนื่องจาก เนื้อสัมผัสของมะม่วงสูญเสียความแน่นเนื้อเป็นอย่างมากเมื่อผ่านการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำหลายรอบ โครงสร้างที่เคยยึดเหนี่ยวกันถูกทำลาย ทำให้เนื้อมะม่วงมีความแน่นเนื้อลดลงมากจนกระทั่งบดบังผลของอัตราการแช่เยือกแข็ง

นอกจากนี้ เมื่อจำนวนรอบในการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้นจากรอบที่ 1 ถึงรอบที่ 3 ทำให้ค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งทั้ง 3 แบบ มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการเกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งและทำละลาย ผลึกน้ำแข็งนี้ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเซลล์และ เซลล์สูญเสียรูปร่าง เป็นผลให้เซลล์ใกล้เคียงแตก เมื่อนำมาละลายน้ำแข็ง เซลล์จะไม่กลับมา มีรูปร่างและความเต่งเหมือนเดิม (Fellows, 1990) ส่งผลให้โครงสร้างของเซลล์ถูกทำลาย ทำให้เซลล์ เกิดความเสียหายเพิ่มมากขึ้น (Fennema *et al.*, 1973; Fabloul *et al.*, 1996) เมื่อนำกลับไปแช่เยือก แข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำจึงทำให้ค่าความแน่นเนื้อลดลง จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า การ แช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำมีอิทธิพลต่อค่าความแน่นเนื้อมากกว่าอัตราการแช่เยือกแข็ง ซึ่งผลที่ ได้นี้เป็นไปตามสมมติฐานที่ว่าจำนวนรอบของการแช่เยือกแข็งและทำละลายทำให้โครงสร้างและ องค์ประกอบของผนังเซลล์ของมะม่วงเกิดความเสียหาย ซึ่งส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของมะม่วงเป็น อย่างมาก



ภาพที่ 25 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส

หมายเหตุ ^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็ง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

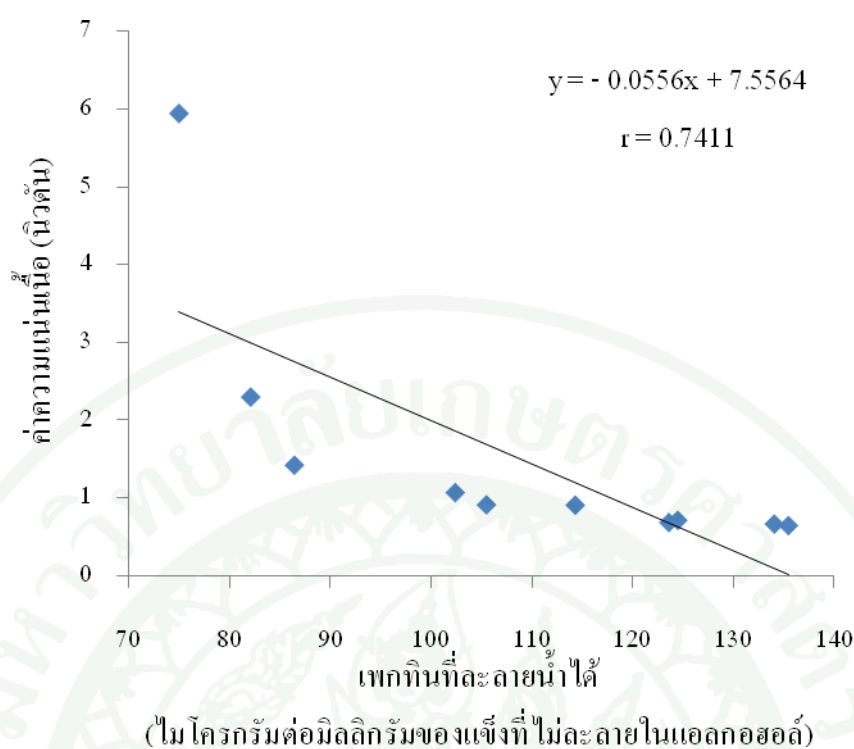
^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

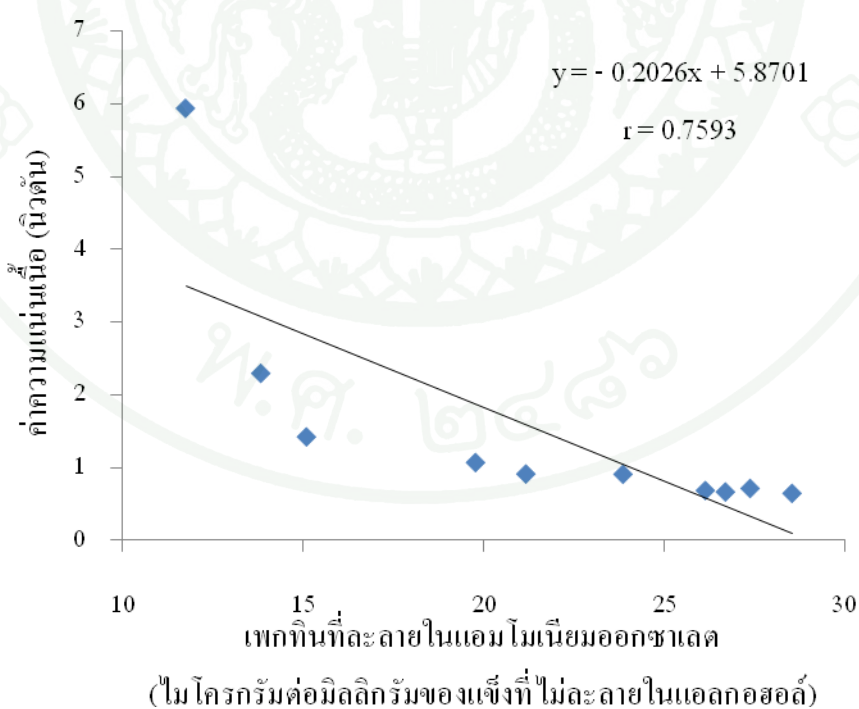
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นเนื้อและส่วนของเพกทิน (pectin fraction) ของมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งส่งผลให้การละลายของเพกทินที่ละลายน้ำได้และเพกทินชนิดที่จับกับโลหะเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดร่วมกับการสูญเสียเนื้อสัมผัส โดย Prestamo *et al.* (1998) ศึกษาผลของการแช่เยือกแข็งต่อเนื้อสัมผัสและสารประกอบเพกทินของแครอท พบว่า แครอทที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีความแน่นเนื้อลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับแครอทสด เนื่องจากเพกทินบริเวณมิลเล็ลลามเลลาของเซลล์ถูกทำลาย โดยปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ และปริมาณเพกทินที่ละลายในโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟตซึ่งเป็นเพกทินที่จับกับแคลเซียมของแครอทที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีค่าสูงขึ้น ทำให้เนื้อสัมผัสของแครอทเกิดการนิ่มในระหว่างการแช่เยือกแข็ง

ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นเนื้อกับปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ และปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेटของมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง 3 ระดับ คือ การแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็ว ของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ 1 – 3 รอบ แสดงในภาพที่ 26 และภาพที่ 27 ตามลำดับ โดยแกน x แสดงถึง ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้และปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेट ส่วนแกน y แสดงถึง ค่าความแน่นเนื้อ จากกราฟ พบว่า ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้และปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेटมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกับค่าความแน่นเนื้อ ซึ่งพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) 0.7411 และ 0.7593 ตามลำดับ กล่าวคือ เมื่อจำนวนรอบในการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ และปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेटมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันความแน่นเนื้อของมะม่วงมีค่าลดลง เนื่องจากผลึกน้ำแข็งทำลายโครงสร้าง egg-box ของเพกทิน ทำให้โมเลกุลของเพกทินแตกออกจากโครงสร้าง ส่งผลให้สายเพกทินพอลิเมอร์ที่เคยยึดเกาะกันถูกทำลายจนสั้นลงและสามารถละลายน้ำได้ (Ben-Arie *et al.*, 1979) เมื่อนำเพกทินที่ถูกทำลายด้วยผลึกน้ำแข็งมาสกัดด้วยสารละลายแอมโมเนียมออกซาลेट ออกซาลेटไอออนสามารถดึงแคลเซียมออกจากโมเลกุลของเพกทิน เกิดเป็นเพกทินอิสระที่สามารถละลายในสารละลายแอมโมเนียมออกซาลेटได้ (Taboada *et al.*, 2010) และ เมื่อโครงสร้างเพกทินที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์ถูกทำลาย เซลล์สูญเสียความสามารถในการยึดเกาะกัน ทำให้ผนังเซลล์สูญเสียความแข็งแรงและส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของมะม่วง ทำให้เนื้อมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีความแน่นเนื้อลดลงและเกิดการนิ่มและขึ้น (Roy *et al.*, 2001)



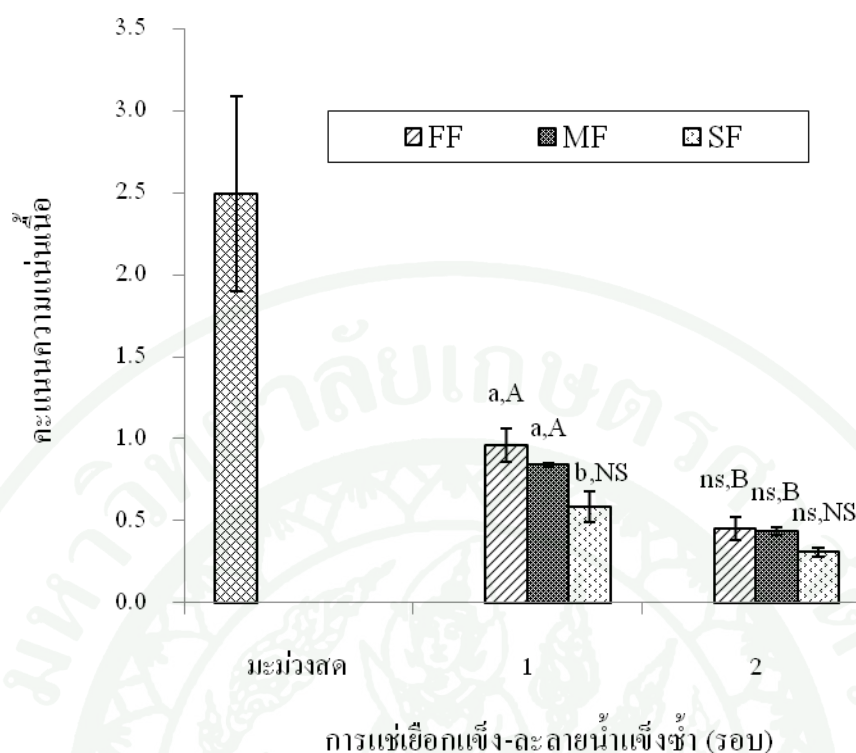
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อและปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อและปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेट

5.3 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อคะแนนความแน่นเนื้อที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัส

คะแนนความแน่นเนื้อที่ได้จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของมะม่วงสด และมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งทั้ง 3 แบบ ที่การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1 และ 2 ดังแสดงในภาพที่ 28 และตารางผนวกที่ ๑7 ประเมินโดยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 7 คน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นนิสิตคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จากการประเมินผลด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างมะม่วง พบว่า มะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งทั้ง 3 แบบ มีคะแนนความแน่นเนื้อลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงสด และตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและแบบปานกลาง ของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1 ได้รับคะแนนความแน่นเนื้อไม่แตกต่างกัน โดยได้รับคะแนนความแน่นเนื้อสูงกว่าตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 2 ได้รับคะแนนความแน่นเนื้อลดต่ำลงมาก จนผู้ทดสอบไม่สามารถแยกความแตกต่างของความแน่นเนื้อในมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วทั้ง 3 แบบ ได้ ($p > 0.05$) นอกจากนี้ เมื่อจำนวนรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งเพิ่มมากขึ้น ทำให้ได้รับคะแนนความแน่นเนื้อลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการแช่เยือกแข็งและจำนวนรอบในการแช่เยือกแข็งและทำละลายมีผลต่อเนื้อสัมผัสของมะม่วง โดยเฉพาะจำนวนรอบในการแช่เยือกแข็งและทำละลาย ทำให้ความแน่นเนื้อของมะม่วงลดลงอย่างชัดเจน ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ เพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेट และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง รวมไปถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเซลล์ของมะม่วงดังผลที่แสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 28 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อความแน่นเนื้อที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัส

หมายเหตุ ^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็ง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{A-B} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละอัตราการแช่เยือกแข็งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

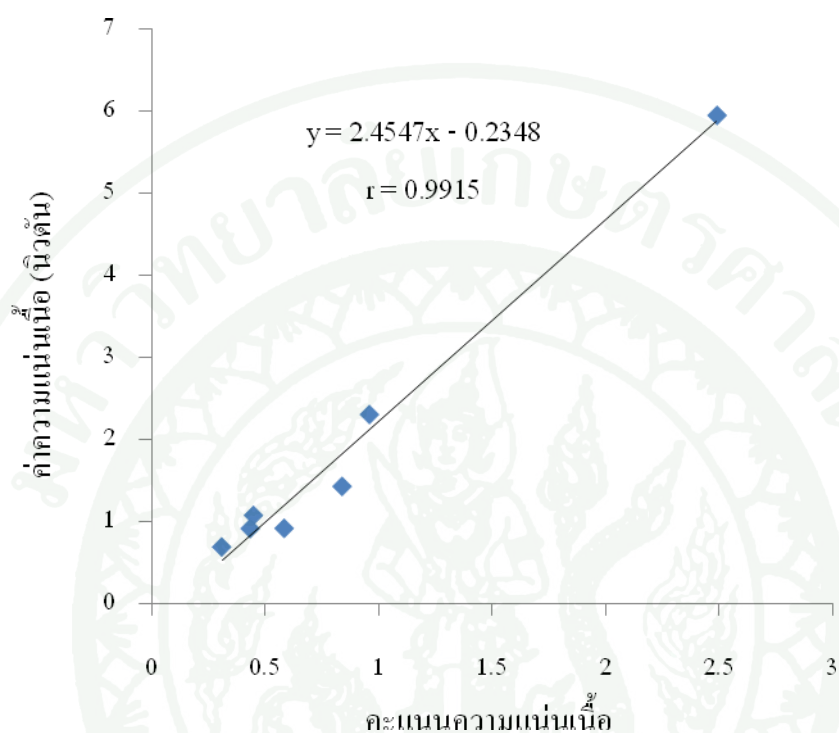
^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

5.4 ความสัมพันธ์ของความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคะแนนคุณภาพเนื้อสัมผัสจากการประเมินทางประสาทสัมผัสของมะม่วง

วิธีการวัดเนื้อสัมผัสของอาหารแบ่งได้ 2 แบบ คือ การวัดด้วยเครื่องมือและการประเมินทางประสาทสัมผัส การวัดด้วยเครื่องมือ มีข้อดี คือ สามารถบันทึกผลเป็นตัวเลขได้ และวัดซ้ำได้โดยให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน มีความผิดพลาดน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการประเมินทางประสาทสัมผัส อย่างไรก็ตาม การวัดด้วยเครื่องมือมีข้อเสียหลายประการ คือ เครื่องมืออาจมีราคาแพงมาก และไม่สามารถวัดได้ทุกลักษณะเนื้อสัมผัส เนื่องจากลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารเป็นลักษณะผสมร่างกายเท่านั้นจะสามารถสัมผัสกับลักษณะผสมได้ ด้วยเหตุนี้การวัดด้วยเครื่องมือจึงมักทำควบคู่กับการประเมินทางประสาทสัมผัส และนำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์กัน อย่างไรก็ตาม การประเมินทางประสาทสัมผัสมีข้อจำกัดที่เกิดจากอิทธิพลของสิ่งแวดล้อม สภาพร่างกาย และความไม่แน่นอนของสิ่งที่ผู้ทดสอบถือเป็นมาตรฐาน นอกจากนี้ความลำเอียงก็มีส่วนทำให้ผลการประเมินมีความผิดพลาดมาก การฝึกฝนผู้ทดสอบด้วยวิธีการที่เหมาะสม และมีหลักการประเมินที่ดี จะช่วยให้การประเมินทางประสาทสัมผัสมีความแม่นยำขึ้น (ณรงค์, 2537)

ภาพที่ 29 เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคะแนนความแน่นเนื้อจากการประเมินทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง 3 ระดับ คือ การแช่เยือกแข็งแบบช้า แบบปานกลาง และแบบเร็ว ของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1 และ 2 โดยแกน x แสดงถึง คะแนนความแน่นเนื้อที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัส และแกน y แสดงถึง ค่าความแน่นเนื้อในหน่วยของนิวตันที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสจากการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง พบว่า ค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคะแนนความแน่นเนื้อที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสมีความสัมพันธ์กันอย่างสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) สูงถึง 0.9915 ซึ่งค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสแปรผันตามกับคะแนนความแน่นเนื้อที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัส กล่าวคือ เมื่อค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสลดลงหลังจากที่ตัวอย่างมะม่วงผ่านการแช่เยือกแข็งและทำละลาย คะแนนความแน่นเนื้อที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสก็ลดลงด้วยเช่นกัน ตามสมการเส้นตรง $y = 2.4547x - 0.2348$ การประเมินทางประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนเปรียบได้กับเครื่องมือชนิดหนึ่งในการตรวจสอบเนื้อสัมผัส (ไพโรจน์, 2545) ดังนั้น ความสัมพันธ์ที่ได้นี้สามารถยืนยันผลของอัตรา

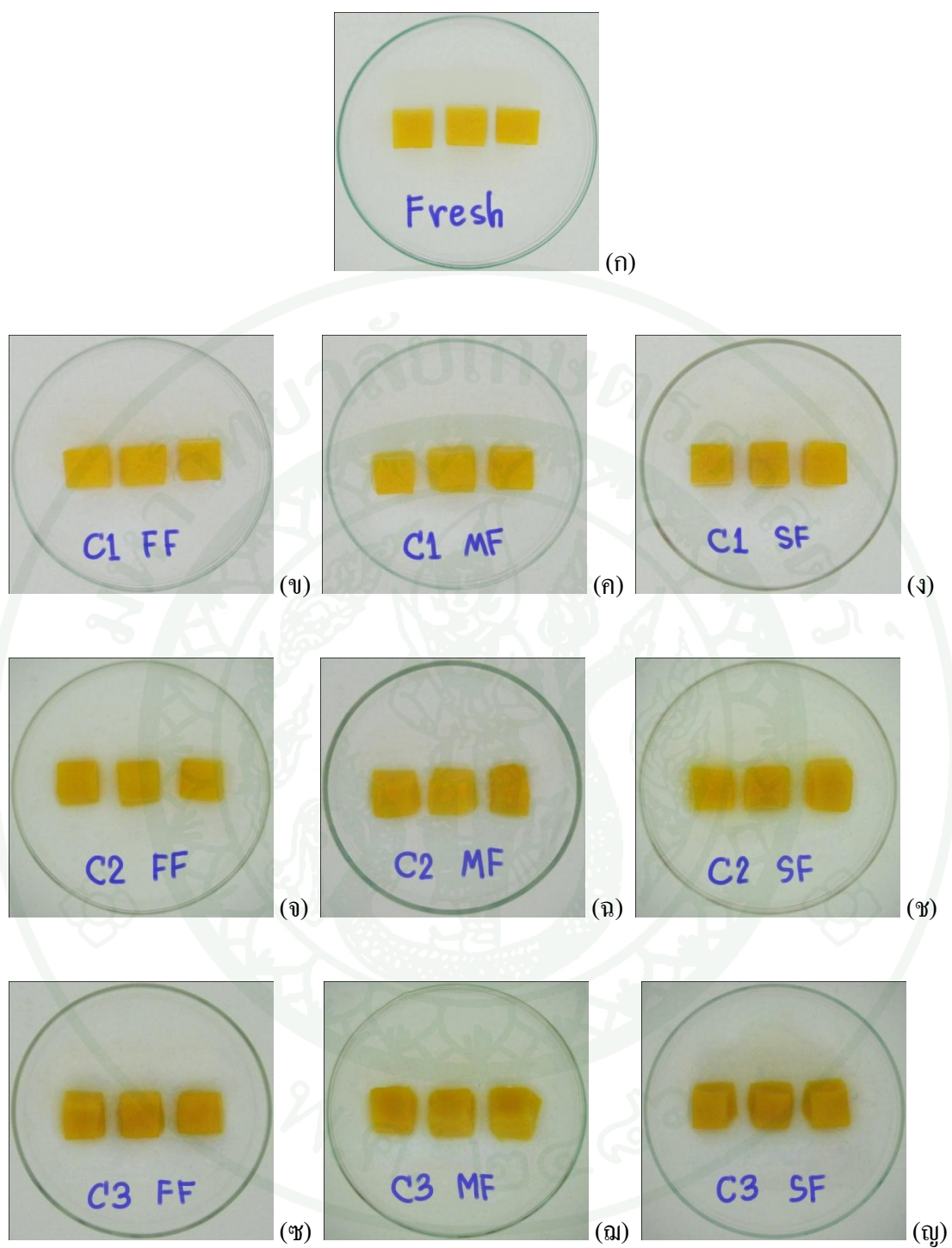
การแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของมะม่วงได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคะแนนความแน่นเนื้อจากการประเมินทางประสาทสัมผัส

6. ลักษณะปรากฏของขึ้นมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง

ภาพที่ 30 แสดงลักษณะปรากฏของขึ้นมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง จากภาพจะเห็นว่า มะม่วงสดมีรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกเต๋า สีเหลืองสว่าง (ภาพที่ 30ก) เมื่อพิจารณาที่อัตราการแช่เยือกแข็งที่ระดับต่างๆ พบว่า ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1 มีลักษณะปรากฏคล้ายมะม่วงสดมากที่สุด โดยตัวอย่างมะม่วงเป็นทรงสี่เหลี่ยมคงรูปเดิม และสีไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก (ภาพที่ 30ข) ขณะที่ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า เกิดการยุบตัวและเสียรูปเพียงเล็กน้อย มีของเหลวไหลซึมออกจากตัวอย่างมะม่วงบ้าง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากของเหลวที่อยู่บนภาชนะที่ใส่ขึ้นมะม่วง และมีสีคล้ำขึ้น (ภาพที่ 30ง) เมื่อพิจารณาที่การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ จะเห็นว่าจำนวนรอบของการแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างของขึ้นมะม่วงเกิดการยุบตัวมากขึ้น ขึ้นมะม่วงล้น ไม่สามารถรักษารูปร่างเดิมไว้ได้ ทำให้มีลักษณะผิดรูปร่างไปจากขึ้นมะม่วงสด ปริมาณของเหลวถูกปลดปล่อยออกจากขึ้นมะม่วงเพิ่มมากขึ้น สีของตัวอย่างมะม่วงเปลี่ยนเป็นสีเหลืองคล้ำ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนในตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 3 (ภาพที่ 30ข-ญ)



ภาพที่ 30 ลักษณะปรากฏของชิ้นมะม่วงสดและมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลต่อน้ำเนื้อสัมผัส ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ ปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลเลต และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขณะที่การแช่เยือกแข็งไม่มีผลต่อของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์และเพกทินทั้งหมด ($p > 0.05$)
2. จากการศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งในมะม่วง พบว่า การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (-80 องศาเซลเซียส) หรือที่อัตราเร็ว 2.91 องศาเซลเซียสต่อนาที มีผลต่อน้ำเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งน้อยกว่าการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (-40 องศาเซลเซียส) และแบบช้า (-20 องศาเซลเซียส) ตามลำดับ
3. การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำทำลายน้ำเนื้อสัมผัสของมะม่วงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 3 มีปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ ปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลเลต และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ขณะที่มีความแน่นเนื้อและคะแนนความแน่นเนื้อต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$)
4. จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำมีอิทธิพลต่อเพกทินที่ละลายน้ำได้ เพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลเลต ค่าความแน่นเนื้อ และคะแนนความแน่นเนื้อของมะม่วงแช่เยือกแข็งมากกว่าอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง
5. โครงสร้างของเซลล์ถูกทำลายโดยกระบวนการแช่เยือกแข็งและทำละลายน้ำแข็ง เซลล์เกิดความเสียหาย ทำให้การละลายของสารประกอบเพกทินที่ผนังเซลล์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากโครงสร้างระดับจุลภาค การยุบตัวของเซลล์และการฉีกขาดของผนังเซลล์ ส่งผลให้มีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งเป็นจำนวนมาก นำไปสู่การสูญเสียความแน่นเนื้อของมะม่วงในระหว่างการแช่เยือกแข็ง

ดังนั้น อัตราเร็วที่เหมาะสมในการแช่เยือกแข็งมะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองตามสภาวะที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ การแช่เยือกแบบเร็ว (-80 องศาเซลเซียส) หรือที่อัตราเร็ว 2.91 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำให้มะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสดีที่สุด นอกจากนี้ควรหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้ว ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการขนส่งจนกระทั่งการบริโภคซึ่งอาจทำให้เกิดการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำขึ้น

ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสและสารประกอบเพกทินของมะม่วงแช่เยือกแข็ง ดังนั้นจึงน่าจะศึกษาเพิ่มเติมถึงวิธีป้องกันหรือปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็ง ได้แก่ การเติมแคลเซียม เพื่อช่วยให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้มะม่วงแช่เยือกแข็งมีความสามารถในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้มากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมอนามัย กองโภชนาการ กระทรวงสาธารณสุข. 2544. ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย. โรงพิมพ์องค์การทหารผ่านศึก, กรุงเทพฯ.

กรรณิการ์ ริมศิริ. 2555. ปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างระดับจุลภาคและคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งพันธุ์น้ำดอกไม้มหาชนก และโชคอนันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จริงแท้ ศิริพานิช. 2549. ชีวิตวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวและการวางของพืช. โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ, นครปฐม.

ณรงค์ นิยมวิทย์. 2537. การชิมอาหาร : ทฤษฎีและวิธีการปฏิบัติ. โรงพิมพ์ วี.บี. บุ๊คเซ็นเตอร์ (เค. ยู.), กรุงเทพฯ.

คนัย บุญยเกียรติ. 2540. สรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวของพืชสวน. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

นิธิยา รัตนปนนท์. 2549. เคมีอาหาร. โรงพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ไพบุลย์ ชรรมรัตน์วาลิก. 2532. กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ไพโรจน์ วิริยจารี. 2545. การประเมินทางประสาทสัมผัส. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

มนต์ราม อินทศิริ. 2550. การปรับปรุงเส้นขนมจีนเพื่อพัฒนาเป็นขนมจีนหมักพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2535. วิสวกรรมการแปรรูป: การถนอมอาหาร. โอ. เอส. พรินติ้งเฮาส์, กรุงเทพฯ.

รัชณี ศรีวรรณวิทย์. 2541. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวผัดกุ้งสำเร็จรูปแช่เยือกแข็ง วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรรณฯ ตูลย์ชัย. 2551. เคมีอาหารของคาร์โบไฮเดรต. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
กรุงเทพฯ.

ศรีสุวรรณ แซ่เบ๊. 2533. การแช่แข็งผลไม้เศรษฐกิจของไทย วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

ศุทธิพร ศรีพัฒนพิพัฒน์. 2540. การแช่เยือกแข็งชิ้นมะม่วงน้ำดอกไม้และโชคอนันต์ วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุทธวัฒน์ เบญจกุล. 2548. เคมีและคุณภาพสัตวันน้ำ. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

สนั่น จำเลิศ. 2527. มะม่วงในระบบปลูกชิด. โรงพิมพ์อักษรพิทยา, กรุงเทพฯ. 294 น.

สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2546. กระบวนการแช่เยือกแข็งอาหาร, น. 154-186. ใน คณาจารย์
ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, บรรณาธิการ. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
การอาหาร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Ahmed, A.E.R., and J.M. Labavitch. 1977. A simplified method for accurate determination of
cell wall uronide content. **J. Food Biochem.** 1: 361–365.

Ali, Z.M., S. Armugam and H. Lazan. 1995. β -Galactosidase and its significance in ripening
mango fruit. **Phytochem.** 38(5): 1109-1114.

Allan-Wojtas, P., H.D. Goff, R. Stark and S. Carbyn. 1999. The effect of freezing method and
frozen storage conditions on the microstructure of wild blueberries as observed by cold-
stage scanning electron microscopy. **Scanning.** 21: 334-347.

- Alonso, J., M.E. Tortosa, W. Canet and M.T. Rodriguez. 2005. Ultrastructural and changes in pectin composition of sweet cherry from the application of prefreezing treatment. **J. Food Sci.** 70: 526-530.
- A.O.A.C. 2000. **Official Method of Analysis**. 17th ed., The Association of official Analytical Chemists, Arlington, Virginia.
- Arunyanart, T. and S. Charoenrein. 2008. Effect of sucrose on the freeze-thaw stability of rice starch gels: Correlation with microstructure and freezable water. **Carbohydr. Polym.** 74: 514-518.
- Barbier, M. and J. Thibault. 1982. Pectic substances of cherry fruits. **Phytochem.** 21: 111-115.
- Ben-Arie, R., L. Sonogo and C. Frankel. 1979. Changes in pectic substances in ripening pears. **J. Am. Soc. Hortic. Sci.** 104: 500-505.
- Bhattacharya, M., T.M. Langstaff and W.A. Berzonsky. 2003. Effect of frozen storage and freeze-thaw cycles on the rheological and baking properties of frozen doughs. **Food Res. Int.** 36: 365-372.
- Blumenkrantz, N. and G. Asboe-Hansen. 1973. New method for the quantitation determination of uronic acids. **Anal Biochem.** 54: 484-489.
- Boast, M.F.G. 1985. The technology of freezing, pp. 6-7. In R.K. Robinson, ed. **Microbiology of Frozen Food**. Elsevier Applied Science Publishers, New York.
- Carpita, N. and M. McCann. 2000. **The cell wall in biochemistry and molecular biology of plants**. Available Source: <http://www.sigmaaldrich.com/life-science/metabolomics/enzyme-explorer/learning-center/lysing-enzymes.html>, November 24, 2010.

- Chang, C.Y., H.J. Liao and T.P. Wu. 1996. Relationships between the textural changes and the contents of calcium, magnesium ions, and non-freezing water in the alcohol-insoluble solids of snap bean pods during cooking processes. **Food Chem.** 55: 49-53.
- Charoenrein, S and D.S. Reid. 1989. Effect of freezing conditions and storage temperature on the stability of frozen green beans, pp. 226-228. *In* J.J.Jen, ed. **Quality Factors of Fruits and Vegetables Chemistry and Technology**. American Chemical Society, Washington, DC.
- _____, O. Tatirat and J. Muadklay. 2008. Use of centrifugation-filtration for determination of syneresis in freeze-thaw starch gels. **Carbohydr. Polym.** 73: 143-147.
- _____, _____, K. Rengsutthi and M. Thongngam. 2011. Effect of konjac glucomannan on syneresis, textural properties and the microstructure of frozen rice starch gels. **Carbohydr. Polym.** 83: 291-296.
- Chassagne-Berces S., F. Fonseca, M. Citeau and M. Marin. 2010. Freezing protocol effect on quality properties of fruit tissue according to the fruit, the variety and the stage of maturity. **LWT - Food Sci. Technol.** 43: 1441-1449.
- _____, C. Poirier, M.F. Devaux, F. Fonseca, M. Lahaye, G. Pigorini, C. Girault, M. Marin and F. Guillon. 2009. Changes in texture, cellular structure and cell wall composition in apple tissue as a result of freezing. **Food Res. Int.** 42: 788-797.
- El-Zoghbi, M. 1994. Biochemical changes in some tropical fruits during ripening. **Food Chem.** 49: 33-37.
- Fabloul, D., M.G. Scanlon, L.G. Dushmickyb and S.J. Symod. 1996. The fracture toughness of pea testa in relation to temperature abuse during frozen storage. **Food Res. Int.** 29: 791-197.

- Fellows, P. 1990. **Food Processing Technology: Principles and Practice**. Ellis Horwood Limited, New York.
- Fennema, O.R., W.D. Powrie and E.H. Marth. 1973. **Low Temperature Preservation of Foods and Living Matter**. Marcel Dekker, New York.
- Fischer, R.L. and A.B. Bennett. 1991. Role of cell wall hydrolases in fruit ripening. **Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.** 42: 675-703.
- Fuchigami, M., N. Hyakumoto and K. Miyazaki. 1995a. Programmed freezing affects texture, pectic composition and electron microscopic structures of carrots. **J. Food Sci.** 60: 137-141.
- _____, N. Kato and A. Teramoto. 1997. High-pressure-freezing effects on textural quality of carrots. **J. Food Sci.** 62: 804-808.
- _____, _____ and _____. 1998. High-pressure-freezing effects on textural quality of Chinese cabbage. **J. Food Sci.** 63: 122-125.
- _____, K. Miyazaki and N. Hyakumoto. 1995b. Frozen carrots texture and pectic components as affected by low-temperature-blanching and quick freezing. **J. Food Sci.** 60: 132-136.
- Galetto, C.D., R.A. Verdini, S.E. Zorrilla and A.C. Rubiolo. 2010. Freezing of strawberries by immersion in CaCl_2 solution. **Food Chem.** 123: 243-248.
- Gormley, R., T. Walshe, K. Hussey and F. Butler. 2002. The effect of fluctuating vs. constant frozen storage temperature regimes on some quality parameters of selected food products. **Lebensm.-Wiss. u.-Technol.** 35: 190-200.
- Hayashi, T. 1989. Xyloglucans in the primary cell wall. **Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.** 40: 139-168.

- Jayani, R.S., S. Saxena and R. Gupta. 2007. **Pectinase database**. Available Source: <http://www.pec.biodb.info/ReactionMechanism.html>, February 23, 2012.
- Jittinandana, S., P.B. Kenney and S.D. Slider. 2005. Cryoprotectants preserve quality of restructured trout products following freeze-thaw cycling. **J. Muscle Food**. 16: 354-378.
- Karel, M., O.R. Fennema and D.B. Lund. 1975. **Principle of Food Science Part II Physical Principles of Food Preservation**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Kays, S.J. 1991. **Postharvest Physiology of Perishable Plant Products**. Van Nostrand Reinhold, New York. 532 p.
- Keegstra, K., K.W. Talmadge, W.D. Bauer and P. Albersheim. 1973. The structure of plant cell wall II. A model of the walls of suspension-cultured sycamore cells based on the interconnections of the macromolecular components. **Plant Physiol**. 51: 188-196.
- Ketsa, S., S. Chidtragool, J.D. Klein and S. Lurie. 1998. Effect of heat treatment on changes in softening, pectic substances and activities of polygalacturonase, pectinesterase and β -galactosidase of ripening mango. **J. Plant Physiol**. 153: 457-461.
- _____, _____, _____, and _____. 1999. Firmness, pectin components and cell wall hydrolases of mango fruit following low-temperature stress. **J. Hort. Sci. Biotech**. 74(6): 685-689.
- Kidmose, U. and K. Kaack. 1999. Changes in texture and nutritional quality of green asparagus spears (*Asparagus officinalis* L.) during microwave blanching and cryogenic freezing. **Acta Agric. Scand., Sect. B, Soil and Plant Sci**. 49: 110-116.
- Koning, R. 2005. **Cell structures and organelles in eukaryotes**. Available Source: <http://home.earthlink.net/~dayvdanls/lecw4cells4.html>, January 25, 2012.

- Lan, W., Y. Zhihua, W. Jia, S. Zhida and X. Bijun. 2008. A study on freeze-thaw characteristics and microstructure of Chinese water chestnut starch gels. **J. Food Eng.** 88: 186-192.
- Lazan, H., Z.M. Ali, J.S. Soh and Z. Talkah. 1993. The biochemical basis of differential ripening in mango. **Acta Hort.** 341: 500-509.
- Lowithun, N. and S. Charoenrein. 2009. Influence of osmodehydrofreezing with different sugars on the quality of frozen rambutan. **Int. J Food Sci Technol.** 44: 2183-2188.
- Majumder, K. and B. C. Mazumdar. 2002. Changes of pectic substances in developing fruits of cape-gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in relation to the enzyme activity and evolution of ethylene. **Sci. Hortic.** 96: 91-101.
- McFeeters, R.F. and S.A. Armstrong. 1984. Measurement of pectin methylation in plant cell walls. **Anal Biochem.** 139: 212-217.
- McNeil, M., A.G. Darvill, S.C. Fry and P. Albersheim. 1984. Structure and function of the primary cell wall of plants. **Ann. Rev. Biochem.** 53: 625-663.
- Meilgaard, M.C., G.V. Civille and B.T. Carr. 2007. **Sensory Evaluation Techniques.** 4th ed. CRC Press, Boca Raton.
- Muadklay, J. and S. Charoenrein. 2008. Effects of hydrocolloids and freezing rates on freeze-thaw stability of tapioca starch gels. **Food Hydrocoll.** 22: 1268-1272.
- Muda, P., G.B. Seymour, N. Errington and G.A. Tucker. 1995. Compositional changes in cell wall polymers during mango fruit ripening. **Carbohydr. Polym.** 26: 255-260.
- Olivera, D.F. and V.O. Salvadori. 2009. Effect of freezing rate in textural and rheological characteristics of frozen cooked organic pasta. **J. Food Eng.** 90: 271-276.

- Otero, L., M. Martino, N. Zaritzky, M. Solas, and P.D. Sanz. 2000. Preservation of microstructure in peach and mango during high-pressure-shift freezing. **J. Food Sci.** 65: 466-470.
- Persson, P.O. and G. Londahl. 1993. Freezing Technology, pp. 20-58. *In* C.P. Mallett, ed. **Frozen Food Technology.** Chapman & Hall, Great Britain.
- Pham, Q.T. and R.F. Mawson. 1997. Moisture migration and ice recrystallization in frozen foods, pp. 67-91. *In* M.C. Erickson and Y.C. Hung, eds. **Quality in Frozen Food.** Chapman&Hall, New York.
- Prestamo, G., C. Fuster and C. Resueno. 1998. Effects of blanching and freezing on the structure of carrots cells and their implications for food processing. **J. Sci. Food Agric.** 77: 223-229.
- Rahman, M.S. 1995. **Food Properties Handbook.** CRC Press, Inc., Boca Raton.
- Reinders, G. and H.P. Their. 1998. Non-starch polysaccharides of tomatoes I characterizing pectins and hemicelluloses. **Eur. Food Res. Technol.** 209: 43-46.
- Roy, S.S., T.A. Taylor and H.L. Kramer. 2001. Textural and ultrastructural changes in carrot tissue as affected by blanching and freezing. **J. Food Sci.** 66: 176-180.
- Saulnier, L. and J.F. Thibault. 1987. Extraction and characterization of pectic substances from pulp of grape berries. **Carbohydr. Polym.** 7: 329-343.
- Skrede, G. 1996. Fruits, pp. 183-245. *In* L.E. Jeremiah, ed. **Freezing Effects on Food Quality.** Marcel Dekker, Inc., New York.

- Sousa, M.B., W. Canet, M.D. Alvarez and C. Fernandez. 2007. Effect of processing on the texture and sensory attributes of raspberry (cv. Heritage) and blackberry (cv. Thornfree). **J. Food Eng.** 78: 9-21.
- Sun, D. and L. Zheng. 2006. Plastic packaging of frozen foods, pp. 641-651. In Da-Wen Sun, ed. **Handbook of Frozen Food Processing and Packaging**. CRC Press, Inc., New York.
- Surjadinata, B.B., G.H. Brusewitz and D.D. Bellmer. 2001. Pecan texture as affected by moisture content before freezing and thawing rate. **J. Food Process Eng.** 24: 253-272.
- Taboada, E., P. Fisher, R. Jara, E. Zuniga, M. Gidekel, J.C. Cabrera, E. Pereira, A. Gutierrez-Moraga, R. Villalonga, and G. Cabrera. 2010. Isolation and characterisation of pectic substances from murta (*Ugni molinae* Turcz) fruits. **Food Chem.** 123: 669-678.
- Tandon, D. K. and S. K. Kalra. 1984. Pectin changes during the development of mango fruit cv. Dashehari. **J. Hort. Sci.** 59(2): 283-286.
- Tharanathan, R.N., H.M. Yashoda and T.N. Prabha. 2006. Mango (*Mangifera indica* L.), “The King of Fruits”-An Overview. **Food Rev. Int.** 22(2): 95-123.
- Torreggiani, D. and G. Bertolo. 2001. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. **J. Food Eng.** 49: 247-253.
- Tucker, G.A. and D. Grierson. 1987. Fruit ripening, pp. 265-318. In D.D. Davis ed. **The Biochemistry of Plants**. Academic Press, New York.
- _____, and G.B. Seymour. 1991. Cell wall degradation during mango fruit ripening. **Acta Hort.** 291: 454-460.

- Van Buggenhout, S., I. Messagie, V. Maes, T. Duvetter, A.V. Loey and M. Hendrickx. 2006. Minimizing texture loss of frozen strawberries: effect of infusion with pectinmethylesterase and calcium combined with different freezing conditions and effect of subsequent storage/thawing conditions. **Eur. Food Res. Technol.** 223: 395-404.
- Varanyanond, W., J. Naohara, K. Wongkrajang and M. Manabe. 1999. Changes in pectin content and average molecular weight of pectin during maturation the mango “Kaew”. **Food Sci. Technol. Res.** 5: 362-364.
- Yahia, E.M. 1998. **Postharvest handling of mango. Technical Report. Agricultural Technology Utilization and Transfer Project, Giza, Egypt.** Available Source: <http://www.atut.gov.eg>, September 30, 2011.
- Yashoda, H.M., T.N. Prabha and R.N. Tharanathan. 2006. Mango ripening: changes in cell wall constituents in relation to textural softening. **J. Sci. Food Agric.** 86: 713-721.
- Yu, L., C.A. Reitmeier and M.H. Love. 1996. Strawberry texture and pectin content as affected by electron beam irradiation. **J. Food Sci.** 61: 844-846.





วิธีวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

1. สีของเนื้อมะม่วงในระหว่างการสุกที่ระยะต่างๆ



ระยะที่ 1

ระยะที่ 2

ระยะที่ 3

ระยะที่ 4

ระยะที่ 5

ระยะที่ 6

ภาพผนวกที่ ก1 สีของเนื้อมะม่วงในระหว่างการสุกที่ระยะต่างๆ

ที่มา: กรรณิการ์ (2555)

สีของเนื้อมะม่วงในระหว่างการสุกที่ระยะต่างๆ ได้แก่ ระยะที่ 1 สีเขียว (mature green) ระยะที่ 2 สีเหลือง 0-30% (unripe) ระยะที่ 3 สีเหลือง 31-60% (partially ripe) ระยะที่ 4 สีเหลือง 61-99% (ripe) ระยะที่ 5 สีเหลือง 100% (fully ripe) และระยะที่ 6 (over ripe)

2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (AOAC, 2000)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1.1 ตู้อบลมร้อน (hot air oven)

2.1.2 ภาชนะใส่ตัวอย่าง (moisture can) ทำด้วยอลูมิเนียม

2.1.3 เดซิเคเตอร์ (desiccator)

2.1.4 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

2.2 วิธีการวิเคราะห์

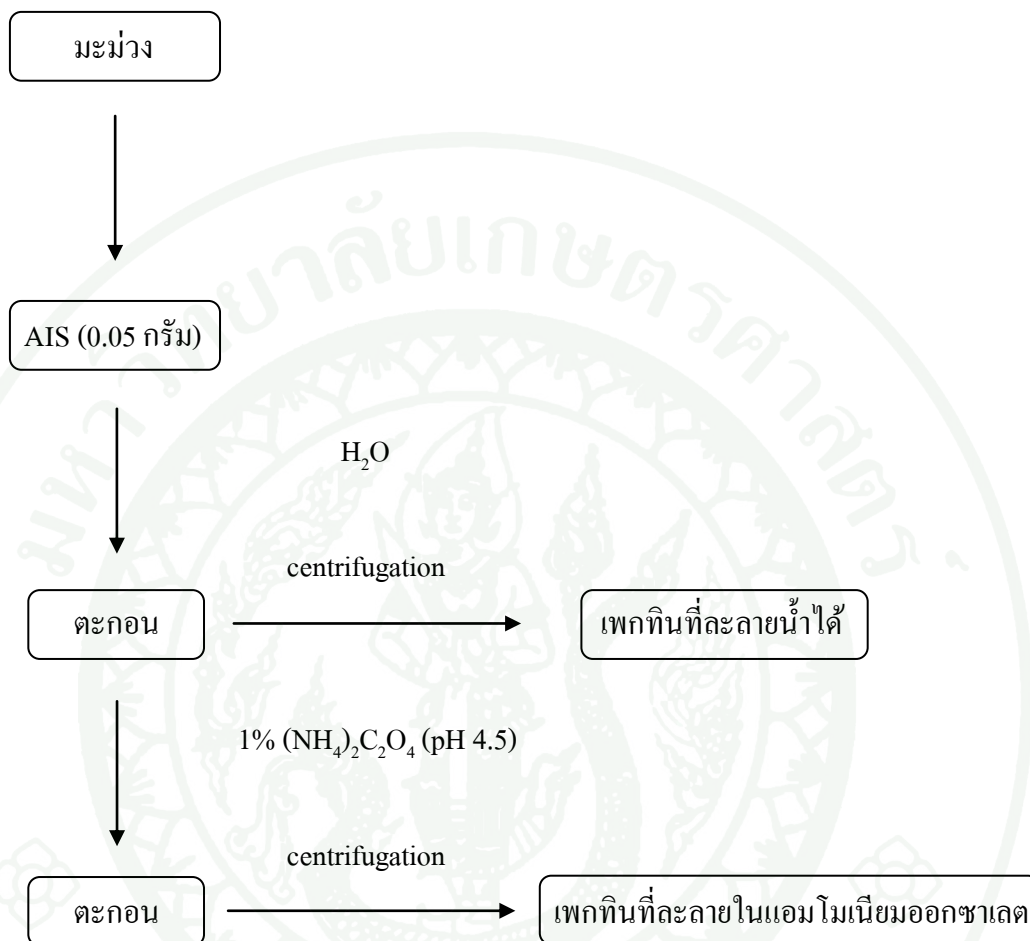
ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ในภาชนะอลูมิเนียมมีฝาปิดที่ผ่านการอบจนน้ำหนักคงที่ นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ วัดค่า 3 ซ้ำ คำนวณหาปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ})}$$

2.3 วิธีคำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมด

$$\text{ปริมาณของแข็ง (เปอร์เซ็นต์)} = 100 - \text{ปริมาณความชื้น (เปอร์เซ็นต์)}$$

3. แผนผังการสกัดเพกทิน



ภาพผนวกที่ ก2 ลำดับการสกัดสารประกอบเพกทินจากมะม่วง



การวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส

1. วิธีการฝึกฝนผู้ทดสอบ ดัดแปลงตามวิธีการของ Meilgaard *et al.* (2007)

1.1 การคัดเลือก

1.1.1 การทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ Duo-trio test

คัดเลือกผู้ทดสอบโดยวิธี Duo-trio test เพื่อประเมินความสามารถของผู้ทดสอบในการแยกแยะความแตกต่างระหว่างตัวอย่างที่มีลักษณะคล้ายกัน โดยให้ผู้ทดสอบ ทดสอบ ตัวอย่างอ้างอิง จากนั้นจึงทดสอบตัวอย่างอีก 2 ตัวอย่างที่เหลือ และให้ผู้ทดสอบเลือกตัวอย่างที่เหมือนกับตัวอย่างอ้างอิง โดยให้ผู้ทดสอบทำการทดสอบ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำผู้ทดสอบต้องประเมินตัวอย่างวันทีระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน

ผู้ทดสอบที่ผ่านการคัดเลือกต้องสามารถประเมินถูกมากกว่า 60 เปอร์เซนต์ (ตอบถูก 2 ใน 3 ครั้ง) จึงสามารถผ่านเข้าสู่การคัดเลือกรอบต่อไป

1.1.2 การทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบเรียงลำดับ (Ranking tests)

ผู้ทดสอบที่ผ่านการคัดเลือกจากการทดสอบแบบ Duo-trio test จะต้องผ่านการทดสอบขั้นต่อไป คือ การทดสอบโดยวิธี Ranking tests เพื่อวัดความสามารถของผู้ทดสอบในการแยกแยะระดับความเข้มของคุณลักษณะที่ต้องการศึกษา โดยให้ผู้ทดสอบจัดลำดับความแน่นอน โดยใช้วันความเข้มข้นต่างกัน 3 ระดับ

ผู้ทดสอบที่ผ่านการคัดเลือกต้องสามารถจัดลำดับถูกทั้งหมด หรือจัดลำดับผิดเพียงบางตัวอย่างที่มีระดับความเข้มข้นใกล้เคียงกัน

1.2 การฝึกฝน

ครั้งที่ 1 ฝึกให้ผู้ทดสอบรู้จักและคุ้นเคยกับสเกล โดยใช้สเกล 5 ระดับ ดังนี้

ความแน่นเนื้อ : 1 = นิ่มมาก, 2 = ค่อนข้างนิ่ม, 3 = แน่นเนื้อปานกลาง, 4 = แน่นเนื้อมาก และ 5 = แน่นเนื้อมากที่สุด

ตัวอย่างที่ใช้ในการฝึกฝนความแน่นเนื้อ คือ วั่นความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ แทนระดับคะแนน 1, วั่นความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ แทนระดับคะแนน 3 และวั่นความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ แทนระดับคะแนน 5 โดยใช้เวลาฝึกประมาณ 30 นาที

ครั้งที่ 2 ฝึกให้ผู้ทดสอบคุ้นเคยกับสเกลโดยใช้ตัวอย่างเช่นเดียวกับการฝึกครั้งที่ 1 ใช้เวลาฝึกประมาณ 30 นาที หลังจากการฝึกฝนให้ผู้ทดสอบประเมินตัวอย่างโดยใช้ตัวอย่างเหมือนกับการใช้ในการฝึกฝนแต่ให้รหัสเลขกลุ่ม 3 หลัก และใช้แบบทดสอบเหมือนกับแบบทดสอบที่ใช้จริง หลังจากการประเมิน แจ้งให้ผู้ทดสอบทราบผลการประเมิน และให้ผู้ทดสอบทบทวนซ้ำอีกครั้ง

ครั้งที่ 3 ให้ผู้ทดสอบประเมินตัวอย่างด้านความแน่นเนื้อ โดยใช้ตัวอย่างเหมือนกับตัวอย่างที่ใช้ในการฝึกฝนแต่ให้รหัสเลขกลุ่ม 3 หลัก และใช้แบบทดสอบเหมือนกับแบบทดสอบที่ใช้จริง หลังจากการประเมิน แจ้งให้ผู้ทดสอบทราบผลการประเมิน ฝึกให้ผู้ทดสอบคุ้นเคยกับสเกลโดยใช้ตัวอย่างเช่นเดียวกับการฝึกครั้งที่ 1 ใช้เวลาฝึกประมาณ 30 นาที หลังจากการฝึกฝนให้ผู้ทดสอบประเมินตัวอย่างอีกครั้ง แต่ใช้ตัวอย่างที่มีระดับความเข้มข้นทั้งเหมือนและต่างจากตัวอย่างที่ใช้ในการฝึกฝน หลังจากการประเมิน แจ้งให้ผู้ทดสอบทราบผลการประเมิน และให้ผู้ทดสอบทบทวนซ้ำอีกครั้ง

ครั้งที่ 4 ให้ผู้ทดสอบประเมินตัวอย่างด้านความแน่นเนื้อโดยใช้ตัวอย่างเหมือนกับตัวอย่างที่ใช้ในการฝึกฝนแต่ให้รหัสเลขกลุ่ม 3 หลัก และใช้แบบทดสอบเหมือนกับแบบทดสอบที่ใช้จริง หลังจากการประเมิน แจ้งให้ผู้ทดสอบทราบผลการประเมิน ฝึกให้ผู้ทดสอบคุ้นเคยกับสเกลโดยใช้ตัวอย่างเช่นเดียวกับการฝึกครั้งที่ 1 ใช้เวลาฝึกประมาณ 30 นาที หลังจากการฝึกฝนให้ผู้ทดสอบประเมินตัวอย่างอีกครั้ง แต่ใช้ตัวอย่างที่มีระดับความเข้มข้นทั้งเหมือนและต่างจากตัวอย่างที่ใช้ในการฝึกฝน หลังจากการประเมิน แจ้งให้ผู้ทดสอบทราบผลการประเมิน และให้ผู้ทดสอบทบทวนซ้ำอีกครั้ง

2. แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

2.1 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ Duo-trio test

ชื่อผู้ทดสอบชิม วันที่

คำชี้แจง : กรุณาทดสอบตัวอย่างตามลำดับจากซ้ายไปขวา ตัวอย่างซ้ายสุดคือตัวอย่างอ้างอิง ประเมินตัวอย่างที่เหลืออีก 2 ตัวอย่าง และแสดงเครื่องหมายกากบาท (x) ในช่องของตัวอย่างที่เหมือนตัวอย่างอ้างอิง ทดสอบตัวอย่างโดยการเคี้ยว

Reference



Code



Code



2.2 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบเรียงลำดับ (Ranking tests)

ชื่อผู้ทดสอบชิม วันที่

คำชี้แจง : กรุณาทดสอบตัวอย่างตามลำดับจากซ้ายไปขวา และเรียงลำดับตัวอย่างเหล่านี้ตามความแน่นเนื้อที่กำหนด จากลำดับที่ 1 (น้อยที่สุด) ไปลำดับที่ 3 (มากที่สุด) ทดสอบโดยการเคี้ยวตัวอย่าง

ความแน่นเนื้อ

ความแน่นเนื้อ

รหัส

แน่นเนื้อน้อยที่สุด (1)

.....

แน่นเนื้อปานกลาง (2)

.....

แน่นเนื้อมากที่สุด (3)

.....

2.3 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ชื่อผู้ทดสอบชิมวันที่

เพศ ☐ หญิง ☐ ชาย อายุ.....

คำชี้แจง : กรุณาทดสอบตัวอย่างที่นำเสนอ และให้คะแนนความเข้มข้นเนื้อสัมผัสของตัวอย่าง โดยท่านจะได้รับตัวอย่างอ้างอิงที่มีความแน่นเนื้อระดับ 1, 3 และ 5 เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการ เปรียบเทียบกับตัวอย่าง ทดสอบตัวอย่างและประเมินว่าตัวอย่างมีความแน่นเนื้ออยู่ที่ระดับใด

คุณลักษณะ	รหัสตัวอย่าง
ความแน่นเนื้อ	

2.4 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองแช่เยือกแข็ง

ชื่อผู้ทดสอบชิมวันที่

เพศ ☐ หญิง ☐ ชาย อายุ.....

คำชี้แจง : กรุณาทดสอบตัวอย่างที่นำเสนอ และให้คะแนนความเข้มข้นเนื้อสัมผัสของตัวอย่าง โดยท่านจะได้รับตัวอย่างอ้างอิงที่มีความแน่นเนื้อระดับ 1, 3 และ 5 เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการ เปรียบเทียบกับตัวอย่าง ทดสอบตัวอย่างและประเมินว่าตัวอย่างมีความแน่นเนื้ออยู่ที่ระดับใด

คุณลักษณะ	รหัสตัวอย่าง		
ความแน่นเนื้อ			

3. การเตรียมวุ้น

3.1 วัสดุดิบ

3.1.1 ผงวุ้น (สำหรับทำขนม) ตรานางเงือก (agar-agar powder)

3.1.2 น้ำหวานแดง ตราเฮลล์ลูบอย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องให้ความร้อน (hot plate)

3.2.2 เทอร์โมมิเตอร์

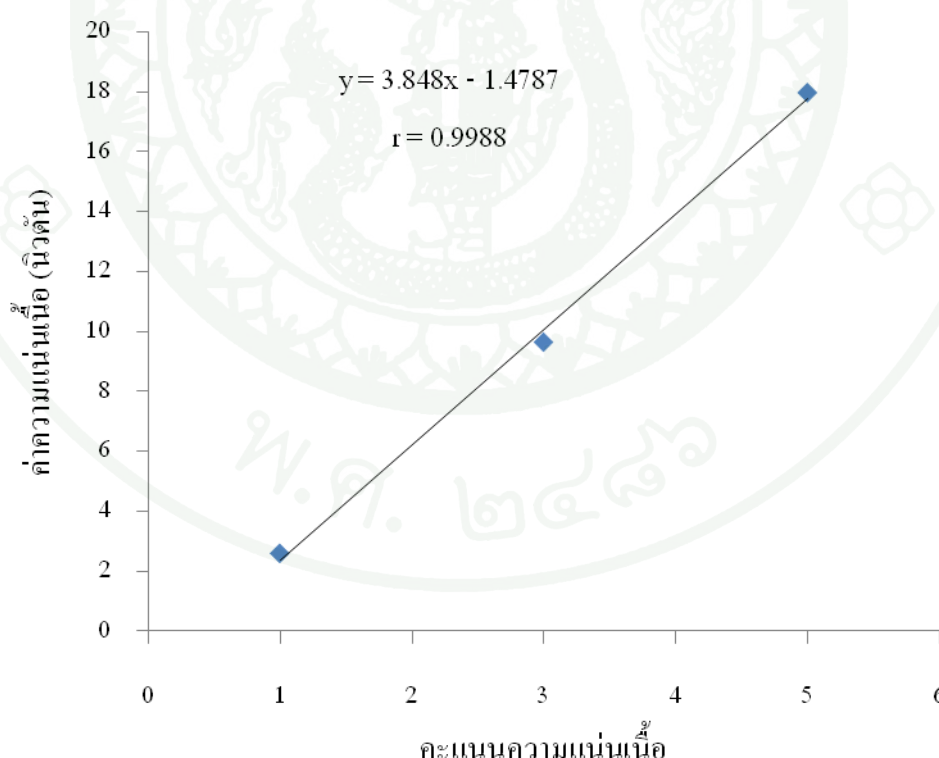
3.2.3 ถ้วยพลาสติก

3.3 วิธีการเตรียม

เตรียมวุ้นความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ 0.5, 1 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยต้มน้ำให้มีอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แล้วใส่น้ำหวานแดง 9 เปอร์เซ็นต์ คนให้เข้ากัน หลังจากนั้นใส่ผงวุ้นตามความเข้มข้นที่เตรียมไว้ คนจนผงวุ้นละลายหมดและรอให้สารละลายวุ้นเดือด นำมาเทใส่ภาชนะ ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็น

4. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนดของวุ้น

เพื่อพิสูจน์ว่าคะแนนความแน่นเนื้อของตัวอย่างวุ้นอ้างอิงที่ความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ ความเข้มข้น 0.5 ,1 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ที่กำหนดให้ผู้ทดสอบในขณะฝึกฝนมีความสอดคล้องกับความแน่นเนื้อของตัวอย่างวุ้นจริง จึงได้นำวุ้นที่ความเข้มข้นทั้ง 3 ระดับนี้ มาวัดค่าความแน่นเนื้อด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส แล้วนำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับคะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนด โดยแกน x แสดงถึง คะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนด และแกน y แสดงถึง ค่าความแน่นเนื้อในหน่วยของนิวตันที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส แสดงดังภาพผนวก ข จากกราฟ พบว่าค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนดมีความสัมพันธ์กันสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงถึง 0.9988 ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงใช้วุ้นที่ความเข้มข้นทั้ง 3 ระดับนี้ เป็นตัวอย่างอ้างอิงในการประเมินทางประสาทสัมผัสและสามารถใช้เป็นเกณฑ์เพื่อประเมินเป็นคะแนนความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงได้



ภาพผนวกที่ ข1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนดของวุ้น



ตารางผนวกที่ 1 ผลของอัตราการแข่งขันและการแข่งขัน-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์

การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ (รอบ)	ของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้ง)			
	มะม่วงสด	อัตราการแข่งขัน		
		FF	MF	SF
	90.65 ± 11.43			
1		87.02 ± 10.83 ^{ns,NS}	91.58 ± 5.23 ^{ns,NS}	93.48 ± 7.04 ^{ns,NS}
2		93.50 ± 13.80 ^{ns,NS}	94.22 ± 9.81 ^{ns,NS}	92.04 ± 9.46 ^{ns,NS}
3		90.88 ± 8.08 ^{ns,NS}	95.85 ± 11.87 ^{ns,NS}	92.72 ± 7.93 ^{ns,NS}

หมายเหตุ^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๒ ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณเพกตินทั้งหมด

การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ (รอบ)	เพกตินทั้งหมด (ไม่โครกรัมต่อมิลลิกรัมของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์)			
	มะม่วงสด	อัตราการแช่เยือกแข็ง		
		FF	MF	SF
	179.51 ± 18.29			
1		188.26 ± 15.61 ^{ns,NS}	182.03 ± 14.40 ^{ns,NS}	178.64 ± 9.72 ^{ns,NS}
2		182.82 ± 5.92 ^{ns,NS}	179.35 ± 16.28 ^{ns,NS}	185.29 ± 8.97 ^{ns,NS}
3		183.34 ± 13.87 ^{ns,NS}	193.73 ± 7.22 ^{ns,NS}	191.27 ± 11.02 ^{ns,NS}

หมายเหตุ^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ 3 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้

การแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ (รอบ)	เพกทินที่ละลายน้ำได้ (ไม่โครกรัมต่อมิลลิกรัมของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์)			
	ตัวอย่างสด	อัตราการแช่เยือกแข็ง		
		FF	MF	SF
	75.00 ± 6.37			
1		82.12 ± 5.65 ^{b,C}	86.45 ± 4.55 ^{b,C}	105.52 ± 7.16 ^{a,B}
2		102.41 ± 6.58 ^{b,B}	114.32 ± 7.03 ^{ab,B}	123.60 ± 5.76 ^{a,AB}
3		124.49 ± 6.41 ^{ns,A}	134.07 ± 6.05 ^{ns,A}	135.47 ± 8.17 ^{ns,A}

หมายเหตุ^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๔ ผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิงและการใช้เชื้อเพลิง-ละลายน้ำแข็งเข้าสู่ต่อปริมาณเพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेट

การแช่เชื้อแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ (รอบ)	เพกทินที่ละลายในแอมโมเนียมออกซาลेट (ไม่โครกรัมต่อมิลลิกรัมของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์)			
	มะม่วงสด	อัตราการแช่เชื้อแข็ง		
		FF	MF	SF
	11.75 ± 1.92			
1		13.83 ± 2.53 ^{b,C}	15.10 ± 1.29 ^{b,B}	21.17 ± 0.86 ^{a,B}
2		19.78 ± 1.63 ^{ns,B}	23.86 ± 2.97 ^{ns,A}	26.14 ± 0.88 ^{ns,A}
3		27.38 ± 0.57 ^{ns,A}	26.70 ± 2.98 ^{ns,A}	28.54 ± 1.99 ^{ns,A}

หมายเหตุ ^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ค5 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง

การแช่เยือกแข็ง- ละลายน้ำแข็งซ้ำ (รอบ)	ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)		
	อัตราการแช่เยือกแข็ง		
	FF	MF	SF
1	$14.56 \pm 1.63^{c,C}$	$22.19 \pm 2.36^{b,C}$	$31.15 \pm 2.72^{a,B}$
2	$30.77 \pm 1.47^{c,B}$	$41.90 \pm 3.86^{b,B}$	$53.77 \pm 3.71^{a,A}$
3	$42.09 \pm 4.90^{b,A}$	$57.63 \pm 3.85^{a,A}$	$60.70 \pm 5.50^{a,A}$

หมายเหตุ ^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งเฉลี่ยของมะม่วง (% TS) มีค่าเท่ากับ 18.83 ± 1.77

ตารางผนวกที่ ๑๖ ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส

การแช่เยือกแข็ง- ละลายน้ำแข็งซ้ำ (รอบ)	ค่าความแน่นเนื้อ (นิวตัน)			
	มะม่วงสด	อัตราการแช่เยือกแข็ง		
		FF	MF	SF
	5.94 ± 0.16			
1		2.30 ± 0.14 ^{a,A}	1.43 ± 0.07 ^{b,A}	0.92 ± 0.09 ^{c,A}
2		1.07 ± 0.10 ^{a,B}	0.91 ± 0.01 ^{a,B}	0.69 ± 0.04 ^{b,B}
3		0.72 ± 0.02 ^{ns,C}	0.67 ± 0.03 ^{ns,C}	0.65 ± 0.03 ^{ns,B}

หมายเหตุ ^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๗ ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อคะแนนความแน่นเนื้อที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัส

การแช่เยือกแข็ง- ละลายน้ำแข็งซ้ำ (รอบ)	มะม่วงสด	คะแนนความแน่นเนื้อ		
		อัตราการแช่เยือกแข็ง		
		FF	MF	SF
	2.49 ± 0.60			
1		0.96 ± 0.10 ^{a,A}	0.84 ± 0.01 ^{a,A}	0.59 ± 0.09 ^{b,NS}
2		0.45 ± 0.07 ^{ns,B}	0.44 ± 0.02 ^{ns,B}	0.31 ± 0.03 ^{ns,NS}

หมายเหตุ ^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{A-B} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นางสาวกรรณิการ์ โอ้วเจริญ
 เกิดวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2527
 สถานที่เกิด จังหวัดฉะเชิงเทรา
 ประวัติการศึกษา วท.บ. (วิทยาศาสตร์การอาหาร) มหาวิทยาลัยบูรพา

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ

1. นำเสนอผลงานวิจัยภาคโปสเตอร์ เรื่อง Effect of freeze-thaw cycles on texture and changes in pectin content of frozen mango (*Mangifera indica* L. cv. Nam Dok Mai) ใน The 12th ASEAN FOOD CONFERENCE 2011, Bangkok, Thailand, 16th-18th June 2011
2. นำเสนอผลงานวิจัยภาคบรรยาย เรื่องผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำต่อเนื่องสัมผัสและสารประกอบเพกทินของมะม่วง ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 37 (วทท 37) กรุงเทพมหานคร ระหว่างวันที่ 10-12 ตุลาคม 2554

- ประสบการณ์งานวิจัย**
- ผู้ช่วยวิจัยโครงการ “ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็งของไทย” ทุนอุดหนุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (สวพ. มก.) (พ.ศ. 2552)
 - ผู้ช่วยวิจัยโครงการ “การพัฒนาผลไม้แช่เยือกแข็งของไทยให้ทนต่อการแช่เยือกแข็งและทำละลาย” ทุนอุดหนุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (พ.ศ. 2554-2556)