



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหานัททิติ (วิทยาศาสตร์การอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์การอาหาร

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็งด้วยแคลเซียมแลคเตท เพกทินและน้ำตาลซูโครส

Quality Improvement of Frozen Mango Using Calcium Lactate, Pectin and Sucrose

นามผู้วิจัย นางสาวสิริวัชร ศิระมาด

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(.....รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D.....)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(.....อาจารย์พิณทิพย์ รัมภากาภรณ์, Ph.D.....)

หัวหน้าภาควิชา
(.....ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรวดี จิรภาคย์กุล, Ph.D.....)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(.....รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D. Agr.....)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสันทิ มหาวิตยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็งด้วยแคลเซียมแลคเตท เพกทิน และน้ำตาลซูโครส

Quality Improvement of Frozen Mango Using Calcium Lactate, Pectin and Sucrose

โดย

นางสาวสิริรักษ์ ศิระมาด

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สิริรักษ์ ศิระมาต 2557: การปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็งด้วยแคลเซียมแลคเตท เพกทิน และ น้ำตาลซูโครส ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D. 153 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยศึกษาผลของระดับความสุกของ มะม่วง และการเติมแคลเซียมแลคเตท เพกทิน และน้ำตาลซูโครส ต่อคุณภาพ และโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วง แช่เยือกแข็ง งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 ตอน ตอนที่ 1 ศึกษาผลของระดับความสุกของมะม่วง และการเติมแคลเซียม แลคเตท และน้ำตาลซูโครสต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยนำขึ้นมะม่วงที่มีระดับความสุก 2 ระดับ ได้แก่ มะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกมาแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตท 1% หรือสารละลายแคลเซียมแลคเตท 1% ผสมน้ำตาลซูโครส 50% ก่อนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 °ซ และเก็บรักษานาน 14 วัน ผลการศึกษาพบว่ามะม่วง สุกบางส่วน และมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส มีค่าความแน่นเนื้อ และ คະแนนความแน่นเนื้อสูงที่สุด ในขณะที่มีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง และความเสียหายของ โครงสร้างผนังเซลล์น้อยที่สุด โดยที่มะม่วงสุกบางส่วนทนต่อความเสียหายจากการแช่เยือกแข็งมากกว่ามะม่วงสุก เนื่องจากมีโครงสร้างผนังเซลล์ที่แข็งแรง ตอนที่ 2 ศึกษาการลดขนาดโมเลกุลของเพกทินด้วยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด เพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยนำ เพกทินทางการค้ามาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 80 °ซ นาน 6 - 96 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาการไฮโดรไลซ์เพกทิน ด้วยกรด ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ระดับเอสเทอร์ฟิเคชัน อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ความหนืด และโครงสร้าง ระดับจุลภาคของเพกทินลดลง และตอนที่ 3 ศึกษาการใช้มะม่วงสุกบางส่วน ร่วมกับการเติมแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลซูโครส และเพกทินที่ผ่านและไม่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด ต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยนำขึ้น มะม่วงแช่ในสารละลายผสมของแคลเซียมแลคเตท 1% และน้ำตาลซูโครส 50% หรือแช่ในสารละลายผสมของ แคลเซียมแลคเตท 1% น้ำตาลซูโครส 50% และเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 หรือ 48 ชั่วโมง ความเข้มข้น 4.9% ก่อนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -80 °ซ แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 °ซ นาน 14 และ 150 วัน ผลการทดลองพบว่ามะม่วงสุกบางส่วนที่แช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสมีค่า ความแน่นเนื้อสูงที่สุด มีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งต่ำที่สุด และมีโครงสร้างผนังเซลล์แข็งแรง ที่สุด แต่อย่างไรก็ตามมะม่วงสุกบางส่วนที่แช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินที่ผ่านการ ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง มีค่าความแน่นเนื้อสูงกว่าการใช้เพกทินจากทรีตเมนต์อื่น เมื่อพิจารณาผลของ การแช่เยือกแข็งต่อปริมาณเพกทิน พบว่าการแช่เยือกแข็งไม่มีผลต่อปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ แต่มี ผลทำให้ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการเก็บรักษาส่งผลต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดย ระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นทำให้ค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงลดลง และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการ ละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้มะม่วงสุกบางส่วนแช่ในสารละลายแคลเซียม แลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพมะม่วงแช่เยือกแข็งได้

Sirirak Siramard 2014: Quality Improvement of Frozen Mango Using Calcium Lactate, Pectin and Sucrose. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Associate Professor Sanguansri Charoenrein, Ph.D. 153 pages.

The objective of this study was to improve the quality of frozen mango. The effect of ripening stage and infusion with calcium lactate, pectin and sucrose on the quality and microstructure of frozen mango was investigated. This thesis consists of 3 main parts. The first part, effect of ripening stage and infusion with calcium lactate and sucrose on the quality of frozen mango was studied. The partially ripe and ripe mango cubes were infused in 1% calcium lactate solution or a combination of 1% calcium lactate and 50% sucrose solution before freezing at -20°C and stored for 14 days. After thawing, both the partially ripe and ripe mango treated with the combination of calcium lactate and sucrose exhibited the highest firmness value, sensory firmness score, lowest drip loss and less cell wall damage. Furthermore, partially ripe mango could better withstand freezing damage than ripe mango due to its stronger cell wall structure. The second part, the reduction of pectin's molecular structure by acid hydrolysis was studied in order to improve the quality of frozen mango. Commercial apple pectin was subjected to 0.1 M HCl at 80°C for 6 to 96 h. The results showed that the increase of hydrolysis time caused the decrease of the average molecular weight, degree of esterification, glass transition temperature, apparent viscosity and microstructure of pectin. The third part, utilizing of partially ripe mango infused with calcium lactate, sucrose, pectin and hydrolyzed pectin on the quality of frozen mango was examined. The partially ripe mango was infused with the combination of 1% calcium lactate and 50% sucrose and the combination of 1% calcium lactate, 50% sucrose and 4.9% commercial apple pectin or 6h or 48h-hydrolyzed pectin before freezing at -80°C and stored at -20°C for 14 and 150 days. The results demonstrated that the highest firmness, lowest drip loss and strongest cell wall structure was found when the mango treated with the combination of calcium lactate and sucrose. However, the infusion of combination of calcium lactate, sucrose and 48h-hydrolyzed pectin showed better texture preservation of frozen mango compared with the others pectin pretreatment. The freezing did not affect alcohol insoluble solid content whereas the increase in water soluble pectin content was found after freezing and thawing. The storage time affected the quality of frozen mango. The longer storage time caused the decrease in firmness and increase in drip loss. It can be concluded that using of the partially ripe mango pretreated with calcium lactate and sucrose could improve the quality of the frozen mango.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สงวนศรี เจริญเหรียญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักเป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา ทั้งในด้านการให้คำปรึกษา ให้ข้อคิดเห็น และช่วยชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนความเอาใจใส่ และความเมตตา อีกทั้งยังฝึกฝนให้มีประสบการณ์ทั้งด้านการเรียน และประสบการณ์อื่นๆ ที่เป็นประโยชน์ในการใช้ชีวิต ตลอดจนตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.พิณทิพย์ รัสมภากภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ ดร.สายพิน ทานัชฌาสัย ประธานการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และรองศาสตราจารย์ ดร.ทนง ภัครัชพันธุ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำเพิ่มเติม และช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่เมตตาอบรมสั่งสอนให้ข้าพเจ้ามีความรู้มาจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา) เพื่อการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (ทุนพัฒนานักวิจัย) ที่กรุณามอบทุนอุดหนุนวิจัยเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ ขอขอบคุณบริษัทพูแคว (ประเทศไทย) จำกัด ที่สนับสนุนสารแคลเซียมแลคเตทเพื่อใช้ในงานวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์คอลลัมน์ Shodex OHpak SB-804 และ 806M เพื่อใช้ในการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของเพกทิน ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องนิสิตปริญญาโท และเอก สาขาวิทยาศาสตร์การอาหารทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และมอบมิตรภาพที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าตลอดช่วงระยะเวลาของการศึกษาและทำวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่สาว และพี่ชายที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาที่ดี ตลอดจนกำลังใจที่ดีที่มีให้กันมาโดยตลอด รวมถึงผู้มีพระคุณที่มีได้เอื้อนามไว้ ณ ที่นี้ทุกท่าน

สิริรักษ์ ศิระมาด

มีนาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	40
ผลและวิจารณ์	51
สรุปและข้อเสนอแนะ	103
สรุป	103
ข้อเสนอแนะ	104
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	105
ภาคผนวก	118
ภาคผนวก ก มะม่วงและการเตรียมตัวอย่าง	119
ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี	123
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง	133
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส	141
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	152

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 องค์ประกอบทางเคมี และคุณค่าทางโภชนาการของมะม่วงในส่วนที่รับประทานได้	7
2 ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ และค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนการแช่เยือกแข็ง	52
3 คะแนนความชอบของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์หลังการแช่เยือกแข็ง	64
4 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเพกทินทางการค้า เพกทินควบคุม และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง	68
5 ระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกทินทางการค้า เพกทินควบคุม และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง	71
6 อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดกลาสทรานซิชันของเพกทินทางการค้า เพกทินควบคุม และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง	72
7 ความหนืดของสารละลายเพกทินทางการค้า และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง	77
8 ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนการแช่เยือกแข็ง	83

ตารางผนวกที่

ค1 ความแน่นเนื้อ คะแนนความแน่นเนื้อ และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์หลังการแช่เยือกแข็ง	134
ค2 ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง	136

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค3 ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนและ หลังการแช่เยือกแข็ง	137
ค4 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละ ทรีตเมนต์	138
ค5 ค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสของมะม่วงสุก และมะม่วง สุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง	139
ง1 ความเข้มข้น คะแนนความแน่นเนื้อ และค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างวุ้นอ้างอิง 3 ระดับ	148

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส	10
2 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	11
3 สูตรโครงสร้างของเพกทิน	12
4 แผนภาพแสดงโครงสร้างของเพกทิน ประกอบด้วย ไฮโมกาแล็กทูโรแนน (HG) ไซโลกาแล็กทูโรแนน (XGA) แรมโนกาแล็กทูโรแนน-1 (RG-I) และแรมโน กาแล็กทูโรแนน-2 (RG-II)	13
5 การจัดเรียงตัวของพอลิแซ็กคาไรด์ในผนังเซลล์พืช	14
6 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเซลล์เนื้อเยื่อโดยการแช่เยือกแข็งแบบช้า	17
7 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเซลล์เนื้อเยื่อโดยการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	17
8 โครงสร้างและส่วนประกอบของเซลล์พืช	18
9 แผนภาพ Egg-box model ของเพกทินและแคลเซียม	20
10 ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำ และสารละลายภายในเซลล์ เมื่อแช่ในสารละลาย น้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง	23
11 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของมะม่วงสุกบางส่วน และ มะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์	56
12 ค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์หลังการแช่เยือกแข็ง	58
13 คะแนนความแน่นเนื้อที่ได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนา เชิงปริมาณ (Quantitative Descriptive Analysis, QDA) ของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์หลังการแช่เยือกแข็ง	59
14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงส่องผ่านของตัวอย่างสด และแช่เยือกแข็ง ของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุก (กำลังขยาย 40x, สเกลบาร์ 50 μm) (ก) และ (ข) คือ มะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุก (1), (2), (3) และ (4) คือ ตัวอย่าง สด, ตัวอย่างแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์, แช่แคลเซียมแลคเตท และแช่ แคลเซียมแลคเตทและซูโครส ตามลำดับ (CW = ผนังเซลล์, P = เยื่อหุ้มเซลล์, VC = แวคิวโอล และ IS = ช่องว่างระหว่างเซลล์)	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
15 โครมาโตแกรมของเพกทินทางการค้า เพกทินควบคุม และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวแรงดันสูงแบบแยกตามขนาด (HPSEC)	67
16 พูรีयरทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ของ (ก) โพลีกลาลักทูลินิก, (ข) เพกทินที่มีระดับเอสเทอร์ฟิเคชัน 26%, (ค) 62%, (ง) 96%, (จ) เพกทินทางการค้า, (ฉ) เพกทินควบคุม, (ช) เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, (ซ) 24, (ฅ) 48, (ญ) 72 และ (ฎ) 96 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer; FT-IR)	70
17 กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตัวอย่าง (ก) เพกทินทางการค้า (สแกนที่ 2), (ข) เพกทินควบคุม, (ค) เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, (ง) 24, (จ) 48, (ฉ) 72 และ (ช) 96 ชั่วโมง (สแกนที่ 1) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) โดยให้ความร้อนตัวอย่างจากอุณหภูมิ -60 ถึง 160 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 5 องศาเซลเซียส/นาที	73
18 กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตัวอย่างเพกทินทางการค้า และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) โดยให้ความร้อนตัวอย่างจากอุณหภูมิ -60 ถึง 160 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 5 องศาเซลเซียส/นาที (สแกนที่ 1 และ 2)	75
19 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่าง (ก) เพกทินทางการค้า, (ข) เพกทินควบคุม, (ค) เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, (ง) 24, (จ) 48, (ฉ) 72 และ (ช) 96 ชั่วโมง	78
20 กลไกการสลายตัวของเพกทินจากการถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 – 96 ชั่วโมง	80
21 ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
22 ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง	87
23 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์	90
24 ค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสของมะม่วงสุก และมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง	93
25 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงส่องผ่านของมะม่วงสุกบางส่วนแช่เยือกแข็งและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสนาน 14 วัน (ก) ตัวอย่างควบคุม, (ข) แช่แคลเซียมแลคเตทและซูโครส, (ค) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทิน, (ง) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 6 ซม. และ (จ) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 48 ซม. (CW = ผนังเซลล์, broken CW = ผนังเซลล์แตก, P = เยื่อหุ้มเซลล์, VC = แวคิวโอล และ IS = ช่องว่างระหว่างเซลล์) (กำลังขยาย 40x, สเกลบาร์ 50 μm)	98
26 กลไกการปรับปรุงคุณภาพมะม่วงแช่เยือกแข็งด้วยแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลซูโครส และเพกทิน (ก) ตัวอย่างควบคุม, (ข) แช่แคลเซียมแลคเตทและซูโครส, (ค) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทิน, (ง) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 6 ซม. และ (จ) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 48 ซม. (1) และ (2) คือ ตัวอย่างก่อนแช่เยือกแข็ง และตัวอย่างหลังแช่เยือกแข็ง ตามลำดับ	101
ภาพผนวกที่	
ก1 มะม่วงสุกบางส่วนซื้อจากตลาดสี่มุมเมือง	120
ก2 มะม่วงสุกซื้อจากตลาดสี่มุมเมือง	120
ก3 สีม่วงของมะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 ที่ระยะการสุกต่างๆ (ก) มะม่วงสุกบางส่วน และ (ข) มะม่วงสุก	121

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก4 การหั่นตัวอย่างมะม่วงให้เป็นรูปลูกบาศก์ขนาด 1.5 ซม. ³	121
ก5 แช่ตัวอย่างมะม่วงในสารละลายก่อนการแช่เยือกแข็ง	122
ก6 ชั้บสารละลายส่วนเกินออกจากตัวอย่างมะม่วงด้วยกระดาษซับ	122
ข1 (ก) สีผิว และ (ข) สีเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้งามเบอร์ 4 ที่ระยะการสุกต่างๆ	124
ข2 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของกรดกาแล็กทูโรนิกกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร	128
ข3 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าลอการิทึมน้ำหนักโมเลกุลของเดกซ์แทรนมาตรฐานกับเวลาที่สารอยู่ในคอลัมน์	131
ข4 กราฟมาตรฐานระหว่างระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกทิน กับอัตราส่วนของพื้นที่ใต้พีคที่ความยาวคลื่น $1730/(1730+1600)$ ซม. ⁻¹	132
ค1 ภาพตัวอย่าง (ก) เพกทินทางการค้า และ (ข, ค, ง, จ, ฉ, ช) เพกทินหลังผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (ข) เพกทินควบคุม, (ค) เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นเวลา 6, (ง) 24, (จ) 48, (ฉ) 72 และ (ช) 96 ชั่วโมง	135
ค2 ลักษณะปรากฏของมะม่วงสุกบางส่วน (ก) ตัวอย่างควบคุม, (ข) แช่แคลเซียมแลคเตทและซูโครส, (ค) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทิน, (ง) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 6 ซม. และ (จ) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 48 ซม. (1), (2) และ (3) คือ ตัวอย่างก่อนแช่เยือกแข็ง, ตัวอย่างแช่เยือกแข็งและทำละลายหลังเก็บรักษา (-20 °ซ) นาน 14 และ 150 วัน ตามลำดับ	140
ง1 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ Duo-trio test	144
ง2 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบเรียงลำดับ (Ranking tests)	145
ง3 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ QDA	146
ง4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส และคะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนดของตัวอย่างอื่นอ้างอิง	149

การปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็งด้วย แคลเซียมแลคเตท เพกทิน และน้ำตาลซูโครส

Quality Improvement of Frozen Mango Using Calcium Lactate, Pectin and Sucrose

คำนำ

มะม่วงจัดเป็นผลไม้เขตร้อนที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากเป็นผลไม้ที่มีรสชาติดี กลิ่นหอมน่ารับประทาน เป็นที่นิยมของผู้บริโภคทั้งชาวไทยและชาวต่างชาติ มะม่วงเป็นผลไม้ที่สามารถรับประทานได้ทั้งผลดิบ และผลสุก โดยมะม่วงพันธุ์รับประทานสุกที่ได้รับความนิยมเป็นอันดับหนึ่งในประเทศไทย ได้แก่ มะม่วงน้ำดอกไม้ (ชุมพล, 2554) เนื่องจากมีรสชาติหวานอร่อยที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว นอกจากนี้มะม่วงสุกยังมีคุณค่าทางโภชนาการสูง อุดมด้วยแร่ธาตุ และวิตามิน เป็นแหล่งสำคัญของเส้นใยอาหาร และสารแคโรทีนอยด์ที่มีความสำคัญต่อร่างกาย โดยเฉพาะสารเบต้าแคโรทีน ที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระและเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ในร่างกาย (Tharanathan *et al.*, 2006)

ประเทศไทยมีอัตราการส่งออกมะม่วงค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปของมะม่วงสด แต่เนื่องจากมะม่วงเป็นผลไม้ที่มีอัตราการหายใจเปลี่ยนแปลงตามอายุ (climacteric fruit) และสุกอย่างรวดเร็วหลังการเก็บเกี่ยว ส่งผลให้มะม่วงสดมีอายุการเก็บรักษาสั้น ช้ำและเน่าเสียได้ง่าย การยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงด้วยการแช่เยือกแข็งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับมากขึ้น เนื่องจากเป็นหนึ่งในวิธีการถนอมอาหารที่ดีที่สุดที่ช่วยรักษาคุณภาพของมะม่วงให้ใกล้เคียงมะม่วงสด ทั้งในด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการอาหาร ทำให้ปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มการส่งออกมะม่วงแช่เยือกแข็งมากขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2556 ประเทศไทยมีการส่งออกมะม่วงแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2552 ถึง 2 เท่าตัว โดยมีปริมาณการส่งออกมะม่วงแช่เยือกแข็งเท่ากับ 3,491 ตัน คิดเป็นมูลค่าการส่งออกมากถึง 352 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557)

แต่อย่างไรก็ตามปัญหาหนึ่งที่พบมากในผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่เยือกแข็ง คือ การเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลไม้ภายหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย เนื่องจากผลไม้มีน้ำเป็น

องค์ประกอบหลักในปริมาณมาก เมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งจึงทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งจำนวนมาก ส่งผลให้เยื่อหุ้มเซลล์แตก เกิดความเสียหายกับผนังเซลล์ซึ่งมีความยืดหยุ่นน้อย มีผลทำให้ผลไม้สูญเสียความแน่นเนื้อ เนื้อสัมผัสนุ่มลง ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการยอมรับของผู้บริโภค (น้ำฝน, 2552; Sirijariyawat *et al.*, 2012)

ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่เยือกแข็ง ซึ่งการเลือกใช้ผลไม้ที่มีระดับความสุกบางส่วนทดแทนผลไม้สุกก็เป็นวิธีที่สามารถช่วยลดความเสียหายของคุณภาพผลไม้แช่เยือกแข็งจากการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้ เนื่องจากผลไม้สุกบางส่วนมีโครงสร้างผนังเซลล์ที่แข็งแรงกว่าผลไม้สุก จึงสามารถทนต่อความเสียหายจากการแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าผลไม้สุก (Sriwimon and Boonsupthip, 2010) โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาผลของระดับความสุกของมะม่วง ต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง พบว่าการใช้มะม่วงสุกบางส่วน (partially ripe) ในกระบวนการแช่เยือกแข็งช่วยรักษาคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าการใช้มะม่วงสุก (ripe) และมะม่วงสุกเต็มที่ (fully ripe) (Rimkeeree and Charoenrein, 2014) งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้มะม่วงสุกบางส่วนแทนการใช้มะม่วงสุกในกระบวนการแช่เยือกแข็ง โดยมีสมมติฐานว่าภายหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย มะม่วงสุกบางส่วนจะมีความคุณภาพเนื้อสัมผัสดีกว่ามะม่วงสุก

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำผลไม้มาผ่านกระบวนการเบื้องต้นก่อนการแช่เยือกแข็ง (prefreezing treatment) ด้วยการเติมแคลเซียม และเพกทินลงในผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง รวมทั้งการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีการออสโมซิส (osmodehydrofreezing) เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็ง ซึ่งปัจจุบันแคลเซียมแลคเตทถูกนำมาใช้เป็นทางเลือกใหม่เพื่อทดแทนการใช้แคลเซียมคลอไรด์ที่ทำให้เกิดรสขม หรือกลิ่นรสผิดปกติในเนื้อผลไม้ เนื่องจากแคลเซียมแลคเตทเป็นเกลือแคลเซียมที่ไม่ทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติ (Luna-Guzmán and Barrett, 2000) ดังนั้นแคลเซียมแลคเตทจึงมีศักยภาพสูงในด้านการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัส และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลไม้ กลไกการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของผลไม้ด้วยแคลเซียม คือ การที่แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบเพกทินบริเวณมิดเดิลลามেলা และผนังเซลล์ของผลไม้ เกิดการเชื่อมโยงข้าม (cross-linkage) ระหว่างหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) บนสายเพกทินและประจุของแคลเซียมไอออน เกิดเป็นโครงสร้างแคลเซียมเพกเตต (calcium pectates) ซึ่งไม่ละลายน้ำ จึงช่วยเพิ่มความแน่นแข็งให้กับโครงสร้างผนังเซลล์ของผลไม้ (Alandes *et al.*, 2006) มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาการเติมแคลเซียม

แลคเตทเพื่อปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของผลไม้สดตัดแต่งพร้อมบริโภค (Luna-Guzmán and Barrett, 2000; Alandes *et al.*, 2006) ผลไม้แปรรูปขั้นต้น (Torres *et al.*, 2006; Peirera *et al.*, 2007) และผลไม้แปรรูป (Baker, 1993; Manganaris *et al.*, 2005) แต่งานวิจัยที่ศึกษาผลของแคลเซียมแลคเตทต่อคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็งยังมีไม่มากนัก (Park, 2004) และยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของแคลเซียมแลคเตทต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของแคลเซียมแลคเตทต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยมีสมมติฐานว่าการเติมแคลเซียมแลคเตทลงไปในช่วงมะม่วงก่อนการแช่เยือกแข็งและทำละลาย จะส่งผลให้มะม่วงมีคุณภาพเนื้อสัมผัสดีขึ้น

ในส่วนของการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยส่วนหนึ่งได้ทดลองนำผลไม้มาแช่ในสารละลายเพกทินก่อนการแช่เยือกแข็ง Xie and Zhao (2004) รายงานว่าการแช่สตรอเบอร์รี่ในสารละลายเพกทินเมทอกซิลสูง สามารถช่วยคงความแน่นเนื้อของสตรอเบอร์รี่หลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย โดยเพกทินซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่จะเข้าไปอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างเซลล์ (intercellular space) เชื่อมแต่ละเซลล์เข้าด้วยกัน เกิดเป็นโครงสร้างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่แข็งแรงระหว่างเซลล์ผลไม้ช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็ง ทำให้ผลไม้ยังคงคุณภาพเนื้อสัมผัสที่ดีอยู่ได้หลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย แต่อย่างไรก็ตาม Buggenhout *et al.* (2006) รายงานว่าการแช่สตรอเบอร์รี่ในสารละลายเพกทินเมทอกซิลสูงก่อนการแช่เยือกแข็งส่งผลเสียต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสของสตรอเบอร์รี่แช่เยือกแข็ง เนื่องจากเพกทินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และเป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง การเติมเพกทินเข้าไปในเนื้อผลไม้อย่างสม่ำเสมอก่อนการแช่เยือกแข็งทำได้ยาก เพราะเพกทินจะไปเคลือบอยู่ที่บริเวณผิวของชิ้นผลไม้มากกว่าจะแพร่เข้าไปในเนื้อของผลไม้ จากผลงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้เพกทินเพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณภาพผลไม้แช่เยือกแข็งนั้นยังคงมีข้อจำกัด เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่ของเพกทิน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำให้เพกทินมีขนาดโมเลกุลเล็กลงโดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด และให้แพร่เข้าไปในชิ้นมะม่วงเพื่อปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยตั้งสมมติฐานว่าการทำให้เพกทินมีขนาดโมเลกุลเล็กลง จะช่วยให้การแพร่ของเพกทินเข้าสู่เนื้อมะม่วงสามารถทำได้อย่างสม่ำเสมอมากขึ้น และทำให้เพกทินสามารถผ่านเข้าไปสู่บริเวณผนังเซลล์พืช ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างผนังเซลล์พืชได้มากยิ่งขึ้น

การลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีการออสโมซิส เป็นวิธีที่ช่วยลดปริมาณการเกิดผลึกน้ำแข็ง ส่งผลให้เซลล์พืชได้รับความเสียหายจากการแช่เยือกแข็งน้อยลง

(Lazar, 1968) สารละลายออสโมติกที่นิยมใช้ในการลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็ง ได้แก่ สารละลายน้ำตาลซูโครส เนื่องจากน้ำตาลซูโครสมีส่วนช่วยในการรักษากลิ่นรส ลดการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ และให้ความหวานกับผลไม้ (Fennema, 1976) โดยมีงานวิจัยที่รายงานว่าการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีการออสโมซิสด้วยน้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็ง และทำละลาย ช่วยลดความเสียหายของผนังเซลล์จากการเกิดผลึกน้ำแข็ง และทำให้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของแครอท และบล็อกลีดลดลง (Ohnishi and Miyawaki, 2005) อีกทั้งการใช้น้ำตาลซูโครสยังส่งผลดีต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็ง Lowithun and Charoenrein (2009) รายงานว่าการใช้น้ำตาลซูโครสลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งจะ ช่วยปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของเงาะแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าการใช้น้ำตาลเทรฮาโลส และมอลลิทอล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยการใช้น้ำตาลซูโครสต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยมีสมมติฐานว่ากระบวนการลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งด้วยน้ำตาลซูโครสจะช่วยปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัส และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ การปรับปรุงคุณภาพมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยการศึกษา ระดับความสุขของมะม่วงที่เหมาะสมต่อการแช่เยือกแข็งและทำละลาย ร่วมกับการเติมแคลเซียม แลคเตท เพกทิน และการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีการออสโมซิสด้วยน้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็งและทำละลาย โดยมุ่งหวังให้มะม่วงแช่เยือกแข็งมีคุณภาพทั้งทางด้านเนื้อสัมผัส และคุณภาพทางประสาทสัมผัสใกล้เคียงมะม่วงสด และทำให้ผลิตภัณฑ์มะม่วงแช่เยือกแข็งเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ผู้วิจัยคาดหวังว่าผลงานวิจัยที่ได้รับจากโครงการนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการอุตสาหกรรมผลไม้แช่เยือกแข็งของประเทศไทย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง
2. เพื่อศึกษาระดับความสุกของมะม่วงที่เหมาะสมต่อการแช่เยือกแข็งและทำละลาย
3. เพื่อศึกษาผลของแคลเซียมแลคเตท และน้ำตาลซูโครสต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง
4. เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรดต่อโครงสร้างระดับโมเลกุล ระดับเอสเทอร์ฟิเคชัน อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และความหนืดของเพกทิน
5. เพื่อศึกษาผลของแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลซูโครส เพกทินที่ผ่าน และไม่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด ต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง

การตรวจเอกสาร

1. มะม่วง

มะม่วงเป็นไม้ผลยืนต้น มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Mangifera indica* Linn. อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae เป็นพืชใบเลี้ยงคู่ มีลักษณะเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ผลดิบสีเขียว เมื่อสุกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองหรือเหลืองส้ม มีเมล็ดภายใน 1 เมล็ด เป็นเมล็ดแบนเปลือกหุ้มเมล็ดแข็ง (ประเสริฐ, 2545) มีแหล่งกำเนิดในประเทศอินเดีย และประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ไทย พม่า และมาเลเซีย (Tharanathan *et al.*, 2006)

มะม่วงเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของโลก ในปี พ.ศ. 2552 มีปริมาณการผลิตมะม่วงรวมทั่วโลกสูงถึง 35 ล้านตัน โดยทวีปเอเชียถือเป็นแหล่งผลิตมะม่วงรายใหญ่ที่สุดของโลก คิดเป็น 77% ของปริมาณการผลิตมะม่วงทั้งหมดทั่วโลก รองลงมาได้แก่ ทวีปอเมริกา และทวีปแอฟริกา ประเทศที่มีปริมาณการผลิตมะม่วงมากที่สุด ได้แก่ ประเทศอินเดีย (13-17 ล้านตัน) ประเทศจีน (4 ล้านตัน) ประเทศไทย (2.5 ล้านตัน) และประเทศปากีสถาน (1.7 ล้านตัน) ตามลำดับ (United Nations Conference on Trade and Development, 2012)

ประเทศไทยมีอัตราการส่งออกมะม่วงค่อนข้างสูง ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2546 – 2556) ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกมะม่วงเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่าตัว ซึ่งในปี พ.ศ. 2556 นี้ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกมะม่วงทั้งหมด 67,602 ตัน คิดเป็นมูลค่า 2,642.16 ล้านบาท โดยส่งออกในรูปของมะม่วงสดมากที่สุด รองลงมาได้แก่ มะม่วงบรรจุภาชนะที่อากาศผ่านเข้าออกไม่ได้ มะม่วงแช่เย็นจนแข็ง และมะม่วงอบแห้ง ตามลำดับ ตลาดส่งออกมะม่วงที่สำคัญของประเทศ ได้แก่ ญี่ปุ่น มาเลเซีย อินโดนีเซีย สิงคโปร์ฮ่องกง และได้หวัน เป็นต้น ซึ่งพันธุ์ที่นิยมส่งออก ได้แก่ น้ำดอกไม้สีทอง น้ำดอกไม้ อกร่อง หนั่งกลางวัน เขียวเสวย แรด และโชคอนันต์ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557)

มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เป็นมะม่วงประเภทรับประทานสุกที่มีผู้นิยมปลูกกันมาก ปัจจุบันได้มีการพัฒนาสายพันธุ์มะม่วงน้ำดอกไม้ให้มีหลากหลายยิ่งขึ้น โดยเฉพาะมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เบอร์ 4 หรือในบางครั้งเรียกว่ามะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ทะวายเบอร์ 4 ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาให้สามารถปลูกนอกฤดูกาลได้ จึงเป็นหนึ่งในสายพันธุ์มะม่วงที่มีความสำคัญต่อตลาดผลไม้

ของประเทศไทย มะม่วงน้ำดอกไ้ม้เบอร์ 4 มีทรงผลกลมรี รูปร่างสม่ำเสมอ ผลขนาดกลาง น้ำหนักเฉลี่ย 340 กรัมต่อผล ผลยาว 16.40 เซนติเมตร กว้าง 7.50 เซนติเมตร และหนา 6.90 เซนติเมตร มีปริมาณเนื้อ 77% ผลสุกสีเหลืองอมเขียวจนถึงเหลือง ผิวเรียบ เปลือกบาง เนื้อผลละเอียด เนื้อแน่น สีเหลืองส้ม ฉ่ำน้ำ เมล็ดบางมาก ไม่มีเสี้ยน รสหวานอร่อย กลิ่นหอม คุณภาพดี ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (soluble solids) ประมาณ 19 องศาบริกซ์ (พานิชย์, 2540; ประเสริฐ, 2545; Chomchalow and Songkhla, 2008)

องค์ประกอบทางเคมีของมะม่วงแตกต่างกันไปตามพันธุ์ และความแก่อ่อน องค์ประกอบหลักที่พบมากในมะม่วงสุก คือ น้ำ โดยพบว่ามะม่วงสุกมีปริมาณความชื้นสูงถึง 83% รองลงมาคือคาร์โบไฮเดรตประมาณ 15% ของน้ำหนักเนื้อมะม่วงสุกนอกจากนี้มะม่วงยังเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะวิตามินซี เบต้าแคโรทีน และแร่ธาตุ (United States Department of Agriculture, 2012) องค์ประกอบทางเคมี และคุณค่าทางโภชนาการของมะม่วง แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี และคุณค่าทางโภชนาการของมะม่วงในส่วนที่รับประทานได้

คุณค่าทางโภชนาการ	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมที่รับประทานได้)
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	
- น้ำ (กรัม)	83.46
- พลังงาน (กิโลแคลอรี)	60
- โปรตีน (กรัม)	0.82
- ไขมันทั้งหมด (กรัม)	0.38
- คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	14.98
- เส้นใย (กรัม)	1.6
- ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัม)	13.66
แร่ธาตุ	
- แคลเซียม (มิลลิกรัม)	11
- เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.16
- แมกนีเซียม (มิลลิกรัม)	10
- ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	14

ตารางที่ 1 (ต่อ)

คุณค่าทางโภชนาการ	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมที่รับประทานได้)
แร่ธาตุ	
- โพแทสเซียม (มิลลิกรัม)	168
- โซเดียม (มิลลิกรัม)	1
- สังกะสี (มิลลิกรัม)	0.09
วิตามิน	
- วิตามินซี (มิลลิกรัม)	36.4
- ไทอะมิน (มิลลิกรัม)	0.028
- ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม)	0.038
- ไนอะซิน (มิลลิกรัม)	0.669
- วิตามินบี 6 (มิลลิกรัม)	0.119
- โฟเลต (ไมโครกรัม)	43
- วิตามินเอ (ไมโครกรัม)	54
- วิตามินอี, แอลฟา-โทโคฟีรอล (มิลลิกรัม)	0.90
- วิตามินเค (ไมโครกรัม)	4.2
ไขมัน	
- กรดไขมัน, ไขมันอิ่มตัวทั้งหมด (กรัม)	0.092
- กรดไขมัน, ไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (กรัม)	0.140
- กรดไขมัน, ไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (กรัม)	0.071
- คอเลสเตอรอล (มิลลิกรัม)	0

ที่มา: ดัดแปลงจาก United States Department of Agriculture (2012)

2. การสุกของผลไม้

กระบวนการสุกของผลไม้เป็นการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ผลไม้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากผลดิบที่มีสีเขียว เนื้อสัมผัสแข็ง รสชาติเปรี้ยว เปลี่ยนเป็นผลสุกที่มีรสชาติหวาน กลิ่นหอม และมีเนื้อสัมผัสนิ่มลง (Brummell, 2006)

การเปลี่ยนแปลงสีของผลไม้ในระหว่างกระบวนการสุก เกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ ทำให้สามารถมองเห็นสีของแอนโทไซยานินที่ถูกสร้างขึ้นและสะสมอยู่ในแวคิวโอล และสีของแคโรทีนอยด์ ได้แก่ เบต้าแคโรทีน (β -carotene) แซนโทฟิลล์ (xanthophyll) และไลโคปีน (lycopene) ที่สะสมอยู่ในพลาสติด (plastid) (Yashoda *et al.*, 2006) ดังเช่นผลการศึกษาของ Vázquez-Caicedo *et al.* (2004) ที่พบว่าสีแดงที่เกิดขึ้นในเนื้อมะม่วงสุกเต็มที่ของมะม่วง 9 สายพันธุ์ มีความสัมพันธ์กับปริมาณเบต้าแคโรทีนที่เพิ่มขึ้น

ผลไม้สุกมีความหวานเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของกระบวนการสร้างกลูโคส (gluconeogenesis) ซึ่งสารพอลิแซ็กคาไรด์โดยเฉพาะโมเลกุลสตาร์ชจะถูกไฮโดรไลซ์เปลี่ยนเป็นโมเลกุลน้ำตาล ทำให้ปริมาณน้ำตาลในผลไม้สุกเพิ่มมากขึ้น โดยมีการศึกษาพบว่ามะม่วงอัลฟองโซ (Alphonso) มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อมะม่วงสุก (Yashoda *et al.*, 2006) ในขณะที่ผลไม้สุกมีความเป็นกรดลดลงเนื่องจากในระหว่างกระบวนการสุกกรดในผลไม้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการหายใจ (Medlicott and Thompson, 1985) ซึ่งสัดส่วนของโมเลกุลน้ำตาลและกรดอินทรีย์ที่ผสมกันอย่างลงตัวเป็นการพัฒนาให้เกิดกลิ่นรสที่เป็นคุณลักษณะเฉพาะของมะม่วง (Yashoda *et al.*, 2006)

การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลไม้ในระหว่างกระบวนการสุกทำให้ผลไม้มีเนื้อสัมผัสนิ่มลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลต่างๆ ภายในผนังเซลล์ (Yashoda *et al.*, 2006) โดยเริ่มจากการสลายตัวของเพกทินบริเวณมิดเดิลลามেলা (middle lamella) ซึ่งแต่เดิมอยู่ในรูปของโปรโตเพกทิน (protopectin) ที่ไม่ละลายน้ำ เปลี่ยนเป็นรูปที่ละลายน้ำได้ เป็นผลให้ความเป็นระเบียบของโครงสร้างของผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ (primary cell wall) ถูกทำลาย เซลล์สูญเสียความเต่ง และมีเนื้อสัมผัสนิ่มลง (Brummell, 2006) การเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลเพกทินนี้เนื่องมาจากการทำงานของเอนไซม์ 2 ชนิดด้วยกัน คือ โพลีกาแล็กทูโรเนส (polygalacturonase; PG) และเพกทินเมทิลเอสเทอเรส (pectin methyl esterase; PME) โดยเอนไซม์โพลีกาแล็กทูโรเนสจะย่อยโมเลกุลของกรดโพลีกาแล็กทูโรนิก (polygalacturonic acid) ให้สั้นลง ในขณะที่เอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสจะย่อยเอากลุ่มเมทิลบนโมเลกุลของกรดกาแล็กทูโรนิกออก แต่เอนไซม์โพลีกาแล็กทูโรเนสจะไม่สามารถย่อยเพกทินในตำแหน่งของกรดกาแล็กทูโรนิกที่มีหมู่เมทิลอยู่ได้ (จริงแท้, 2538) มีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการสลายตัวของเพกทิน และการนิ่มลงของผลไม้หลายชนิด Ali *et al.* (2004) พบว่าในระหว่างกระบวนการสุกผลไม้เขตร้อนบางชนิดมีปริมาณโพลียูโรไนด์ (polyuronide) ทั้งหมดลดลง ในขณะที่ปริมาณโพลียูโรไนด์ที่สามารถละลายได้เพิ่มมาก

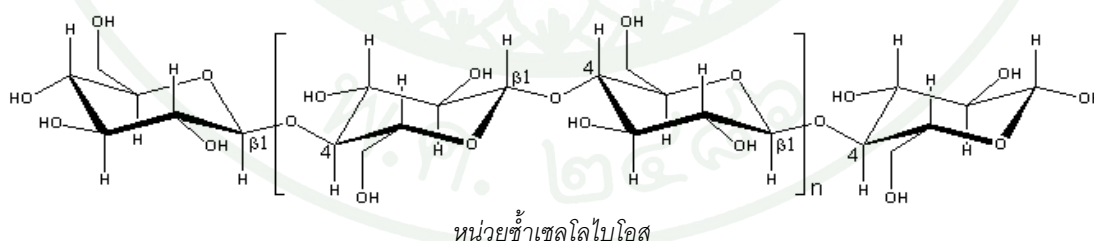
ขึ้น Rimkeeree and Charoenrein (2014) รายงานว่ามะม่วงสุกมีปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (alcohol insoluble residue; AIR) ลดลง ในขณะที่ปริมาณเพกทินทั้งหมดของมะม่วงสุก และปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ (water soluble pectin; WSP) เพิ่มขึ้น

3. องค์ประกอบของผนังเซลล์พืช

ผนังเซลล์พืชประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตประมาณ 90 – 95% และโปรตีนเพียง 5 - 10% เท่านั้น องค์ประกอบย่อยของคาร์โบไฮเดรตสามารถจำแนกตามการละลายได้ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และเพกทิน (pectin) (จริงแท้, 2549)

3.1 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบมากที่สุดในพืช มากถึง 15 - 30% ของน้ำหนักแห้งของผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ เป็นพอลิเมอร์เส้นยาวประกอบขึ้นจากหน่วยซ้ำของเซลโลไบโอส ซึ่งมีกลูโคสแต่ละตัวยึดกันอยู่ด้วยพันธะ β -1,4 จึงเรียกว่า β -1,4-glucan (ภาพที่ 1) โดยมีโมเลกุลน้ำตาลกลูโคสประมาณ 2,000 และ 14,000 โมเลกุล ในผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ และผนังเซลล์ชั้นทุติยภูมิตามลำดับ โมเลกุลของเซลลูโลสจะเชื่อมเกาะกับโมเลกุลของเซลลูโลสอื่นๆ ด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นคู่ตามยาว และเรียงขนานกันเป็นกลุ่ม กลุ่มละ 40 คู่ เรียกโครงสร้างในลักษณะนี้ว่า ไมโครไฟบริล (microfibril) ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ของพืช (จริงแท้, 2538, 2549)

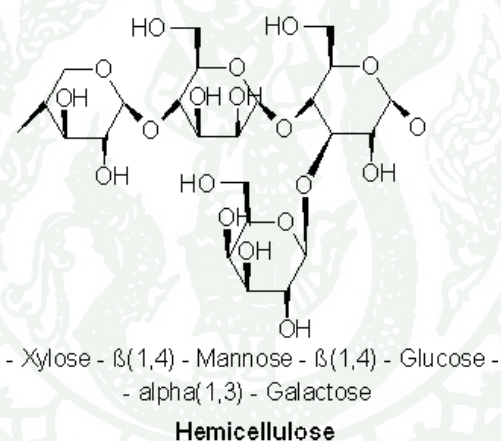


ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: Chaplin (2014)

3.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส คือ พอลิเมอร์ของน้ำตาลไม่มีประจุชนิดต่าง ๆ เช่น ไซโลกลูแคน (xyloglucan) กลูโคแมนแนน (glucomannan) และ กาแล็กโทกลูโคแมนแนน (galactoglucomannan) (ภาพที่ 2) เป็นต้น เฮมิเซลลูโลสที่พบมากที่สุด ได้แก่ ไซโลกลูแคน ที่มี β -1,4-glucan เป็นแกนหลักของโมเลกุลเหมือนเซลลูโลส แต่มีแขนงของน้ำตาลไซโลสเกาะอยู่เป็นระยะๆ และบนโมเลกุลของไซโลสนี้อาจมีน้ำตาลอื่นๆ ต่อเป็นแขนงยาวออกไปด้วย เช่น น้ำตาลกาแล็กโทส หรือ อะราบินอส เป็นต้น ไซโลกลูแคนสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนเชื่อมต่อกันกับโมเลกุลของเซลลูโลส และอาจไขว้ไปเชื่อมต่อกับโมเลกุลของเซลลูโลสบนไมโครไฟบริลอื่นๆ ด้วย ไซโลกลูแคนจึงทำหน้าที่เป็นตัวที่ยึดให้ไมโครไฟบริลของเซลลูโลสเชื่อมต่อกันเป็นผนังเซลล์ (จริงแท้, 2549)

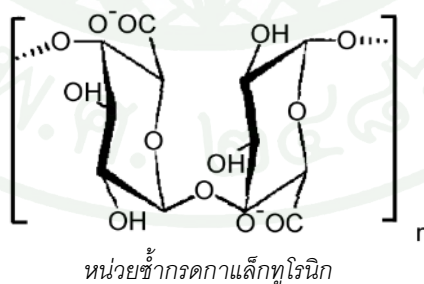


ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: Berserker (2006)

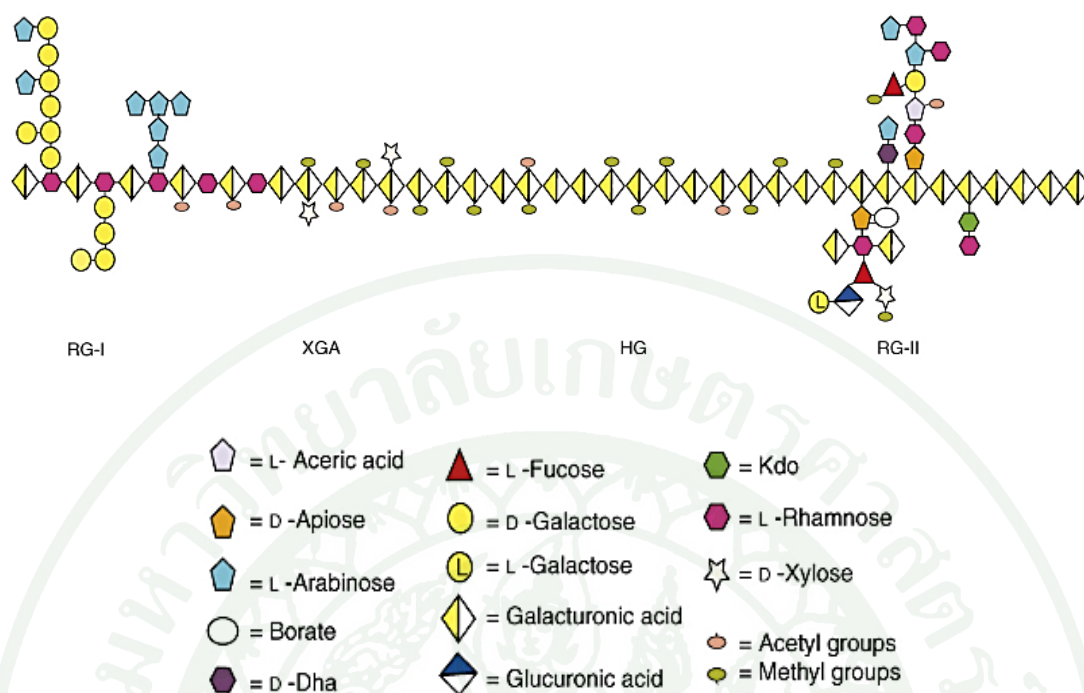
3.3 เพกติน

เพกตินเป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีโครงสร้างของโมเลกุลค่อนข้างซับซ้อน ประกอบด้วยกรดของน้ำตาลกาแล็กโทส หรือกรดกาแล็กทูโรนิก (galacturonic acid) เป็นหลัก (ภาพที่ 3) มักมีแขนงซับซ้อน เพกตินที่พบมากมี 3 ชนิด ได้แก่ โฮโมกาแล็กทูโรแนน (homogalacturonan; HG) ซึ่งเป็นโมเลกุลสายยาวของกรดกาแล็กทูโรนิกไม่มีแขนง และมักมีกลุ่มเมทิลเกาะที่กลุ่มคาร์บอกซิลของกรดกาแล็กทูโรนิก หรือมีน้ำตาลไซโลสเกาะกับโมเลกุลของกรดกาแล็กทูโรนิก ซึ่งได้แก่ ไซโลกาแล็กทูโรแนน (xylogalacturonan) เพกตินอีกชนิดหนึ่งที่พบมาก ได้แก่ แรมโนกาแล็กทูโรแนน-1 (rhamnogalacturonan-I; RG-I) เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลแรมโนส (rhamnose) สลับกับกรดกาแล็กทูโรนิก และมีแขนงของเบต้ากาแล็กแทน (β -galactan) แอลฟาอะราบินแนน (α -arabinan) หรือ อะราบินโนกาแล็กแทน (arabinogalactan) ณ ตำแหน่งของน้ำตาลแรมโนส นอกจากนี้ยังมีเพกตินที่เปลี่ยนแปลงมาจากโฮโมกาแล็กทูโรแนน ได้แก่ แรมโนกาแล็กทูโรแนน-2 (rhamnogalacturonan-II; RG-II) ซึ่งมีแกนหลักเป็นโฮโมกาแล็กทูโรแนน แต่มีแขนงต่างกันถึง 4 แบบ แต่ละแขนงประกอบด้วยน้ำตาลชนิดต่างๆ และอาจเกาะกันเป็นไดเมอร์โดยอาศัยอะตอมของโบรอนเป็นตัวเชื่อม (ภาพที่ 4) เพกตินเหล่านี้จะเรียงตัวเป็นโครงข่ายประสานกับไมโครไฟบริลของเซลลูโลสเช่นเดียวกับเฮมิเซลลูโลส โดยอาศัยแขนงของแรมโนกาแล็กทูโรแนน-1 (ภาพที่ 5) ทำให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรงขึ้น ส่วนในบริเวณรอยต่อระหว่างเซลล์ หรือมิดเดิลลามেলা พบเพกตินเป็นส่วนใหญ่และเชื่อมต่อกันเอง ทำให้เซลล์ 2 เซลล์ เชื่อมติดกัน (จริงแท้, 2538)



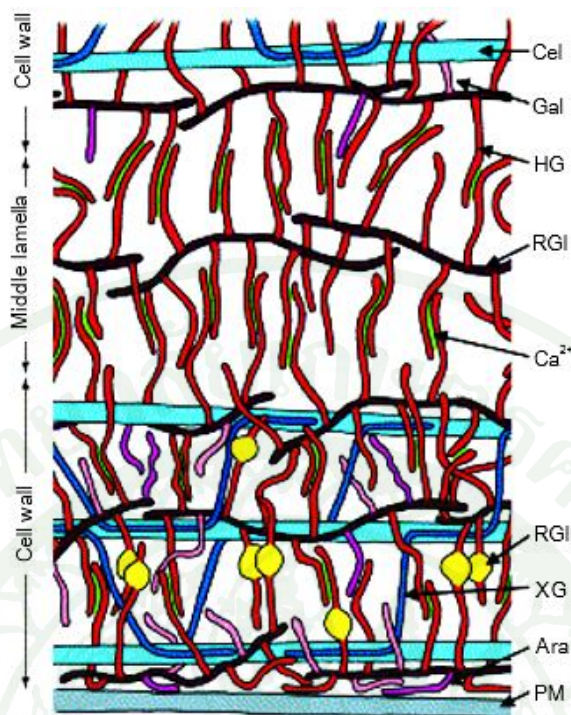
ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างของเพกติน

ที่มา: Yi and Neufeld (2005)



ภาพที่ 4 แผนภาพแสดงโครงสร้างของเพกทิน ประกอบด้วย ไฮโมกาแล็กทูโรแนน (HG) ไฮโดกาแล็กทูโรแนน (XGA) แรมโนกาแล็กทูโรแนน-1 (RG-I) และแรมโนกาแล็กทูโรแนน-2 (RG-II)

ที่มา: Mohnen (2008)



ภาพที่ 5 การจัดเรียงตัวของพอลิแซ็กคาไรด์ในผนังเซลล์พืช

บริเวณผนังเซลล์มีเซลลูโลส (Cel) เป็นโมเลกุลหลักเกาะอยู่กันเป็นกลุ่ม เรียกว่า ไมโครไฟบริล แต่ละไมโครไฟบริลเชื่อมโยงถึงกันด้วยเฮมิเซลลูโลส โดยเฉพาะไซโลกลูแคน (XG) ซึ่งเกาะอยู่กับเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน ส่วนในบริเวณรอยต่อระหว่างเซลล์หรือมิดเดิลลามัลลา องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเพกทินที่มีโมเลกุลของแรมโนกาแล็กทูโรแนน-1 (RGI) เป็นแกนหลัก จัดเรียงตัวอยู่ในแนวเดียวกับไมโครไฟบริลของเซลลูโลส มีแขนงเป็นพอลิเมอร์ของไฮโมกาแล็กทูโรแนน (HG) อะราบีแนน (Ara) กาแล็กแทน (Gal) และแรมโนกาแล็กทูโรแนน-2 (RGII) โดยโมเลกุลของแรมโนกาแล็กทูโรแนน-2 เกิดพันธะเชื่อมโยงข้ามระหว่างโมเลกุลของเพกทินผ่านพันธะบอเรตเอสเทอร์ นอกจากนี้โมเลกุลแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ยังเกิดพันธะเชื่อมข้ามกับโมเลกุลของกรดกาแล็กทูโรนิกที่ไม่ได้ถูกเอสเทอร์ไฟด์ด้วยหมู่เมทิลบนสายของไฮโมกาแล็กทูโรแนน (PM; plasma membrane; เยื่อหุ้มเซลล์)

ที่มา: Vorwerk *et al.* (2004)

4. การแช่เยือกแข็ง

กระบวนการแช่เยือกแข็งเป็นวิธีการถนอมอาหารด้วยอุณหภูมิต่ำ โดยลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง และทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (water activity) ของอาหารลดลง ถึงแม้ว่ากระบวนการแช่เยือกแข็งจะไม่ทำลายเชื้อจุลินทรีย์เหมือนกับการให้ความร้อนแบบสเตอริไลซ์ หรือการพาสเจอร์ไรซ์ แต่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาต่างๆ ได้ (Arthey and Ashurst, 1996) การแช่เยือกแข็งทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารได้นาน 6 เดือน ถึง 2 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร และอุณหภูมิในการเก็บรักษา เช่น ผลไม้และผักเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส (0 องศาฟาเรนไฮต์) สามารถเก็บได้นาน 8 -12 เดือน (Blond and Meste, 2004)

4.1 หลักการแช่เยือกแข็ง

หลักการสำคัญของการแช่เยือกแข็ง คือ การเปลี่ยนสถานะของน้ำในอาหารที่เป็นของเหลวให้เป็นผลึกน้ำแข็ง เพื่อมิให้น้ำนั้นสามารถทำหน้าที่ต่างๆ ในปฏิกิริยาเคมี (สายสนม, 2546) โดยการจะเกิดผลึกได้นั้นต้องประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการก่อนิวเคลียสผลึก (nucleation) และขั้นตอนการเพิ่มขนาดของผลึก (crystal growth) (Fellows, 1990)

4.1.1 การก่อนิวเคลียสผลึก (nucleation)

การก่อนิวเคลียสผลึก คือ ปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของน้ำมารวมตัวกันอย่างเป็นระเบียบจนเป็นอนุภาคเล็กๆ ขึ้น ขั้นตอนหรือกลไกในการก่อนิวเคลียสผลึกยังไม่มีคำอธิบายที่กระจ่าง แต่คาดว่าในช่วงแรกของการก่อนิวเคลียสผลึกนั้นจะเกิดขึ้นเป็นครั้งคราวแล้วก็สลายตัวไป โดยขนาดของนิวเคลียสที่เริ่มก่อขึ้นในช่วงนี้ เรียกว่า ขนาดวิกฤต (critical size) นิวเคลียสจะเกิดขึ้นได้เมื่ออยู่ในสภาวะเหมาะสม คือ ระดับอุณหภูมิของน้ำหรือสารละลายนั้นลดต่ำลงจนถึงจุดความเย็นยิ่งยวด (supercooling) ซึ่งจะอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง รูปแบบการก่อนิวเคลียสผลึกจะเกิดได้ 2 แบบ คือ homogeneous nucleation ซึ่งเกิดขึ้นในน้ำบริสุทธิ์เท่านั้นไม่มีสารอื่นปะปนอยู่ จะเริ่มเกิดขึ้นโดยโมเลกุลของน้ำจัดเรียงตัวกันเป็นอนุภาคเล็กๆ อีกแบบหนึ่ง คือ heterogeneous nucleation จะเกิดขึ้นในการแช่เยือกแข็งเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ไป โดยจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อผิวหน้าของอนุภาคนั้นมีสภาวะเหมาะสม โมเลกุลของน้ำเรียงตัวกันเป็นอนุภาคเล็กๆ

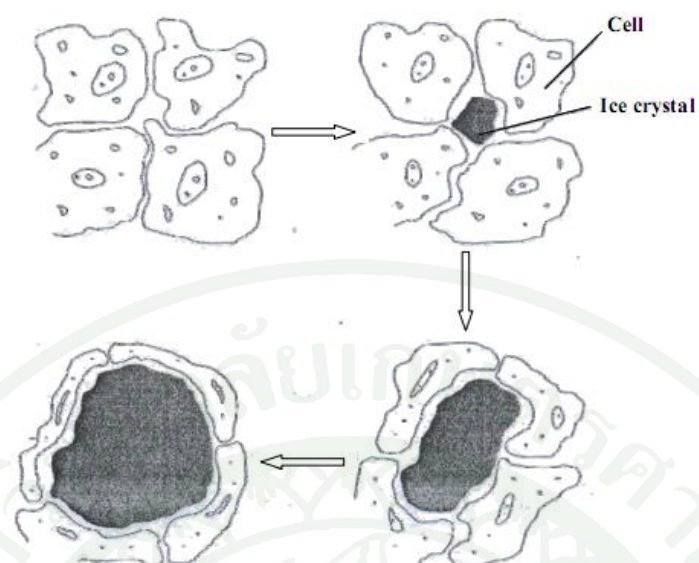
และมีสารอื่นที่ปะปนอยู่มากบนผิวหน้าหรือเกิดขึ้นบนผิวหน้าบรรจุภัณฑ์ หรืออาจเกิดจากอนุภาคของสารที่ผสมอยู่ด้วยก็ได้

4.1.2 การเพิ่มขนาดผลึก (crystal growth)

การเพิ่มขนาดผลึกเป็นปรากฏการณ์ต่อเนื่องจากการก่อนิวเคลียสผลึก การเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งจะเกิดได้ที่อุณหภูมิใกล้ๆ กับจุดหลอมเหลว โดยโมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนตัวเข้ามาเกาะอยู่กับนิวเคลียสผลึกที่ก่อตัวแล้วมากกว่าที่จะก่อนิวเคลียสผลึกขึ้นใหม่ เพราะโมเลกุลของน้ำในสภาวะที่เป็นของเหลวมีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ได้ในอัตราเร็วสูง และจะหยุดลงเมื่อกระทบกับผิวหน้าของนิวเคลียสผลึก จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงทำให้อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกสูงขึ้น

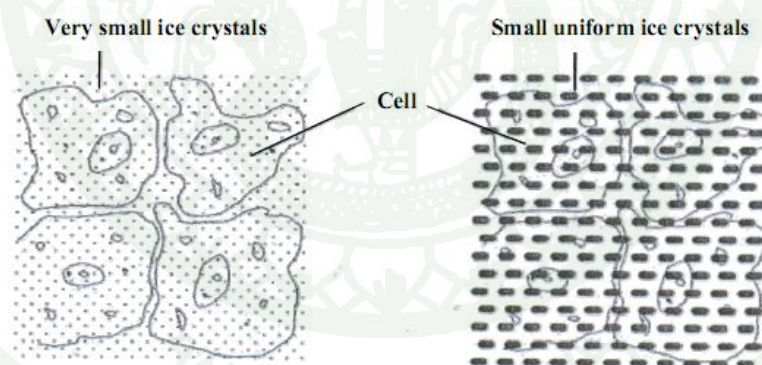
4.2 อัตราการแช่เยือกแข็ง

อัตราการแช่เยือกแข็ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหน่วยเวลา ซึ่งอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งนั้นมีความสำคัญต่อคุณภาพของอาหารหลังการทำละลาย และการยอมรับของผู้บริโภค การแช่เยือกแข็งแบบช้า (slow freezing) ทำให้ผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณภายนอกเซลล์ และเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ เนื่องจากการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ น้ำภายนอกเซลล์จึงมีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำภายในเซลล์ ดังนั้นน้ำภายนอกเซลล์จึงเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งก่อน ผลึกน้ำแข็งมีความดันไอน้ำต่ำกว่าบริเวณภายในเซลล์ น้ำจากภายในเซลล์จึงเคลื่อนที่ไปยังผลึกน้ำแข็งทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น (Sun and Zheng, 2006) เซลล์จึงสูญเสียน้ำเป็นผลให้ความดันเต่ง (turgor pressure) ภายในเซลล์ลดลง และทำให้เซลล์อ่อนนุ่มลง นอกจากนี้ผลึกน้ำแข็งที่โตขึ้นจะทำให้ช่องว่างระหว่างเซลล์สูญเสียรูปร่าง และทำให้เซลล์ข้างเคียงแตก ดังภาพที่ 6 เมื่อนำมาละลายน้ำแข็ง เซลล์จะไม่กลับมามีรูปร่างและความเต่งของเซลล์เหมือนเดิม อาหารจะนิ่มและเกิดการสูญเสียรวมทั้งสารที่มีคุณค่าทางอาหาร ทำให้คุณภาพของอาหารลดลง (Fellows, 1990) ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (rapid freezing) ผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นได้ทั้งภายใน และภายนอกเซลล์ ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ กระจายอยู่ทั่วไป จึงไม่ทำให้เซลล์เกิดการหดตัว ดังภาพที่ 7 เซลล์เกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อย ทำให้อาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีคุณภาพดีกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้า (Fellows, 1990)



ภาพที่ 6 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเซลล์เนื้อเยื่อโดยการแช่เยือกแข็งแบบช้า

ที่มา: Sun and Zheng (2006)



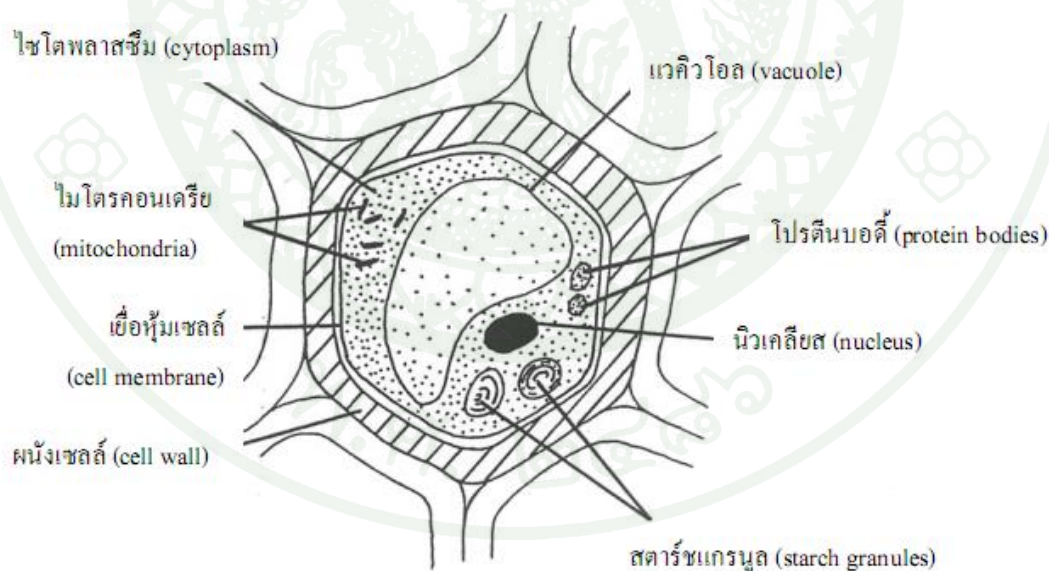
ภาพที่ 7 การเกิดผลึกน้ำแข็งในเซลล์เนื้อเยื่อโดยการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

ที่มา: Sun and Zheng (2006)

5. ผลของการแช่เยือกแข็งที่มีต่อคุณภาพของผลไม้

ผลไม้ส่วนใหญ่เมื่อนำมาแช่เยือกแข็งมักเกิดปัญหาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส กลิ่น และรสชาติ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการยอมรับของผู้บริโภค สาเหตุหลักที่ทำให้ผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการแช่เยือกแข็ง คือ ปริมาณน้ำที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในผลไม้สด ซึ่งจะก่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งจำนวนมากที่ทำให้ผนังเซลล์ และเนื้อเยื่อของผลไม้ได้รับความเสียหาย (Lazar, 1968; Li and Sun, 2002)

ผลไม้สดประกอบด้วยน้ำประมาณ 80% หรือมากกว่า และเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากภายในแวคิวโอล (vacuole) ของเซลล์พืช (ภาพที่ 8) มีโครงสร้างผนังเซลล์ที่ยืดหยุ่นน้อย รวมทั้งมีเยื่อหุ้มเซลล์ที่ไวต่อการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ แม้ว่าการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถลดการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ได้แต่เนื้อเยื่อของเซลล์พืชยังคงได้รับความเสียหายเนื่องจากปริมาณน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมาก นอกจากนี้การขยายปริมาตรของน้ำแข็งก็มีส่วนทำให้เกิดความเสียหายกับเซลล์ (Li and Sun, 2002)



ภาพที่ 8 โครงสร้างและส่วนประกอบของเซลล์พืช

ที่มา: Edwards (1995)

จากลักษณะโครงสร้างของเซลล์พืช ผลไม้ส่วนใหญ่มีโครงสร้างของผนังเซลล์ที่บาง และมีความดันภายในเซลล์ที่ให้ความแน่นเนื้อกับเนื้อสัมผัสของผลไม้ การสูญเสียความแน่นเนื้อของผลไม้จากการแช่เยือกแข็ง สามารถแบ่งออกได้เป็นขั้นตอนที่ผลึกน้ำแข็งทำให้เยื่อหุ้มเซลล์แตกทำให้เซลล์สูญเสียความดันภายในเซลล์ และการโตของผลึกน้ำแข็งที่ทำให้เกิดความเสียหายกับผนังเซลล์ (Edwards, 1995) การที่เซลล์ได้รับความเสียหายจากการแช่เยือกแข็งนอกจากมีผลทำให้ผลไม้สูญเสียความแน่นเนื้อแล้วยังมีผลทำให้ผลไม้เกิดการสูญเสียกลิ่นรส และสี จากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน อีกด้วย (Lazar, 1968)

6. การปรับปรุงคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็ง

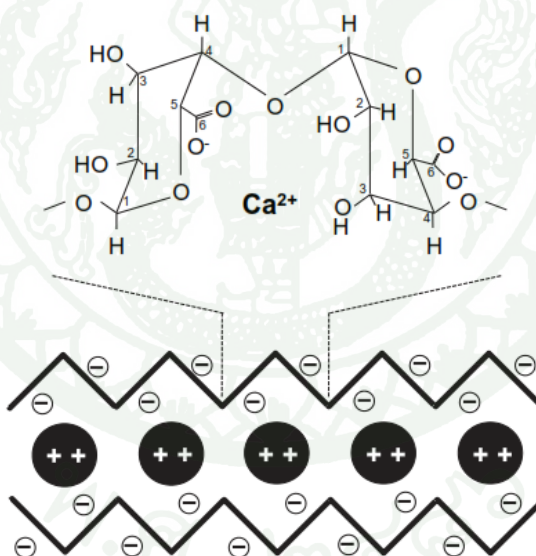
ผลไม้ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและทำละลายมีคุณภาพเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะด้านเนื้อสัมผัส ทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่เยือกแข็ง การเลือกใช้ผลไม้ที่มีระดับความสุกบางส่วนทดแทนผลไม้สุกก็เป็นวิธีที่สามารถช่วยลดความเสียหายของคุณภาพผลไม้แช่เยือกแข็งจากการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้ อีกทั้งการนำผลไม้มาผ่านกระบวนการเบื้องต้นก่อนการแช่เยือกแข็งด้วยการเติมแคลเซียม และเพกทินลงในผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง รวมถึงการลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีการออสโมซิสสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็งได้

6.1 ระดับความสุกของผลไม้

ระดับความสุกของผลไม้ส่งผลต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็ง ผลไม้สุกที่มีเนื้อสัมผัสนิ่มจากการสลายตัวของเพกทินบริเวณเมล็ดเล็กลาเมลลาของผนังเซลล์พืชจากเอนไซม์ (Ketsa et al., 1999) เมื่อนำมาผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งและทำละลาย ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของผลไม้เกิดการเสื่อมเสียจากการเกิดผลึกน้ำแข็ง ในขณะที่ผลไม้สุกบางส่วนมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าผลไม้สุก สามารถทนต่อความเสียหายจากการเกิดผลึกน้ำแข็งได้มากกว่า ส่งผลให้คุณภาพเนื้อสัมผัสหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายของผลไม้สุกบางส่วนดีกว่าผลไม้สุก โดยที่คุณภาพด้านกลิ่นรสสามารถปรับปรุงได้โดยการเติมน้ำตาลร่วมกับน้ำผลไม้ เพื่อให้มีคุณภาพด้านกลิ่นรสใกล้เคียงผลไม้สุก (Sriwimon and Boonsupthip, 2010)

6.2 แคลเซียม

แคลเซียมเป็นเกลือที่ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผัก และผลไม้ โดยทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความคงตัว (firming agent) กลไกการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของผลไม้ด้วยแคลเซียม คือ การที่แคลเซียมไอออนสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบเพกทินบริเวณมิดเซลล์ลามาเลล่า และผนังเซลล์ของผลไม้ เกิดการเชื่อมโยงข้ามระหว่างหมู่คาร์บอกซิลบนสายเพกทินและประจุของแคลเซียมไอออน โดยแคลเซียมไอออนจะทำหน้าที่ดึงหมู่คาร์บอกซิลที่เป็นอิสระบนสายของเพกทินสายหนึ่งให้จับกับหมู่คาร์บอกซิลของสายเพกทินอีกสายหนึ่งเกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า egg-box model ดังภาพที่ 9 เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมเพกเตทซึ่งไม่ละลายน้ำ จึงช่วยเพิ่มความแน่นแข็งและลดอัตราการสลายตัวของมิดเซลล์ลามาเลล่า และผนังเซลล์ ทำให้เนื้อผลไม้มีความแข็งแรงกรอบและคงตัวอยู่ได้ (จริงแท้, 2549; Lara *et al.*, 2004)



ภาพที่ 9 แผนภาพ Egg-box model ของเพกทินและแคลเซียม

(เส้นสีดำ คือ สายโซ่ของเพกทิน และวงกลมสีดำ คือ แคลเซียมไอออน)

ที่มา: Fraeye *et al.* (2010)

ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา แคลเซียมคลอไรด์เป็นเกลือแคลเซียมหลักที่ถูกนำมาใช้มากในการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้แปรรูป แต่เนื่องจากแคลเซียมคลอไรด์ทำให้เกิดรสขม หรือกลิ่นรสผิดปกติในเนื้อผลไม้ (Luna-Guzmán and Barrett, 2000; Hernández-Muñoz *et al.*, 2006) ปัจจุบันจึงได้มีการนำเกลือแคลเซียมอื่นๆ มาใช้เป็นทางเลือกใหม่ เพื่อทดแทนการใช้แคลเซียมคลอไรด์ เช่น เกลือแคลเซียมแลคเตท หรือแคลเซียมฟอสโฟโนเต เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยพบว่าแคลเซียมแลคเตทเป็นเกลือแคลเซียมที่มีศักยภาพสูงในด้านการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัส และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผัก และผลไม้ โดยแคลเซียมแลคเตทซึ่งเป็นเกลือของกรดอินทรีย์มีความสามารถในการป้องกันการเกิดสีน้ำตาล และการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลไม้ตัดแต่งได้ (Manganaris *et al.*, 2005) อีกทั้งยังเป็นเกลือที่มีความสามารถในการละลายสูง และร่างกายเราสามารถดูดซึมแคลเซียมที่อยู่ในรูปของแคลเซียมแลคเตทไปใช้งานได้ดีกว่าแคลเซียมที่เป็นเกลือของกรดอนินทรีย์ จึงเป็นการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับอาหารได้ (Hernández-Muñoz *et al.*, 2006) นอกจากนี้แคลเซียมแลคเตทยังช่วยยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ โดยช่วยลดความเสียหายของผลไม้จากจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียได้อีกด้วย (Luna-Guzmán and Barrett, 2000; Alandes *et al.*, 2006)

6.3 เพกทิน

เพกทินเป็นสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) ที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารอย่างกว้างขวาง เพกทินทางการค้าสกัดได้จากเนื้อเยื่อของพืชหลายชนิด เช่น เปลือกของผลไม้ตระกูลส้ม (citrus) กากของแอปเปิ้ลที่คั้นน้ำแล้ว (apple pomace) หรือหัวบีท (beet) เป็นต้น ซึ่งแหล่งของพืชที่ใช้สกัดเพกทินนี้มีผลต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเพกทิน (Akhtar *et al.*, 2002) เพกทินแบ่งเป็น 2 ประเภท ตามระดับของเอสเทอริฟิเคชัน (degree of esterification; DE) ได้แก่ เพกทินที่มีเมทอกซิลสูง (high methoxyl pectin; HM) คือเพกทินที่มีระดับเอสเทอริฟิเคชันมากกว่าหรือเท่ากับ 50% เพกทินประเภทนี้จะสามารถเกิดเจลได้ในสภาวะที่เป็นกรด (พีเอช ≤ 3.5) และมีตัวถูกละลายความเข้มข้นสูง (เช่น น้ำตาลซูโครส ความเข้มข้นมากกว่า 50%) และเพกทินที่มีเมทอกซิลต่ำ (low methoxyl pectin; LM) คือเพกทินที่มีระดับเอสเทอริฟิเคชันน้อยกว่า 50% เพกทินประเภทนี้จะสามารถเกิดเจลได้ในสภาวะที่มีแคลเซียมอิออน (Rolin and De Vries, 1990)

เพกทินถูกนำมาใช้เป็นวัตถุเจือปนในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดเจล (gelling agent) หรือสารเพิ่มความข้นหนืด (thickening agent) ในแยม เยลลี่ มาร์มาเลด ขนมหวาน หรือลูกกวาด นอกจากนี้เพกทินยังทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว (stabilizing agent) ในนม และเครื่องดื่มต่างๆ และเพกทินยังถูกนำไปใช้ในซอส ไชร์ป หรืออาหารชนิดอื่นๆ เพื่อให้เนื้อสัมผัสที่ดีในอาหาร (Costell *et al.*, 1993; Akhtar *et al.*, 2002; Mesbahi *et al.*, 2005)

มีการนำเพกทินมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพผลไม้แช่เยือกแข็ง เนื่องจากเพกทินมีส่วนช่วยในการเสริมสร้างโครงสร้างผนังเซลล์พืช การเติมเพกทินเข้าไปในผลไม้ก่อนแช่เยือกแข็งนั้น เพกทินจะเข้าไปอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างเซลล์ (intercellular space) เชื่อมแต่ละเซลล์เข้าด้วยกัน เกิดเป็นโครงสร้างพอลิแซ็กคาไรด์เจลที่แข็งแรงระหว่างเซลล์ผลไม้ ช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็ง ทำให้ผลไม้ยังคงคุณภาพเนื้อสัมผัสที่ดีอยู่ได้หลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย (Martínez-Monzó *et al.*, 1998; Xie and Zhao, 2004) อย่างไรก็ตามเนื่องจากเพกทินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และเป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง การเติมเพกทินเข้าไปในเนื้อผลไม้อย่างสม่ำเสมอก่อนการแช่เยือกแข็งทำได้ยาก เพราะเพกทินจะไปเคลือบอยู่ที่บริเวณผิวของชิ้นผลไม้มากกว่าจะแพร่เข้าไปในเนื้อของผลไม้ ส่งผลเสียต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็ง (Buggenhout *et al.*, 2006) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดว่าการทำให้เพกทินมีขนาดโมเลกุลเล็กลง อาจจะช่วยให้การแพร่ของเพกทินเข้าสู่เนื้อผลไม้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นขนาดโมเลกุลที่เล็กลงของเพกทินอาจทำให้เพกทินสามารถผ่านเข้าไปสู่บริเวณผนังเซลล์พืช ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างผนังเซลล์พืชได้มากยิ่งขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็งของเพกทินได้

6.4 การลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีการออสโมซิส

การลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็ง ประกอบด้วย ขั้นตอนการลดปริมาณน้ำ และการแช่เยือกแข็ง การลดปริมาณน้ำในผลไม้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็ง โดยอาศัยการลดปริมาณน้ำก่อนการแช่เยือกแข็ง ทำให้ปริมาณผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นลดลง ส่งผลให้เซลล์ได้รับความเสียหายจากการแช่เยือกแข็งน้อยลง (Lazar, 1968; Li and Sun, 2002)

การใช้วิธีออสโมซิสเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดปริมาณน้ำบางส่วนในผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ทำให้ผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก รวมทั้งใช้พลังงานน้อย หลักการของวิธีออสโมซิส คือ โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าโดยผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (ภาพที่ 10) ดังนั้นการใช้วิธีออสโมซิสโดยการแช่ผลไม้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง (hypertonic solutions) ได้แก่ สารละลายน้ำตาล ทำให้โมเลกุลของน้ำภายในชิ้นผลไม้ที่มีปริมาณมากกว่าสารละลายแพร่ออกจากเซลล์ ส่งผลให้น้ำภายในชิ้นผลไม้มีปริมาณลดลง ในขณะเดียวกันตัวถูกละลายที่มีปริมาณมากในสารละลายก็สามารถแพร่จากสารละลายเข้าไปภายในเซลล์ของผลไม้ (Fito *et al.*, 2001) ปริมาณน้ำตาล หรือปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่เพิ่มเข้าไปในชิ้นผลไม้มีผลต่อกลิ่น และรสชาติผลิตภัณฑ์ (Torreggiani and Bertolo, 2001)



ภาพที่ 10 ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำ และสารละลายภายในเซลล์ เมื่อแช่ในสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Torreggiani (1993)

ชนิดของสารละลายออสโมติก (osmotic solution) ที่ใช้ในกระบวนการลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งนี้มีบทบาทสำคัญต่ออัตราการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ผลไม้ (water loss) และอัตราการได้รับตัวถูกละลายจากสารละลายออสโมติกเข้าสู่เซลล์ผลไม้ (solid gain) โดยมีงานวิจัยพบว่าการใช้น้ำตาลซูโครสเป็นสารละลายออสโมติกส่งผลดีต่อคุณภาพของผลไม้ El-aouar *et al.* (2006) พบว่าการใช้น้ำตาลซูโครสในการลดปริมาณน้ำบางส่วนในมะละกอส่งผลให้มะละกามีปริมาณการสูญเสียน้ำ และการได้รับตัวถูกละลายมากกว่าการใช้รับจากข้าวโพด และยังมีรายงานว่า การใช้น้ำตาลซูโครสในการลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งแครอท และบดล็อกโคลี ส่งผลดีต่อการรักษาคุณภาพเนื้อสัมผัสของแครอท และบดล็อกโคลีหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย โดยช่วยลดความเสียหายของผนังเซลล์จากผลึกน้ำแข็ง และลดปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (Ohnishi and Miyawaki, 2005) อีกทั้งการใช้น้ำตาลซูโครสยังส่งผลดีต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็ง Lowithun and Charoenrein (2009) พบว่าการใช้น้ำตาลซูโครสลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งเงาะช่วยปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของเงาะแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าการใช้น้ำตาลเทรฮาโลส และมอลลิทอล นอกจากนี้ น้ำตาลซูโครสยังมีส่วนช่วยในการรักษากลิ่นรส ลดการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ และให้ความหวานกับผลไม้ (Fennema, 1976) ดังนั้นการใช้น้ำตาลซูโครสในกระบวนการลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งจึงสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็งได้

7. การไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรด

วิธีการลดขนาดโมเลกุลของเพกตินที่ทำได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูง คือ การไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้างระดับโมเลกุลของเพกติน โดยกรดจะไฮโดรไลซ์ส่วนของโซ่กิ่งของโมเลกุลน้ำตาลที่เกาะอยู่บนสายของเพกติน และตัดพันธะที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลแรมโนสที่แทรกอยู่ในสายพอลิเมอร์ของกรดกาแล็กทูโรนิก ทำให้เกิดการสลายตัวของแรมโนกาแล็กทูโรแนน-1 ในขณะที่ส่วนของไฮโมกาแล็กทูโรแนนนั้นทนต่อการถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดมากกว่า เนื่องจากพันธะไกลโคซิดิกที่เชื่อมระหว่างกรดกาแล็กทูโรนิกของสายไฮโมกาแล็กทูโรแนนนั้นทนต่อการถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดที่พีเอชต่ำ (Powell *et al.*, 1982; Round *et al.*, 2010) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะเวลาในการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดนานขึ้น ไฮโมกาแล็กทูโรแนนจะค่อยๆ ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดที่บริเวณส่วนปลายของสายพอลิเมอร์จนกลายเป็นโอลิโกเมอร์ (oligomer) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง (Kravtchenko *et al.*, 1993)

มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของระยะเวลาการไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรดต่อความหนืด และ น้ำหนักโมเลกุลของเพกทิน พบว่าการไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรดด้วยระยะเวลาสั้น ส่งผลให้ เพกทินมีค่าความหนืดในตัว (intrinsic viscosity) และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลง (Thibault *et al.*, 1993; Round *et al.*, 2010) นอกจากนี้การไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรดยังส่งผลให้เกิดการสลาย พันธะเอสเทอร์ (deesterification) ของหมู่เมทิลบนสายเพกทิน ทำให้เพกทินมีระดับเอสเทอร์- ฟิเคชันลดลง (Kupchik *et al.*, 2006; Khotimchenko *et al.*, 2012) แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มี การศึกษาผลของระยะเวลาการไฮโดรไลซ์เพกทินต่อระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกทิน

8. อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเพกทิน

อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน คือ อุณหภูมิที่พอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) เกิด การเปลี่ยนแปลงกลับไปมาระหว่างสภาวะกระจก (glassy state) ซึ่งมีลักษณะแข็งเปราะ มี โครงสร้างจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (แต่น้อยกว่าของแข็ง) โมเลกุลมีการเคลื่อนไหวต่ำ กับสภาวะ รับเบอรี (rubbery state) ซึ่งมีลักษณะเหนียว คล้ายยาง โครงสร้างจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (แต่ น้อยกว่าน้ำ) มีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลสูง (สวนิต, 2556) ซึ่งอุณหภูมิกลาสทรานซิชันนี้ถือเป็น ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความคงตัวของพอลิเมอร์อสัณฐานในอาหาร จึงได้มีการศึกษาอุณหภูมิ กลาสทรานซิชันเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของอาหารระหว่างกระบวนการผลิต และการเก็บ รักษา (Abbas, 2010) โดยนักวิจัยนิยมวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter) หรือที่เรียกกันอย่างย่อว่า DSC เนื่องจากให้ผลที่สังเกตเห็นได้ค่อนข้างชัดเจน โดยช่วงอุณหภูมิที่เกิดปรากฏการณ์กลาสทรานซิชัน จะสังเกตได้จากช่วงตำแหน่งอุณหภูมิบนเทอร์โมแกรม (thermogram) ที่มีการเพิ่มค่าความจุความร้อนของตัวอย่างที่เปลี่ยนจากสภาวะกระจกไปเป็นสภาวะรับเบอรีในระหว่างการสแกนเพิ่มอุณหภูมิ ให้แก่ตัวอย่าง (สงวนศรี และ กัญญารัตน์, 2556)

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของอาหาร คือ น้ำหนักโมเลกุลของสาร หรือพอลิเมอร์ โดยสารพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสูงกว่า สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Slade and Levine, 1991; Rao and Quintero, 2005; สวนิต, 2556) มี งานวิจัยที่ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของสารต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันในอาหาร Mitsui *et al.* (1999) ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของอะกาโรส (agarose) ต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน โดยใช้วิธีการไฮโดรไลซ์อะกาโรสด้วยกรดเพื่อเตรียมอะกาโรสให้น้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

พบว่าเมื่ออะกาโรสถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดด้วยระยะเวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อะกาโรสน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลง นอกจากนี้ Chatakanonda *et al.* (2011) ยังศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน โดยการนำสตาร์ชมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรด พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนานขึ้นจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของสตาร์ชลดลง แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุล หรือผลของการไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรดต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเพกทิน

9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

9.1 ผลของระดับความสุกต่อคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็ง

สุพัตรา และ สงวนศรี (2554) ได้ศึกษาผลของระดับความสุกและการแช่เยือกแข็งต่อเนื้อสัมผัสและองค์ประกอบของเพกทินในมะละกอ พบว่ามะละกอที่มีระดับความสุกมากกว่ามีค่าความแน่นเนื้อ ของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ และปริมาณเพกทินทั้งหมดลดลง ในขณะที่ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ และเพกทินที่ละลายในสารช่วยจับไอออนของโลหะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อนำขึ้นมะละกามาผ่านการแช่เยือกแข็งและทำละลาย พบว่ามะละกอมีความแน่นเนื้อ ของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ และปริมาณเพกทินทั้งหมดลดลง ในขณะที่ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ และเพกทินที่ละลายในสารช่วยจับไอออนของโลหะมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยมะละกอที่มีระดับความสุกมากกว่ามีค่าความแน่นเนื้อ และองค์ประกอบของเพกทินเปลี่ยนแปลงมากกว่ามะละกอที่ระดับความสุกต่ำกว่า

Rimkeeree and Charoenrein (2014) ได้ศึกษาผลของระดับความสุกต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยใช้มะม่วงที่มีระดับความสุกแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ สุกบางส่วน สุก และสุกเต็มที่ มาทำการแช่เยือกแข็ง พบว่าหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย มะม่วงสุกบางส่วนมีค่าความแน่นเนื้อ และคะแนนความแน่นเนื้อจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสสูงสุด ในขณะที่มีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง และปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ต่ำสุด อีกทั้งผลการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงแช่เยือกแข็งยังแสดงให้เห็นว่าความเสียหายของผนังเซลล์ของมะม่วงสุกบางส่วนหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายเกิดขึ้นน้อยกว่ามะม่วงสุก และมะม่วงสุกเต็มที่

9.2 ผลของแคลเซียม เพกทิน น้ำตาลซูโครส และปัจจัยอื่นๆ ต่อคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็ง

Park (2004) ศึกษาคุณภาพของแคนตาลูปแช่เยือกแข็งต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยทำการปรับปรุงคุณภาพของแคนตาลูปแช่เยือกแข็งด้วยการแช่แคนตาลูปในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 70% แคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 2% และน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 70% ผสมกับแคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 1% ก่อนการแช่เยือกแข็ง ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าแคนตาลูปที่ผ่านการแช่ในน้ำตาลซูโครสผสมแคลเซียมแลคเตทมีคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด รองลงมาได้แก่แคนตาลูปที่ผ่านการแช่ในน้ำตาลซูโครส และแคนตาลูปที่ผ่านการแช่ในแคลเซียมแลคเตท ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ค่าความแน่นเนื้อพบว่าแคนตาลูปทั้ง 3 ทรีตเมนต์ มีค่าความแน่นเนื้อหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

Xie and Zhao (2004) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็ง โดยการแช่สตรอเบอรี่ในสารละลายน้ำเชื่อมข้าวโพดแบบฟรุคโตสสูงความเข้มข้น 50% หรือเพกทินเมทอกซิลสูงความเข้มข้น 3% ร่วมกับการเติมแคลเซียมความเข้มข้น 12% หรือสังกะสีความเข้มข้น 0.04% ด้วยกระบวนการแพร่กระจายภายใต้สุญญากาศก่อนการแช่เยือกแข็ง พบว่าหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายสตรอเบอรี่ยังคงความแน่นเนื้อ และมีการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างลดลง โดยน้ำเชื่อมข้าวโพดแบบฟรุคโตสสูงช่วยลดปริมาณน้ำที่สามารถกลายเป็นน้ำแข็งได้ในขณะที่เพกทินที่มีเมทอกซิลสูงสามารถเข้าไปอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างเซลล์ของสตรอเบอรี่ ทำหน้าที่เชื่อมแต่ละเซลล์เข้าด้วยกัน เสริมสร้างโครงสร้างของเซลล์ จึงสามารถช่วยปกป้องสตรอเบอรี่จากความเสียหายเนื่องจากการแช่เยือกแข็งได้ โดยการแพร่กระจายภายใต้สุญญากาศยังมีศักยภาพในการช่วยเพิ่มปริมาณแร่ธาตุในสตรอเบอรี่เมื่อใช้ร่วมกับแคลเซียมและสังกะสี ซึ่งสังกะสียังช่วยรักษาความคงตัวของสีสตรอเบอรี่ และแคลเซียมสามารถช่วยรักษาเนื้อสัมผัสของสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็งได้

Sousa *et al.* (2005) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของราสเบอร์รี่ด้วยการแช่ราสเบอร์รี่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ เพกทินเมทอกซิลต่ำความเข้มข้น 0.3% และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ผสมกับเพกทินเมทอกซิลต่ำความเข้มข้น 0.1% ก่อนการแช่เยือกแข็ง ผลการทดลองพบว่าความเสียหายของเนื้อสัมผัสของ

ราชเบอร์รี่จากการแช่เยือกแข็งและทำละลาย และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลาย น้ำแข็งลดลงเมื่อใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือใช้แคลเซียมคลอไรด์ร่วมกับเพกทินเมทอกซิลต่ำ โดยที่การใช้แคลเซียมคลอไรด์เพียงอย่างเดียวส่งผลดีต่อคุณภาพของราชเบอร์รี่แช่เยือกแข็งมากที่สุด ในขณะที่การใช้เพกทินเมทอกซิลต่ำเพียงอย่างเดียวให้ผลไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการฟริตเมนต์

Buggenhout *et al.* (2006) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของสตรอเบอร์รี่ ด้วยการนำสตรอเบอร์รี่มาผ่านกระบวนการแพร่กระจายภายใต้สุญญากาศด้วยเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส 100 U/มิลลิลิตร ร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5%, เพกทินเมทอกซิลสูงความเข้มข้น 1%, เพกทินเมทอกซิลสูงความเข้มข้น 1% ร่วมกับเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส 100 U/มิลลิลิตร และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5%, เพกทินเมทอกซิลสูงความเข้มข้น 3% และเพกทินเมทอกซิลสูงความเข้มข้น 3% ร่วมกับเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส 100 U/มิลลิลิตร และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5% ก่อนการแช่เยือกแข็ง ผลการทดลองพบว่าการแพร่กระจายภายใต้สุญญากาศด้วยเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส ร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของสตรอเบอร์รี่หลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้ดีที่สุด โดยเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสทำให้ระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกทินในสตรอเบอร์รี่ลดลงถึง 53% ส่งผลให้แคลเซียมสามารถจับกับสายเพกทินในสตรอเบอร์รี่ได้ดี ฟอรัมโครงสร้างที่เรียกว่า egg-box model ซึ่งสามารถช่วยรักษาเนื้อสัมผัสของสตรอเบอร์รี่หลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้ ในขณะที่การใช้เพกทินเพียงอย่างเดียว หรือใช้ร่วมกับเพกทินเมทิลเอสเทอเรส และแคลเซียมคลอไรด์นั้นไม่สามารถช่วยรักษาคุณภาพเนื้อสัมผัสของสตรอเบอร์รี่แช่เยือกแข็งได้ถึงแม้ว่าการใช้เพกทินจะส่งผลให้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของสตรอเบอร์รี่ลดลง โดยที่การใช้เพกทินความเข้มข้น 3% ร่วมกับเพกทินเมทิลเอสเทอเรสและแคลเซียมคลอไรด์ ส่งผลให้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของสตรอเบอร์รี่มีค่าต่ำที่สุด แต่การเติมเพกทินจะไปเคลือบที่ผิวของสตรอเบอร์รี่มากกว่าที่จะถูกแพร่เข้าไปในเนื้อของสตรอเบอร์รี่ ส่งผลให้การแพร่ของเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส และแคลเซียมคลอไรด์เข้าไปในชั้นสตรอเบอร์รี่ลดลง

Lowithun and Charoenrein (2009) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของเงาะแช่เยือกแข็งด้วยวิธีการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีการออสโมซิส โดยแช่เงาะในสารละลายน้ำตาล 3 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลลิทอล ที่มีความเข้มข้น 50% ผลการ

ทดลองพบว่าหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย เงามะที่ผ่านการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยสารละลายน้ำตาลความเข้มข้นสูงมีความเสียหายทางด้านเนื้อสัมผัส และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งลดลง โดยงามะที่แช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสมีค่าความแน่นเนื้อและคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงสุด

Cruvinel *et al.* (2009) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของสับปะรดแช่เยือกแข็งโดยนำสับปะรดมาผ่านกระบวนการแพร่กระจายภายใต้สุญญากาศด้วยสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 20% ที่เติมเพกทิน (ความเข้มข้น 0, 0.61, 1.5, 2.39 และ 3%) และแคลเซียมโพธิโอเนต (ความเข้มข้น 0, 1.21, 3, 4.79 และ 6%) ก่อนการแช่เยือกแข็ง จากผลการทดลองพบว่าการแพร่กระจายภายใต้สุญญากาศด้วยสารละลายน้ำตาลซูโครส ที่เติมเพกทินความเข้มข้น 1.5% และแคลเซียม 6% สามารถช่วยรักษาโครงสร้างของสับปะรดหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้ โดยทำให้สับปะรดมีความเสียหายทางด้านเนื้อสัมผัสลดลง และมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งลดลง

น้ำฝน (2552) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของแคนตาลูปแช่เยือกแข็งด้วยการลดปริมาณน้ำบางส่วนของแคนตาลูปก่อนการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีการออสโมซิสที่ความดันบรรยากาศ และความดันสุญญากาศ (ความดัน 100 และ 300 มิลลิบาร์) โดยใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 50%, สารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 50% ผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5% และสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 50% ผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5% และเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสความเข้มข้น 0.12% ผลการทดลองพบว่าหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายแคนตาลูปที่ผ่านการออสโมซิสดังกล่าว มีปริมาณความชื้น และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งลดลง ในขณะที่มีค่าความแน่นเนื้อมากกว่าตัวอย่างควบคุม โดยตัวอย่างแคนตาลูปที่ผ่านการออสโมซิสที่ความดันบรรยากาศมีค่าความแน่นเนื้อสูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสที่ความดันสุญญากาศ และเมื่อพิจารณาผลการเติมแคลเซียม และเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสพบว่าการเติมแคลเซียม และเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสลงไปในสารละลายน้ำตาลซูโครสเพิ่มศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพของแคนตาลูปแช่เยือกแข็ง โดยตัวอย่างที่เติมแคลเซียมในสารละลายออสโมซิสมีค่าความแน่นเนื้อสูงที่สุด และมีค่าความแน่นเนื้อไม่แตกต่างกับตัวอย่างที่เติมแคลเซียมร่วมกับเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 90 วัน

Sriwimon and Boonsupthip (2010) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยใช้มะม่วงสุกบางส่วนเนื่องจากมีโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถทนต่อความเสียหายจากการเกิดผลึกน้ำแข็งมากกว่ามะม่วงสุก และใช้กระบวนการแพร่กระจายภายใต้สุญญากาศด้วยน้ำมะม่วงผสมกับน้ำตาลความเข้มข้นสูง (ประกอบด้วยซูโครส กลูโคส และฟรุกโตส ในอัตราส่วน 11: 2: 3.5) ก่อนการแช่เยือกแข็ง เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านกลิ่นรส และเนื้อสัมผัสของมะม่วง พบว่าภายหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายมะม่วงสุกบางส่วนมีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัส และค่าความแน่นเนื้อสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายลดลงเมื่อเทียบกับมะม่วงสุก นอกจากนี้ยังศึกษาผลของกระบวนการแช่เยือกแข็ง 3 วิธี ได้แก่ การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจีนิก (cryogenic) การแช่เยือกแข็งแบบ jet-impingement และการแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเย็น (air-blast freezer) ที่มีอัตราการแช่เยือกแข็งต่างกัน คือ 8, 7 และ 5 องศาเซลเซียส/นาทิตามลำดับ พบว่าการแช่เยือกแข็งแบบเร็วด้วยเครื่องไครโอจีนิกทำให้มะม่วงรักษาคุณภาพด้านสี และเนื้อสัมผัสไว้ได้มากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบ jet-impingement และการแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเย็นที่มีอัตราการแช่เยือกแข็งต่ำกว่าตามลำดับ

Reno *et al.* (2011) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็งโดยนำสตรอเบอรี่มาผ่านกระบวนการแพร่กระจายภายใต้สุญญากาศ (ความดัน 88.4 และ 50.5 กิโลปาสกาล) ด้วยน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 20% ที่เติมเพกทิน (ความเข้มข้น 0, 1.5 และ 3%) และแคลเซียมคลอไรด์ (ความเข้มข้น 0, 3 และ 6%) ผลการทดลองพบว่าการเติมเพกทินความเข้มข้น 3% และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 6% ในน้ำตาลกลูโคส ส่งผลดีต่อคุณภาพของสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็งมากที่สุด โดยทำให้การสูญเสียความแน่นเนื้อ และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของสตรอเบอรี่ลดลง และเมื่อศึกษาผลของโครงสร้างระดับจุลภาคของสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็งพบว่าปริมาณเพกทินที่เพิ่มขึ้นมีศักยภาพในการป้องกันความเสียหายของเซลล์ต่อการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากการใช้เพกทินความเข้มข้นสูงทำให้การเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งบริเวณช่องว่างระหว่างเซลล์เกิดขึ้นช้าลง ในขณะที่ความดันไม่มีผลต่อคุณภาพของสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็ง

Sirijariyawat *et al.* (2012) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งโดยนำมะม่วงมาผ่านกระบวนการแพร่กระจายภายใต้สุญญากาศ (ความดัน 0, 10 และ 50 กิโลปาสกาล) ด้วยเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส 0.001 U/มิลลิลิตร และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1% ก่อนการแช่เยือกแข็ง จากผลการทดลองพบว่าการแช่มะม่วงในสารละลาย

เอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส ร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์ ทั้งที่ความดัน 50 กิโลปาสคาล หรือที่ความดันบรรยากาศก่อนการแช่เยือกแข็ง สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัส และรักษาโครงสร้างจุลภาคของมะม่วงแช่เยือกแข็งได้

9.3 การไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรด

Powell *et al.* (1982) ศึกษาการไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรด โดยนำซีตรัสเพกทิน แอปเปิ้ลเพกทิน และเพกทินจากดอกทานตะวันมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทำให้เป็นกลาง แล้วทำการหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนที่ละลายได้ กับส่วนที่ไม่ละลายออกจากกัน ทำการไดอะไลซิส และทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จากนั้นนำเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ทั้งส่วนที่ละลายได้ และส่วนที่ไม่ละลายมาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟีแบบคอลัมน์เพื่อแยกชนิดของสารตามขนาดโมเลกุล พบว่าโครมาโตแกรมของส่วนที่ละลายได้แสดงให้เห็นพีกเดี่ยวที่มีลักษณะสูงแหลม บ่งชี้ถึงช่วงน้ำหนักโมเลกุลที่แคบลงของเพกทินหลังผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด ซึ่งพีกที่พบนี้ คือ พีกของเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดจนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทำให้สามารถละลายได้ ในขณะที่ผลจากโครมาโตแกรมของส่วนที่ไม่ละลาย พบพีก 2 พีก คือ พีกที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกับพีกที่พบในส่วนที่ละลายได้ โดยเป็นพีกที่แหลมสูงเหมือนกัน ซึ่งพีกนี้ คือ พีกของเพกทินที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดจนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำแต่ไม่สามารถละลายได้ และอีกพีกหนึ่ง คือ พีกของเพกทินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ซึ่งได้แก่ ส่วนของโครงสร้างเพกทินที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน โดยที่พีกนี้มีความสูงน้อยกว่าพีกแรก แสดงว่าหลังผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด เพกทินส่วนที่ไม่ละลายประกอบไปด้วยเพกทินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และเพกทินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยเพกทินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีสัดส่วนน้อยกว่าเพกทินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

Thibault *et al.* (1993) ศึกษาการไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรด โดยใช้เพกทิน 3 ชนิด ได้แก่ แอปเปิ้ลเพกทิน ซีตรัสเพกทิน และเพกทินจากหัวบีท นำเพกทินมาผ่านกระบวนการสลายพันธะเอสเทอร์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 24 และ 72 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าหลังการไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรด เพกทินมีความหนืดลดลง โดยสามารถแบ่งอัตราการลดลงของความหนืดได้เป็น 2 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 เพกทินมีความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรดเป็นเวลา 10 ชั่วโมง

ซึ่งสันนิษฐานว่าความหนืดที่ลดลงอย่างรวดเร็วของเพกตินในระยะเวลา 10 ชั่วโมงแรกนี้ เกิดจากการที่กรดไปตัดพันธะที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของแรมโนส (L-rhamnose) และกรดกาแล็กทูโรนิก ในขณะที่ขั้นที่ 2 คือ อัตราการลดลงของความหนืดของเพกตินจะเกิดขึ้นช้าลง โดยเกิดขึ้นเมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมงเป็นต้นไป คาดว่าการลดลงของความหนืดของเพกตินในระยะนี้ เกิดจากการที่กรดไปตัดพันธะระหว่างโมเลกุลของกรดกาแล็กทูโรนิก ผลการศึกษา نشانักโมเลกุลของเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดพบว่าเพกตินทั้ง 3 ชนิด มี نشانักโมเลกุลลดลง โดยแอปเปิ้ลเพกติน ซิตรัสเพกติน และเพกตินจากหัวบีท มี نشانักโมเลกุลลดลงจาก 89, 120 และ 266 กิโลดาลตัน เหลือเพียง 21, 24 และ 19 กิโลดาลตัน ตามลำดับ เมื่อถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่ง نشانักโมเลกุลที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับความยาวของสายไฮโมกาแล็กทูโรแนนที่ลดลงเหลือประมาณ 72-100 โมเลกุลของกรดกาแล็กทูโรนิก

Kravtchenko *et al.* (1993) ศึกษาการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรด โดยนำเลมอนเพกติน และแอปเปิ้ลเพกตินมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไตรฟลูออโรอะซีติกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ผลการศึกษานำ نشانักโมเลกุลของเพกตินด้วยเครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวแรงดันสูงแบบแยกตามขนาด พบว่าเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดเพิ่มมากขึ้น เพกตินจะมี نشانักโมเลกุลลดลง อีกทั้งยังพบว่าหลังจากเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นเวลานาน 5 - 16 ชั่วโมง จะปรากฏพีคของเพกตินเพิ่มขึ้นอีกพีคหนึ่งในโครมาโตแกรม ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นพีคของไฮโมกาแล็กทูโรแนน โดยพบว่าเมื่อระยะเวลาในการไฮโดรไลซ์นานขึ้นสายพอลิเมอร์ของไฮโมกาแล็กทูโรแนนจะค่อยๆ ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดจนกลายเป็นโอลิโกเมอร์ (oligomer) ที่มี نشانักโมเลกุลลดลง ซึ่งคาดว่ากรสลายตัวของไฮโมกาแล็กทูโรแนนนี้เกิดจากการถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดที่สลายปลายของสายพอลิเมอร์เท่านั้น

Garna *et al.* (2006) ศึกษาผลของการใช้กรดไฮโดรไลซ์แอปเปิ้ลเพกตินต่อปริมาณการถูกปลดปล่อยของกรดกาแล็กทูโรนิกจากสายเพกติน โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรด อิทธิพลของชนิดกรด และอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์เพกติน ผลการศึกษาคืออิทธิพลของความเข้มข้นของกรด โดยการใช้กรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.2, 1 และ 2 โมลาร์ ไฮโดรไลซ์เพกตินที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้กรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นสูงในการไฮโดรไลซ์เพกตินทำให้ปริมาณของกรดกาแล็กทูโรนิกที่ถูกปลดปล่อยมาจากสายเพกตินมีปริมาณสูงกว่าการใช้กรดความเข้มข้นต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยสภาวะที่รุนแรงจากการใช้กรดซัลฟิวริกร่วมกับอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการ

สลายตัวของกรดกาแล็กทูโรนิกเมื่อถูกไฮโดรไลซ์ด้วยระยะเวลาสั้น ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดของกรดด้วยการใช้กรด 3 ชนิด ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดไตรฟลูออโรอะซีติก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ไฮโดรไลซ์เพกตินที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริกไฮโดรไลซ์เพกตินทำให้ปริมาณกรดกาแล็กทูโรนิกถูกปลดปล่อยออกมาจากสายเพกตินสูงที่สุด คือ มีปริมาณกรดกาแล็กทูโรนิกที่ถูกปลดปล่อยออกมา 40% น้ำหนักโดยน้ำหนักเมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ไป 5 ชั่วโมง ในขณะที่เพกตินที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก และกรดไตรฟลูออโรอะซีติก เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีปริมาณกรดกาแล็กทูโรนิกที่ถูกปลดปล่อยออกมาเพียง 30% น้ำหนักโดยน้ำหนัก และยังพบการสลายตัวของกรดกาแล็กทูโรนิกเมื่อถูกไฮโดรไลซ์ด้วยระยะเวลาสั้น โดยที่ใช้กรดซัลฟิวริกส่งผลให้เกิดการสลายตัวของกรดกาแล็กทูโรนิกมากที่สุด รองลงมาได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก และกรดไตรฟลูออโรอะซีติก ตามลำดับ และจากผลของการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์เพกติน โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.2, 1 และ 2 โมลาร์ ไฮโดรไลซ์เพกตินที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการไฮโดรไลซ์เพกตินที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจากการทดลองก่อนหน้านี้ (ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรด) พบว่าการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสไม่ทำให้เกิดการสลายตัวของกรดกาแล็กทูโรนิก ถึงแม้ว่าจะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นระยะเวลาสั้นถึง 72 ชั่วโมง

Kupchik *et al.* (2006) ศึกษาการไฮโดรไลซ์เพกตินเพื่อเพิ่มความสามารถในการจับไอออนโลหะหนักของเพกติน โดยไฮโดรไลซ์แอปเปิ้ลเพกตินที่มีระดับเอสเทอร์ฟิเคชัน 78.5% ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.37 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเพกตินที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดมีระดับเอสเทอร์ฟิเคชันลดลงเหลือ 34.4% เมื่อทดสอบความสามารถในการจับไอออนโลหะหนักของเพกติน พบว่าเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดมีความสามารถในการจับไอออนโลหะหนัก ได้แก่ ไอออนของตะกั่ว (Pb^{2+}) และไอออนของคอปเปอร์ (Cu^{2+}) ดีขึ้น ดังนั้นวิธีการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดจึงสามารถใช้เตรียมเพกตินให้มีระดับเอสเทอร์ฟิเคชันต่ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางเภสัชศาสตร์เพื่อช่วยขจัดสารพิษในร่างกายเนื่องจากความสามารถในการจับไอออนโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นของเพกติน

Round *et al.* (2010) ศึกษาการไฮโดรไลซ์เพกตินที่สกัดจากมะเขือเทศด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 8, 24 และ 72 ชั่วโมง โดยศึกษาโครงสร้างของเพกตินที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (atomic force microscope) ผลการทดลองพบว่าตัวอย่างเพกตินซึ่งเดิมประกอบไปด้วยส่วนของ

ไฮโมกาแล็กทูโรแนนที่เป็นโซตรง และโซ่กิ่ง ส่วนของไฮโมกาแล็กทูโรแนนที่พันตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และส่วนของแรมโนกาแล็กทูโรแนน-1 ที่พันตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ซับซ้อนนั้นมีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปหลังถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรด โดยพบว่าการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนั้นทำให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลน้ำตาลที่เกาะอยู่ที่สายของเพกทิน รวมทั้งยังทำให้เกิดการสลายตัวของส่วนของแรมโนกาแล็กทูโรแนน-1 ที่พันตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ซับซ้อน ในขณะที่ส่วนของไฮโมกาแล็กทูโรแนนยังคงอยู่ และหลังจากผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง พบว่ามีโมเลกุลของน้ำตาลอะราบินอส กาแล็กโทส และแรมโนสเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย และโครงสร้างของเพกทินที่เหลืออยู่ ประกอบไปด้วยไฮโมกาแล็กทูโรแนน และส่วนของไฮโมกาแล็กทูโรแนนที่พันตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเท่านั้น เมื่อพิจารณาน้ำหนักโมเลกุลของเพกทินพบว่าหลังผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด เพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง โดยส่วนที่เป็นพอลิเมอร์สายยาวของเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงจาก 76.5 เป็น 40.5 กิโลดาลตัน ในขณะที่ส่วนของเพกทินที่พันตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ซับซ้อนนั้นมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงจาก 3,740 เป็น 543 กิโลดาลตัน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เบอร์ 4 (*Mangifera indica* Linn. cv. Nam Dok Mai) ที่ได้จากตลาดสี่มุมเมือง จังหวัดปทุมธานี โดยมะม่วงที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 1 เป็นมะม่วงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2555 และมะม่วงที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 3 เป็นมะม่วงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2556

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

2.1.1 เครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิกแบบพ่นไอไนโตรเจนเหลว (Cryogenic cabinet freezer รุ่น Mini Batch Freezer 1000L, Bangkok Industrial Gas Co., Ltd.)

2.1.2 ตู้แช่เยือกแข็ง (Chest freezer, Sanyo รุ่น SF-C1495, Japan)

2.1.3 สายเทอร์โมคอปเปิล (Thermocouple) และเครื่องบันทึกข้อมูล (Data-logger)

2.1.4 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, Memmert GmbH and Co.Kg รุ่น WB22, Germany)

2.1.5 ถุงพลาสติกไนลอน (Nylon/Linear low density polyethylene bags, NY/LLDPE) ความหนา 70 ไมครอน ขนาด 100 x 150 มิลลิเมตร

2.1.6 ถุงไดอะไลซิส (Regenerated Cellulose Tubular Membrane, CelluSep, Membrane Filtration Products, Inc., Texas, USA)

2.1.7 เครื่องปิดผนึกถุง (Impulse sealer รุ่น PFS-300)

2.1.8 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (Sartorius รุ่น BP 3100S, Germany)

2.1.9 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Ohaus รุ่น AP210-0, Switzerland)

2.1.10 กล้องโฟม

2.1.11 ถุงซิปล็อค

2.1.12 กระดาษซับ

2.1.13 อุปกรณ์เครื่องครัว (มีด, เขียง, ภาชนะสเตนเลส ฯลฯ)

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ

2.2.1 เครื่องรีแฟร็กโตมิเตอร์ (Pocket digital refractometer, Atogo รุ่น PAL-1, Japan)

2.2.2 เครื่องปั่นผสม (Commercial Blender, Waring รุ่น HGB2WT, USA)

2.2.3 เครื่องผสมสารละลาย (Vortex, Scientific Industries, Inc. รุ่น G-560E, USA)

2.2.4 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, Memmert GmbH and Co.Kg รุ่น WB22, Germany)

2.2.5 เครื่องเขย่าของอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath shaker Memmert GmbH and Co.Kg รุ่น SV1422, Germany)

2.2.6 เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer with heating, Ika รุ่น C-MAG HS7, Germany) และแท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)

2.2.7 ตู้ควบคุมอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Incubator, Memmert รุ่น IPP 400, Germany)

2.2.8 เครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิต่ำ (Refrigerated high speed centrifuge, Thermo Scientific, Sorvall รุ่น Stratos, Germany)

2.2.9 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer, Thermo Electron Corporation รุ่น GENESYS™10, USA)

2.2.10 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, Stable Micro System รุ่น TA.XTplus, UK)

2.2.11 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot Air Oven, Memmert รุ่น ULE500, Germany)

2.2.12 เครื่องตัดตัวอย่าง (Ultramicrotome, Leica Microsystems (SEA) Pte Ltd. รุ่น Leica Ultracut UCT, Singapore)

2.2.13 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (Light microscope, Leica Microsystems Inc. รุ่น Leica DME, USA)

2.2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, JEOL รุ่น JMS-5600LV, Japan)

2.2.15 เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-dryer, Martin Christ รุ่น Gamma 2-16 LSC, Germany)

2.2.16 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC, Pyris-1, perkin Elmer, Norwalk, CT, USA)

2.2.17 โครมาโตกราฟีของเหลวแรงดันสูงแบบแยกตามขนาด (High Performance Size Exclusion Chromatography; HPSEC)

2.2.17.1 คอลัมน์ปกป้อง (Shodex OH SB-G guard column, Shimadzu, Japan)

2.2.17.2 คอลัมน์ที่ 1 (Shodex OHpak SB-806M HQ column, Shimadzu, Japan)

2.2.17.3 คอลัมน์ที่ 2 (Shodex OHpak SB-804 HQ column, Shimadzu, Japan)

2.2.18 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer; FT-IR, Bruker รุ่น Tensor 27, Germany)

2.2.19 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Eng Lab Inc. รุ่น DV-III Programmable Rheometer, USA)

2.2.20 เครื่องวัดพีเอช (pH meter, Thermo Fisher Scientific Inc. รุ่น Orion 2-star, USA)

2.2.21 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (Sartorius รุ่น BP 3100S, Germany)

2.2.22 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Ohaus รุ่น AP210-0, Switzerland)

2.2.23 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3. สารเคมี

3.1 สารเคมีสำหรับเตรียมตัวอย่างมะม่วงก่อนการแช่เยือกแข็ง

3.1.1 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, Food grade, Nok Insi, Thailand)

3.1.2 แคลเซียมแลคเตท (Calcium lactate, Food grade, PURAC, Thailand)

3.1.3 เพกทินทางการค้า (Commercial apple pectin, Analytical grade, Spectrum, USA)

3.1.4 น้ำตาลซูโครส (Sucrose, Food grade, Mitr Phol, Thailand)

3.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้

3.2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, Analytical grade, Merck, Germany)

3.2.2 ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein, Ajax Finechem, Australia)

3.3 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณเพกทิน

3.3.1 กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 95-97% (Sulfuric acid, Analytical grade, Merck, Germany)

3.3.2 เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 95 และ 70% (Ethanol, Analytical grade, Merck, Germany)

3.3.3 อะซีโตน (Acetone, Analytical grade, Merck, Germany)

3.3.4 กรดกาแล็กทูโรนิก (D-+)-Galacturonic acid, Analytical grade, Sigma-Aldrich, Slovakia)

3.3.5 โซเดียมเตตระโบเรต (Sodium tetraborate, Analytical grade, Ajax Finechem, Australia)

3.3.6 3-ฟีนิล-ฟีนอล 85% (3-phenyl-phenol, Analytical grade, Sigma-Aldrich, Germany)

3.3.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, Analytical grade, Merck, Germany)

3.4 สารเคมีสำหรับไฮโดรไลซ์เพกทิน

3.4.1 เพกทินทางการค้า (Commercial apple pectin, Analytical grade, Spectrum, USA)

3.4.2 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, Analytical grade, Merck, Germany)

3.4.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, Analytical grade, Merck, Germany)

3.5 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของเพกทิน

3.5.1 โซเดียมไนเตรต (Sodium nitrate, Analytical grade, Ajax Finechem Pty Ltd., Australia)

3.5.2 โซเดียมเอไซด์ (Sodium azide, Analytical grade, Ajax Finechem Pty Ltd., Australia)

3.5.3 เดกซ์แทรนมาตรฐาน น้ำหนักโมเลกุล 50, 150, 270 และ 670 กิโลดาลตัน (Standard dextran, Analytical standard grade, Sigma-Aldrich, USA)

3.6 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ระดับเอสเทอริฟิเคชันของเพกทิน

3.6.1 กรดโพลีกาแล็กทูโรนิก (Polygalacturonic acid, Analytical grade, Sigma-Aldrich, USA)

3.6.2 เพกทินมาตรฐาน ระดับเอสเทอริฟิเคชัน 26, 62 และ 92% (Pectin-esterified potassium salt from citrus fruit, Analytical grade, Sigma-Aldrich, USA)

4. เครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณ และวิเคราะห์ผลทางสถิติ

4.1 โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 19

วิธีการ

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 3 ตอน โดยมีวิธีการในแต่ละตอน ดังนี้

ตอนที่ 1: ศึกษาผลของระดับความสุก และการเติมแคลเซียมแลคเตท และน้ำตาลซูโครส ต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง

1.1 การคัดเลือกวัตถุดิบ

ซื้อมะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 ในระยะสุก และสุกบางส่วน จากตลาดสี่มุมเมือง จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเป็นมะม่วงที่ป้อนมาจากร้าน คัดเลือกให้มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยมีน้ำหนักผลอยู่ในช่วง 350 - 400 กรัม จัดระดับความสุกของมะม่วงโดยพิจารณาจากสีผิว และเนื้อสัมผัสของมะม่วง มะม่วงสุกบางส่วนมีผิวสีเหลืองประมาณ 75% และมะม่วงสุกมีผิวสีเหลืองประมาณ 90% ของสีผิวมะม่วงทั้งหมด (ดังภาพที่แสดงในภาคผนวก ข1) เนื้อสัมผัสของมะม่วงสุกบางส่วนนิ่มเล็กน้อย เมื่อใช้นิ้วกดที่ผลแล้วทำให้เนื้อมะม่วงเกิดการยุบตัวเพียงเล็กน้อย ในขณะที่เนื้อสัมผัสของมะม่วงสุกนิ่ม เมื่อใช้นิ้วกดที่ผลแล้วทำให้เนื้อมะม่วงเกิดการยุบตัว มะม่วงทุกผลจะต้องผ่านการทดสอบว่ามีการเจริญเติบโตเต็มที่ (maturity) โดยนำมะม่วงที่คัดเลือกแล้วมาลอยจมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) เลือกมะม่วงที่จมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2% มาใช้ในการทดลอง (Rimkeeree, 2012)

1.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

นำมะม่วงมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก ตัดเนื้อมะม่วงบริเวณหัวและท้ายของผลออก ใช้เฉพาะเนื้อมะม่วงบริเวณตรงกลางของผลมาศึกษา เพื่อความสม่ำเสมอของตัวอย่าง ตัดแบ่งมะม่วงให้เป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $1.5 \times 1.5 \times 1.5$ เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่มีการผลิตเป็นมะม่วงแช่เยือกแข็งในทางการค้า

1.3 การแช่ตัวอย่างในสารละลายแคลเซียมแลคเตท และน้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็ง

นำมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกที่หั่นเป็นรูปทรงลูกบาศก์ตามข้อ 1.2 แช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 1% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) และสารละลายแคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 1% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ผสมกับสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 50% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (อัตราส่วนเนื้อผลไม้ต่อสารละลายเท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก) จากนั้นนำชิ้นมะม่วงออกจากสารละลายและซับสารละลายส่วนเกินบริเวณผิวด้วยกระดาษซับเป็นเวลา 5 นาที ใช้ตัวอย่างมะม่วงที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์เป็นตัวอย่างควบคุม

1.4 การแช่เยือกแข็ง

นำมะม่วงที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างตามข้อ 1.2 – 1.3 มาบรรจุในถุงไนลอนชนิด NY/LLDPE ความหนา 70 ไมครอน ขนาด 100×150 มิลลิเมตร โดยบรรจุถุงละ 8 ชิ้น ปิดผนึก นำมะม่วงที่บรรจุใส่ถุงไปแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 14 วัน

1.5 การทำละลาย

นำตัวอย่างมะม่วงมาละลายน้ำแข็ง โดยนำตัวอย่างมะม่วงแช่เยือกแข็งมาวางในตู้ควบคุมอุณหภูมิต่ำที่ 4 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอุณหภูมิตรงกลางของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเป็น 0 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้เวลาในการทำละลายทั้งหมด 5 ชั่วโมง

1.6 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AOAC (2000)

1.7 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ โดยใช้เครื่องดิจิตอลรีแฟร็กโตมิเตอร์

1.8 การวิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ ตามวิธีการของ AOAC (2000)

1.9 การตรวจวัดเนื้อสัมผัส

ตรวจวัดเนื้อสัมผัสของตัวอย่างมะม่วงขนาด $1.5 \times 1.5 \times 1.5$ เซนติเมตร ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) ใช้หัววัด P/36R เพื่อวัดค่าแรงจากการกดตัวอย่าง (compression test) โดยกำหนดสภาวะในการวัด 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 ซ้ำ และหาค่าเฉลี่ย

1.10 การวิเคราะห์ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง ตามวิธีการของ Lowithun and Charoenrein (2009)

1.11 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วง

ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (light microscope) โดยตัดตัวอย่างมะม่วงบริเวณตรงกลางขึ้นให้ได้ขนาด $1 \times 1 \times 2$ มิลลิเมตร ตรึงตัวอย่างด้วยสารละลายกลูตาออลดีไฮด์ (glutaraldehyde) ความเข้มข้น 2.5% ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (phosphate buffer) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (พีเอช 7.2) ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน หลังจากนั้นล้างด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ แล้วตรึงตัวอย่างอีกครั้งด้วยสารละลายออสเมียมเตตรอกไซด์ (osmium tetroxide) ความเข้มข้น 2% ที่อุณหภูมิห้อง ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง และดึงน้ำออกจากตัวอย่างด้วยสารละลายอะซิโตนจากความเข้มข้นต่ำไปสูง (30-100%) จากนั้นฝังตัวอย่างในพลาสติกบลิค Spurr's resin ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ตัดตัวอย่างโดยใช้อัลตราไมโครโทม (ultramicrotome) ให้มีความหนา 1.5 ไมโครเมตร และย้อมสีตัวอย่างด้วยสารโทลูอิดีนบลู (toluidine blue) ความเข้มข้น 1% แล้วตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงด้วยกล้องจุลทรรศน์

1.12 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

1.12.1 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ด้านเนื้อสัมผัส) โดยประเมินความแน่นเนื้อของมะม่วงด้วยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ (Quantitative Descriptive Analysis; QDA) ใช้ระดับคะแนนความแน่นเนื้อ 3 ระดับ (นิ่มมาก – แน่นเนื้อมาก) ทดสอบโดยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 7 คน รายละเอียดการฝึกฝน และแบบประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสแสดงในภาคผนวก ง

1.12.2 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสตามความชอบ (ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม) โดยใช้แบบประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสแบบสเกลความชอบ 9 คะแนน หรือ 9-Point Hedonic Scale (ชอบมากที่สุด – ไม่ชอบมากที่สุด) ทดสอบโดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน

ตอนที่ 2: ศึกษาผลของระยะเวลาการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดต่อโครงสร้างระดับโมเลกุล ระดับเอสเทอริฟิเคชัน อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และความหนืดของเพกติน

2.1 การไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรด

นำเพกตินทางการค้า (commercial apple pectin) 3.6 กรัม มาแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 225 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (water bath shaker) เขย่ากวนสารละลายตลอดเวลาด้วยความแรงระดับปานกลาง (ระดับ 5) เป็นเวลา 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง แล้วนำมาทำให้เป็นกลาง (พีเอช 7) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ จากนั้นเทสารละลายเพกตินใส่ลงในถุงไดอะไลซิสที่มี molecular weight cutoff เท่ากับ 12,000 – 14,000 ดาลตัน เพื่อทำการไดอะไลซิสสารละลายเพกตินในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารละลายเพกตินที่ผ่านการไดอะไลซิสไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ความดัน 0.055 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 58 ชั่วโมง

2.2 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (average molecular weight)

วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเพกตินด้วยเครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวแรงดันสูงแบบแยกตามขนาด (High Performance Size Exclusion Chromatography; HPSEC) ซึ่งประกอบด้วย บั๊ม (Waters 600) เครื่องขจัดแก๊ส (degasser) เครื่องฉีดสารตัวอย่าง (injector) และเครื่องตรวจชนิดของสารแบบวัดการหักเหของแสง (differential refractive index detector, Waters 410) โดยนำตัวอย่างเพกติน 5 มิลลิกรัม ละลายในสารละลายโซเดียมไนเตรดความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ที่มีสารละลายโซเดียมเฮกซะดีคความเข้มข้น 0.02% (น้ำหนักโดยปริมาตร) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร กรองสารละลายผ่านแผ่นกรองสารละลายชนิดไนลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมครอน ก่อนฉีดสารละลายเพกตินเข้าคอลัมน์ ซึ่งประกอบด้วย คอลัมน์ปกป้อง (guard column; Shodex OH SB-G) คอลัมน์ที่ 1 (Shodex OHpak SB-806M HQ) และคอลัมน์ที่ 2 (Shodex OHpak SB-804 HQ) โดยใช้อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 0.6 มิลลิลิตร/นาที วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่างเพกตินโดยเปรียบเทียบเวลาที่สารอยู่ในคอลัมน์ (retention time) กับกราฟมาตรฐานของเดกซ์แทรนมาตรฐานที่มีน้ำหนักโมเลกุล 50, 150, 270 และ 670 กิโลดาลตัน (ภาพผนวก ข3)

2.3 การวิเคราะห์ระดับเอสเทอริฟิเคชัน (degree of esterification)

นำผงเพกตินใส่ลงไปในช่องสำหรับใส่ตัวอย่างของเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR) โดยใช้วิธี Attenuated Total Reflectance (ATR) ตั้งค่าความละเอียด (resolution) เท่ากับ 4 cm^{-1} วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเพกตินในช่วงความยาวคลื่น 4,000 – 500 cm^{-1} ด้วยโปรแกรม OPUS Data Collection Program เวอร์ชัน 6.5 แล้วหาอัตราส่วนของพื้นที่ใต้พีคที่ความยาวคลื่น $1730/(1730+1600)$ cm^{-1} เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดโพลิกลาลิกแอตทริก และเพกตินมาตรฐานที่มีระดับเอสเทอริฟิเคชันเท่ากับ 0, 26, 62 และ 92% (ภาพผนวก ข4) จะได้ระดับเอสเทอริฟิเคชันของตัวอย่างเพกติน

2.4 การวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature; $T_{g, onset}$)

นำตัวอย่างเพกทินก่อนและหลังการไฮโดรไลส์ 5 มิลลิกรัม ใส่ลงในถ้วยใส่ตัวอย่างชนิดอลูมิเนียมที่ชั่งน้ำหนักแล้ว (ยังไม่ปิดฝา) วางตัวอย่างไว้ในเดซิเคเตอร์ที่บรรจุสารละลายอิมมัลชันของแมกนีเซียมไนเตรต ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ 52.9% เป็นเวลา 6 วัน จากนั้นนำตัวอย่างออกจากเดซิเคเตอร์ และปิดฝาทันที นำตัวอย่างไปตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC) เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันในตำแหน่งอุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของตัวอย่าง ($T_{g, onset}$) โดยใช้ถ้วยอลูมิเนียมเปล่าเป็นตัวอย่างอ้างอิง สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ลดอุณหภูมิจาก 25 ถึง -60 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 20 องศาเซลเซียส/นาที พักที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที แล้วให้ความร้อนจนตัวอย่างมีอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 5 องศาเซลเซียส/นาที จากนั้นรันสแกนที่ 2 ซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

2.5 การวิเคราะห์ความหนืด (apparent viscosity)

วิเคราะห์ความหนืดของสารละลายเพกทินความเข้มข้น 5% (น้ำหนักโดยปริมาตร) ด้วยเครื่องวัดความหนืด (Brookfield viscometer รุ่น DV-III Programmable Rheometer) หัววัด ULA (spindle No. 00) ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส

2.6 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค

ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของเพกทินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) นำตัวอย่างมาติดบนแท่นวางตัวอย่าง (stub) ด้วยเทปคาร์บอน เก็บตัวอย่างไว้ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 25 วัน เพื่อให้ตัวอย่างแห้งสนิท จากนั้นนำตัวอย่างมาเคลือบทองคำก่อนตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของเพกทินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (กำลังขยายระบุในภาพ)

ตอนที่ 3: ศึกษาผลของการใช้มะม่วงสุกบางส่วน และการเติมแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลชูโครส เพกทิน และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง

3.1 การคัดเลือกวัตถุดิบ ตามวิธีการในข้อ 1.1

3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง ตามวิธีการในข้อ 1.2

3.3 การแช่ตัวอย่างในสารละลายแคลเซียมแลคเตท เพกทิน และน้ำตาลชูโครสก่อนการแช่เยือกแข็ง

นำมะม่วงสุกบางส่วนที่หั่นเป็นรูปทรงลูกบาศก์ตามข้อ 3.2 มาแช่ในสารละลายต่าง ๆ ดังนี้

3.3.1 แช่มะม่วงในสารละลายแคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 1% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ผสมกับสารละลายน้ำตาลชูโครสความเข้มข้น 50% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.2 แช่มะม่วงในสารละลายเพกทินทางการค้าความเข้มข้น 4.9% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างมะม่วงมาแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 1% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ผสมกับสารละลายน้ำตาลชูโครสความเข้มข้น 50% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.3 แช่มะม่วงในสารละลายเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง ความเข้มข้น 4.9% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างมะม่วงมาแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 1% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ผสมกับสารละลายน้ำตาลชูโครสความเข้มข้น 50% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.4 แช่มะม่วงในสารละลายเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง ความเข้มข้น 4.9% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างมะม่วงมาแช่ใน

สารละลายแคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 1% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ผสมกับสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 50% (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

โดยทำการแช่ตัวอย่างมะม่วงที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนเนื้อผลไม้ต่อสารละลายเท่ากับ 1:2.5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำชิ้นมะม่วงออกจากสารละลายและซับสารละลายส่วนเกินบริเวณผิวด้วยกระดาษซับเป็นเวลา 5 นาที ใช้ตัวอย่างมะม่วงสุกบางส่วนที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์เป็นตัวอย่างควบคุม และใช้ตัวอย่างมะม่วงสุกที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์เป็นตัวอย่างอ้างอิง (Reference) ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี และกายภาพของมะม่วง

3.4 การแช่เยือกแข็ง

นำมะม่วงที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างตามข้อ 3.2 – 3.3 มาบรรจุในถุงไนลอนชนิด NY/LLDPE ความหนา 70 ไมครอน ขนาด 100 x 150 มิลลิเมตร โดยบรรจุถุงละ 7 ชิ้น ปิดผนึก นำมะม่วงที่บรรจุใส่ถุงไปแช่เยือกแข็ง ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก โดยลดอุณหภูมิของเครื่องไครโอจินิกเป็น -80 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งอุณหภูมิตรงกลางของตัวอย่างลดลงถึง -20 องศาเซลเซียส ติดตามและวัดอุณหภูมิของตัวอย่างในระหว่างการแช่เยือกแข็งด้วยการนำสายเทอร์โมคอปเปิล (thermocouple) ที่ต่ออยู่กับเครื่องบันทึกข้อมูล (data-logger) มาเสียบกับตัวอย่างมะม่วง โดยให้อยู่กึ่งกลางของตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างมาเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 14 และ 150 วัน

3.5 การทำละลาย ตามวิธีการในข้อ 1.5

3.6 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AOAC (2000)

3.7 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ ตามวิธีการในข้อ 1.7

3.8 การวิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ ตามวิธีการของ AOAC (2000)

3.9 การตรวจวัดเนื้อสัมผัส ตามวิธีการในข้อ 1.9

3.10 การวิเคราะห์ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง ตามวิธีการของ Lowithun and Charoenrein (2009)

3.11 การสกัด และวิเคราะห์เพกทินในชิ้นตัวอย่าง

3.11.1 การสกัด

3.11.1.1 การสกัดของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (alcohol insoluble solids; AIS) ดัดแปลงจากวิธีการของ McFeeters and Armstrong (1984) โดยนำตัวอย่างมะม่วงหนัก 40 กรัม บดผสมกับสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 95% ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องปั่นเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำมารองผ่านกระดาษกรอง Whatman no.1 ชะด้วยสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 70% ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ล้างด้วยสารละลายอะซิโตนปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำของแข็งส่วนที่กรองได้ไปอบให้แห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก AIS

3.11.1.2 เพกทินที่ละลายน้ำได้ (water soluble pectin; WSP) ดัดแปลงจากวิธีการของ Majumder and Mazumdar (2002) ; Vicente *et al.* (2007) นำ AIS 0.05 กรัม (ที่ได้จากข้อ 3.11.1.1) ใส่ในหลอดหมุนเหวี่ยง (centrifuge tube) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร กวนผสมด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 30 นาที นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 6000 xg ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที กรองส่วนใสเก็บไว้ นำตะกอนเดิมมาเติมน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร ทำซ้ำจนครบ 3 ครั้ง ปรับปริมาตรส่วนใสด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ตามวิธีการในข้อ 3.11.2

3.11.2 การวิเคราะห์ปริมาณเพกทิน

นำสารละลายตัวอย่างที่สกัดได้ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร เติมลงในสารละลายโซเดียมเตตระโบเรต (ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น) ความเข้มข้น 0.0125 โมลาร์ ปริมาตร 4.8 มิลลิลิตร (หล่อเย็นไว้ในอ่างน้ำเย็น) เขย่าให้เข้ากัน บ่มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ทำให้เย็น เติมสารละลายเมตะไฮดรอกซีไดฟีนอล (ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5%) ความเข้มข้น 0.15% ปริมาตร 80 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น

520 นาโนเมตร เทียบกับ blank ของแต่ละตัวอย่าง โดย blank เตรียมได้จากสารละลายตัวอย่างที่ผ่านปฏิกิริยาเคมีด้วยวิธีเดียวกัน แต่ใช้สารละลายไฮโดรอกไซด์เข้มข้น 0.5% ปริมาตร 80 ไมโครลิตร แทนเมตะไฮโดรอกไซด์ฟีนอล เปลี่ยนค่า A_{520} ที่ได้เป็นปริมาณเพกทิน โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกรดกลูโคสที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0 – 100 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ซึ่งผ่านปฏิกิริยาเคมีด้วยวิธีเดียวกัน (ภาพผนวก ข2) ผลการวิเคราะห์แสดงในหน่วยไมโครกรัมของกรดกลูโคส/มิลลิกรัมของแห้งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์

3.12 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงแช่เยือกแข็ง ตามวิธีการในข้อ 1.11 (ตัวอย่างมะม่วงแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน)

5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทุกการทดลอง สิ่งทดลองละ 2 ซ้ำ ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างตัวอย่าง 2 กลุ่มด้วย t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างตัวอย่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไปด้วย one way - Analysis of Variance (one-way ANOVA) ทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 19

6. สถานที่ทำการทดลอง

6.1 ห้องปฏิบัติการและอาคารแปรรูปภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.2 หน่วยงานกล้องจุลทรรศน์ ฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. ระยะเวลาการทดลอง

ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2555 ถึง เดือนมีนาคม 2557

8. แหล่งทุนสนับสนุน

ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และทุนอุดหนุนวิจัย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการ
วิจัย (สกว.)



ผลและวิจารณ์

ผลงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ตอน ตอนที่ 1 ศึกษาผลของระดับความสุก และการเติมแคลเซียมแลคเตท และน้ำตาลซูโครสต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง ตอนที่ 2 ศึกษาผลของระยะเวลาการไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรดต่อโครงสร้างระดับโมเลกุล ระดับเอสเทอร์ฟิเคชัน อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และความหนืดของเพกทิน และตอนที่ 3 ศึกษาผลของการใช้มะม่วงสุกบางส่วน และการเติมแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลซูโครส เพกทิน และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยมีรายละเอียดแต่ละตอน ดังนี้

ตอนที่ 1: ศึกษาผลของระดับความสุก และการเติมแคลเซียมแลคเตท และน้ำตาลซูโครสต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง

ในตอนที่ 1 นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง ด้วยการศึกษาระดับความสุกของมะม่วงที่เหมาะสมต่อการแช่เยือกแข็งและทำละลาย โดยใช้มะม่วงที่มีระดับความสุก 2 ระดับ ได้แก่ มะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุก มาผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 1% หรือสารละลายแคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 1% ผสมสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 50% แล้วจึงนำไปแช่เยือกแข็งและทำละลาย ใช้ตัวอย่างมะม่วงที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์เป็นตัวอย่างควบคุม

1.1 คุณภาพของมะม่วงก่อนการแช่เยือกแข็งและทำละลาย

เมื่อนำตัวอย่างมะม่วงทั้งหมดก่อนการแช่เยือกแข็ง มาตรวจวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ และความแน่นเนื้อในแต่ละทรีตเมนต์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ และค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนการแช่เยือกแข็ง

คุณลักษณะ	ระดับความสุก	ทรีตเมนต์		
		ตัวอย่างควบคุม	แคลเซียม	แคลเซียม และซูโครส
ปริมาณความชื้น (%)	สุกบางส่วน	84.75 ^{aA} ±1.48	86.49 ^{aA} ±0.28	79.10 ^{bA} ±0.61
	สุก	82.99 ^{bA} ±0.13	87.21 ^{aA} ±0.23	78.58 ^{cA} ±0.69
ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (°บrix)	สุกบางส่วน	17.40 ^{bA} ±0.06	12.93 ^{cA} ±0.24	21.47 ^{aA} ±0.49
	สุก	17.18 ^{bA} ±0.66	13.32 ^{cA} ±1.77	22.17 ^{aA} ±0.19
ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (% ของกรดมาลิก)	สุกบางส่วน	0.62 ^{aA} ±0.04	0.51 ^{bA} ±0.00	0.64 ^{aA} ±0.00
	สุก	0.28 ^{aB} ±0.07	0.20 ^{aA} ±0.04	0.29 ^{aA} ±0.08
ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)	สุกบางส่วน	8.32 ^{bA} ±0.53	7.48 ^{bA} ±0.38	10.16 ^{aA} ±0.42
	สุก	5.30 ^{aB} ±0.65	4.63 ^{aA} ±0.74	6.47 ^{aB} ±0.45

หมายเหตุ ^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละทรีตเมนต์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{A-B} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระดับความสุกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

1.1.1 ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในทรีตเมนต์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในขณะที่ปริมาณความชื้นของมะม่วงสุก หรือมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยที่การแช่มะม่วงในสารละลายแคลเซียมแลคเตท ทำให้ตัวอย่างมะม่วงมีปริมาณความชื้นสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม เนื่องจากเกิดการออสโมซิสของน้ำจากสารละลายแคลเซียมแลคเตทเข้าสู่ภายในเนื้อมะม่วง ในขณะที่การแช่มะม่วงในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส ส่งผลให้ปริมาณความชื้นของมะม่วงลดลง เนื่องจากการลดปริมาณน้ำบางส่วนในชั้นมะม่วงด้วยวิธีการออสโมซิส ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สวนทางกันของน้ำ และตัวถูกละลายจากสารละลายออสโมติก โดยที่น้ำจะเคลื่อนที่ออกจากชั้นผลไม้เข้าสู่สารละลายออสโมติก ในขณะที่ตัวถูกละลาย (น้ำตาลซูโครส) จะเคลื่อนที่จากสารละลายออสโมติกเข้าสู่ชั้นผลไม้ นอกจากนี้ยังมีการเคลื่อนที่ของของแข็งที่ละลายน้ำได้ออกจากชั้นผลไม้เข้าสู่สารละลายออสโมติกอีกด้วย (Raoult-Wack, 1994)

1.1.2 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในทรีตเมนต์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในขณะที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของมะม่วงสุก หรือมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยที่การแช่มะม่วงในสารละลายแคลเซียมแลคเตท ส่งผลให้มะม่วงมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม เนื่องจากการออสโมซิสของน้ำจากสารละลายแคลเซียมแลคเตทเข้าสู่เนื้อมะม่วง และการเคลื่อนที่ของของแข็งที่ละลายน้ำได้ออกจากชั้นมะม่วงเข้าสู่สารละลายแคลเซียมแลคเตท ในขณะที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของมะม่วงที่แช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมกับน้ำตาลซูโครสมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม เนื่องจากผลของกระบวนการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีการออสโมซิสโดยใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสเข้มข้น

1.1.3 ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้

ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของมะม่วงสุกมีค่าน้อยกว่ามะม่วงสุกบางส่วนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เนื่องจากในระหว่างกระบวนการสุกกรดในผลไม้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการหายใจ (Medlicott and Thompson, 1985) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทลดลง เนื่องจากการออกซิเดชันของน้ำจากสารละลายแคลเซียมแลคเตทเข้าสู่เนื้อมะม่วง และการเคลื่อนที่ของกรดออกจากชั้นมะม่วง ในขณะที่มะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ซึ่งน่าจะเป็นเพราะการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีการออกซิเดชัน ทำให้น้ำออกซิเดชันออกจากชั้นมะม่วงพร้อมๆ กับการเคลื่อนที่ของกรดออกจากชั้นมะม่วง ส่งผลให้ความเข้มข้นของปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ในชั้นมะม่วงไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม

1.1.4 ค่าความแน่นเนื้อ

ค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกต่ำกว่าค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกบางส่วนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เนื่องจากในระหว่างกระบวนการสุกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลต่างๆ ภายในผนังเซลล์ โดยเพกทินบริเวณมิดเดิลลามেলাเกิดการสลายตัวจากการทำงานของเอนไซม์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของเพกทินเป็นเพกทินที่ละลายน้ำได้ ส่งผลให้ความเป็นระเบียบของโครงสร้างผนังเซลล์ถูกทำลาย เซลล์สูญเสียความเต่ง และมีเนื้อสัมผัสนิ่มลง (Yashoda *et al.*, 2006; Brummell, 2006) ส่วนความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงควบคุม และมะม่วงที่แช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Alandes *et al.* (2006) ซึ่งศึกษาผลของการใช้แคลเซียมแลคเตทต่อความคงตัวของผนังเซลล์ของแอปเปิ้ลตัดแต่งพร้อมบริโภค และพบว่าแอปเปิ้ลที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทมีค่าความแน่นเนื้อไม่แตกต่างกับตัวอย่างแอปเปิ้ลควบคุม แต่หลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่าตัวอย่างแอปเปิ้ลควบคุมมีค่าความแน่นเนื้อลดลง ในขณะที่ตัวอย่างแอปเปิ้ลที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทมีค่าความแน่นเนื้อไม่แตกต่างจากค่าความแน่นเนื้อเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เนื่องจากแคลเซียมแลคเตทช่วยรักษาความคงตัวของโครงสร้างผนังเซลล์พืช และสำหรับการแช่ตัวอย่างมะม่วงในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส

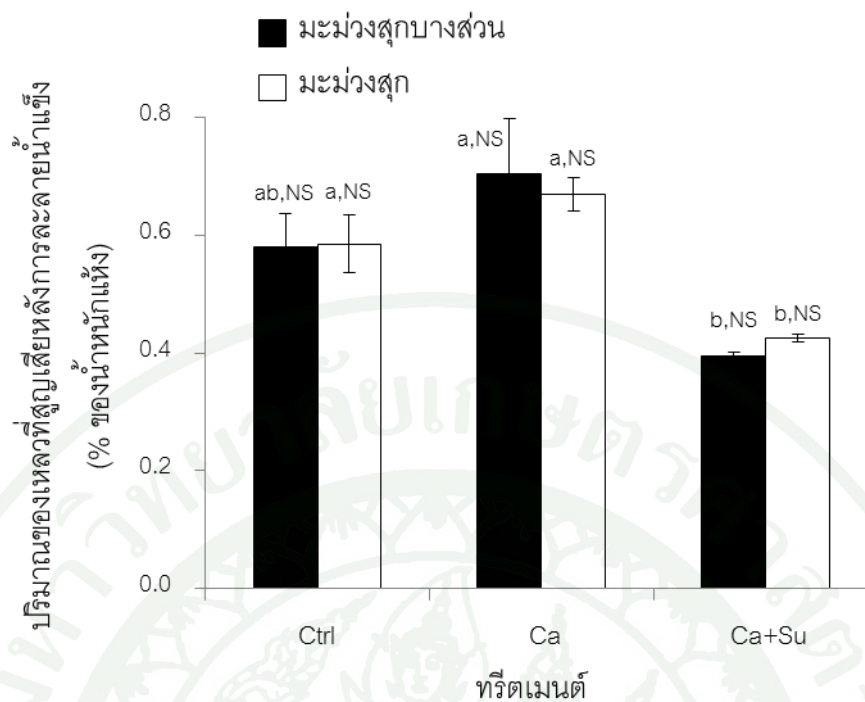
ผลการทดลองพบว่ามะม่วงมีค่าความแน่นเนื้อมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยที่มะม่วงสุกบางส่วนที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสนี้มีค่าความแน่นเนื้อสูงที่สุด ($P < 0.05$) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Pereira *et al.* (2007) ที่รายงานว่าฝรั่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสมีค่าความแน่นเนื้อสูงขึ้น เนื่องจากกระบวนการออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาลซูโครสทำให้ชั้นฝรั่งมีความยืดหยุ่น (elastic) และสามารถทนต่อการเปลี่ยนรูป (deformation) ได้ดีขึ้น ประกอบกับผลของแคลเซียมแลคเตทที่ช่วยรักษาโครงสร้างผนังเซลล์พืช โดยเกิดการเชื่อมโยงข้ามระหว่างแคลเซียมไอออนกับหมู่คาร์บอกซิลบนสายเพกทินเกิดเป็นแคลเซียมเพกเตทที่ไม่ละลายน้ำ ช่วยเพิ่มความแน่นแข็งให้กับโครงสร้างผนังเซลล์ของผลไม้

1.2 คุณภาพของมะม่วงหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย

หัวข้อนี้แสดงผลการตรวจสอบคุณภาพของตัวอย่างมะม่วงทั้งหมดหลังผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เก็บรักษานาน 14 วัน แล้วนำมาทำละลายที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

1.2.1 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งแสดงในภาพที่ 11 พบว่ามะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม หรือตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการแช่ตัวอย่างมะม่วงในสารละลายน้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็งและทำละลายเป็นการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีการออสโมซิส ทำให้ความเสียหายของผนังเซลล์พืชจากการเกิดผลึกน้ำแข็งลดลง (Marani *et al.*, 2001) ในขณะที่ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่หลังจากการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทส่งผลให้ในระหว่างการแช่เยือกแข็งเกิดผลึกน้ำแข็งจำนวนมาก จึงทำให้เนื้อเยื่อของตัวอย่างได้รับความเสียหาย ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งจึงมากขึ้น



ภาพที่ 11 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์

หมายเหตุ Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ซูโครส

^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละทรีตเมนต์ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

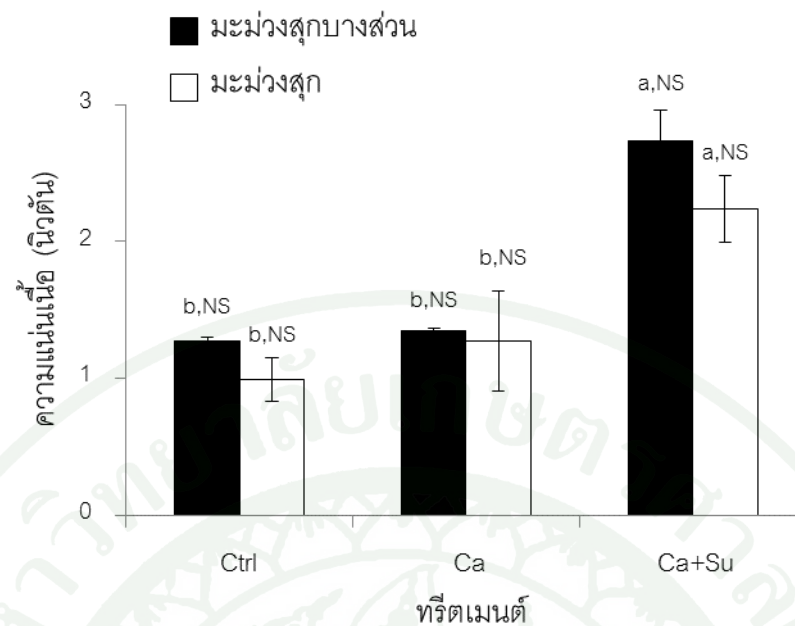
^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระดับความสุกไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

1.2.2 ความแน่นเนื้อจากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส และการทดสอบทางประสาทสัมผัส

ผลการวิเคราะห์ค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส พบว่าตัวอย่างมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในทุกทรีตเมนต์มีค่าความแน่นเนื้อลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งและทำละลาย (ตารางที่ 2 และภาพที่ 12) โดยหลังการแช่เยือกแข็งตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทก่อนการแช่เยือกแข็งมีค่าความแน่นเนื้อไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุมอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ถึงแม้ว่าการเติมแคลเซียมแลคเตทลงไปในเนื้อมะม่วง เพื่อให้แคลเซียมออกซิเจนจับกับสายเพกทินบริเวณมิดเดิ้ลลามেলাแล้วเกิดโครงสร้างที่เรียกว่า egg-box model เพื่อช่วยรักษาคุณภาพเนื้อสัมผัสของตัวอย่างมะม่วงจากการแช่เยือกแข็งและทำละลาย แต่ผลเสียของปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจากการเคลื่อนที่ของน้ำจากสารละลายแคลเซียมแลคเตทเข้าสู่ชั้นมะม่วงส่งผลต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสของตัวอย่างมะม่วงแช่เยือกแข็งมากกว่า โดยก่อให้เกิดผลึกน้ำแข็งจำนวนมากในชั้นมะม่วง สร้างความเสียหายให้แก่ผนังเซลล์ จึงทำให้ค่าความแน่นเนื้อหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายของมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทเพียงอย่างเดียวไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ในขณะที่ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสมีค่าความแน่นเนื้อมากที่สุด ($P < 0.05$) เนื่องจากแคลเซียมแลคเตทช่วยรักษาโครงสร้างของผนังเซลล์ในเนื้อมะม่วง โดยแคลเซียมออกซิเจนจะไปจับกับสายเพกทินทำให้เกิดโครงสร้างแคลเซียมเพกเตทที่แข็งแรง (Gras *et al.*, 2003) รวมทั้งผลของการใช้น้ำตาลซูโครสความเข้มข้นสูงในการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีการออสโมซิส ทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถกลายเป็นน้ำแข็งได้ (freezable water) ลดลง ดังนั้นความเสียหายของคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งจึงลดลง (Ohnishi and Miyawaki, 2005)

ถึงแม้ว่าหลังการแช่เยือกแข็งค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่จากผลการวิเคราะห์ก็แสดงให้เห็นว่าค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงสุกบางส่วนมีแนวโน้มสูงกว่ามะม่วงสุก สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sriwimon and Boonsupthip (2010) ที่รายงานว่าค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกบางส่วนหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายมีค่ามากกว่ามะม่วงสุก เนื่องจากมะม่วงสุกบางส่วนมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่ามะม่วงสุก จึงสามารถทนต่อความเสียหายจากการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้มากกว่า อีกทั้งมะม่วงสุกบางส่วนยังสามารถรักษาคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งได้ดีกว่ามะม่วงสุก และมะม่วงสุกเต็มที (Rimkeeree and Charoenrein, 2014)



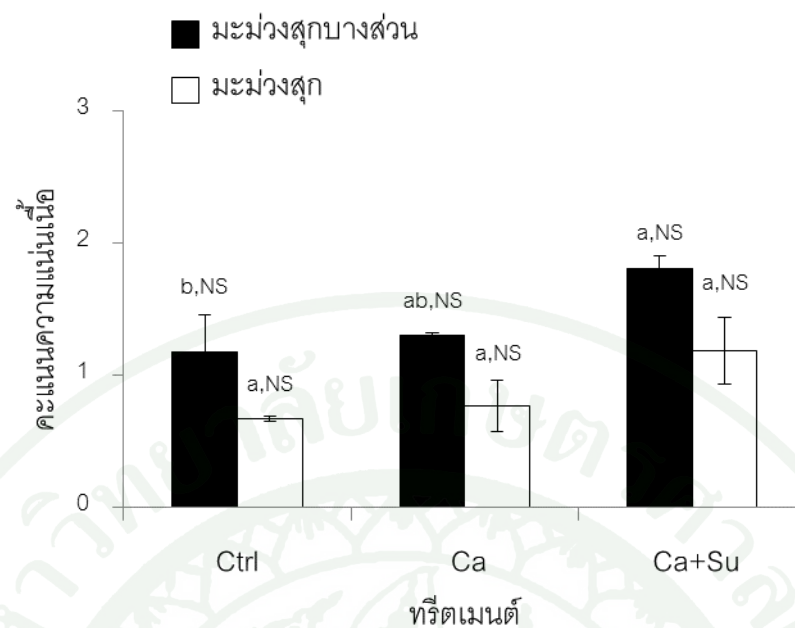
ภาพที่ 12 ค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์หลังการแช่เยือกแข็ง

หมายเหตุ Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ซูโครส

^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละทรีตเมนต์ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระดับความสุกไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัสของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์ด้วยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ โดยใช้ระดับคะแนนความแน่นเนื้อ 3 ระดับ (นิ่มมาก – แน่นเนื้อมาก) ด้วยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 7 คน (ภาพที่ 13) พบว่าคะแนนความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงแช่เยือกแข็งมีแนวโน้มเดียวกับค่าความแน่นเนื้อที่วิเคราะห์จากเครื่องวัดเนื้อสัมผัส คือ มะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสมีคะแนนความแน่นเนื้อสูงที่สุด โดยที่ คะแนนความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกบางส่วนมีแนวโน้มสูงกว่ามะม่วงสุกในทุกทรีตเมนต์



ภาพที่ 13 คะแนนความแน่นเนื้อที่ได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ (Quantitative Descriptive Analysis, QDA) ของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์หลังการแช่เยือกแข็ง

หมายเหตุ Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ซูโครส

^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละทรีตเมนต์ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระดับความสุกไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

1.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงสด และมะม่วงแช่เยือกแข็ง

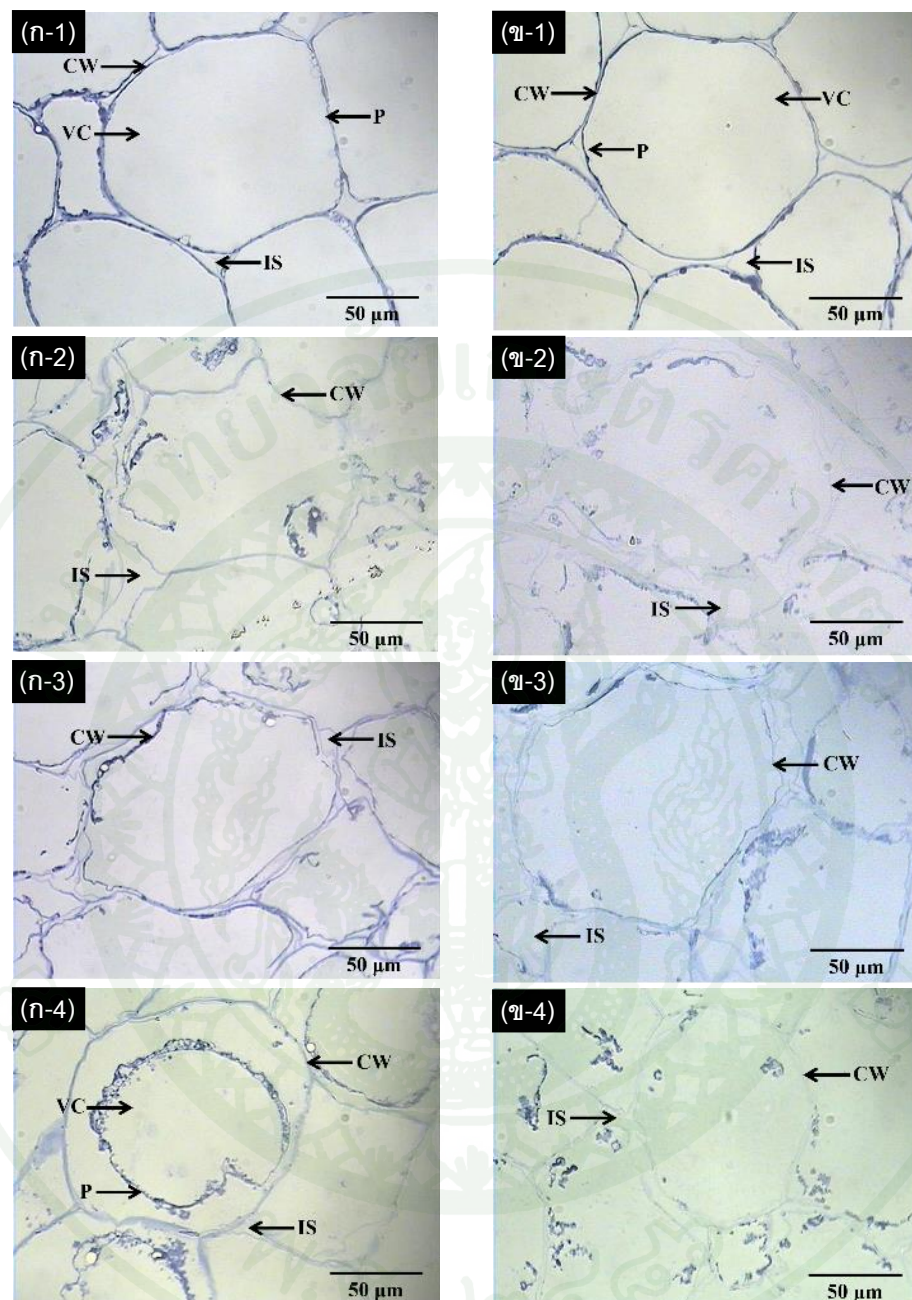
การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงสด และมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านแสดงในภาพที่ 14 เมื่อพิจารณาเซลล์ของตัวอย่างมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง (ภาพที่ 14 ก-1 และ ข-1) พบว่าการจัดเรียงตัวของเซลล์มีความสม่ำเสมอ ผนังเซลล์สมบูรณ์ไม่ฉีกขาด สังเกตได้จากผนังเซลล์ที่ถูกย้อมสีอย่างสม่ำเสมอตลอดเซลล์ เนื่องจากการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fibrils) เยื่อหุ้มเซลล์อยู่ชิดติดกับผนังเซลล์ สามารถกักเก็บของเหลวภายในเซลล์ไว้ได้ ทำให้เซลล์มีความเต่งไม่

หดตัว แต่อย่างไรก็ตามสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างเซลล์ของมะม่วงสุกบางส่วน และเซลล์ของมะม่วงสุก คือ เซลล์ของมะม่วงสุกมีรูปร่างค่อนข้างกลมกว่า การจัดเรียงตัวของเซลล์ค่อนข้างหลวมกว่า และมีช่องว่างระหว่างเซลล์กว้างกว่ามะม่วงสุกบางส่วน ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เกิดขึ้นบริเวณมิดเดิ้ลเมลลาระหว่างกระบวนการสุกทำให้เกิดการแยกตัวของเซลล์ และส่งผลให้เนื้อเยื่อของมะม่วงสุกนิ่มลง (Bartley and Knee, 1982)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างระดับจุลภาคของเนื้อเยื่อมะม่วงแช่เยือกแข็ง พบว่าเซลล์ของมะม่วงที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์เกิดความเสียหายมากที่สุด (ภาพที่ 14 ก-2 และ ข-2) โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าผนังเซลล์ของตัวอย่างมะม่วงถูกทำลาย และเกิดการแยกตัวของเซลล์บริเวณมิดเดิ้ลเมลล่า เยื่อหุ้มเซลล์แตกออก เซลล์ไม่สามารถคงรูปร่างไว้ได้ โดยเฉพาะตัวอย่างของเซลล์มะม่วงสุกที่ได้รับความเสียหายอย่างรุนแรงมากกว่ามะม่วงสุกบางส่วน ซึ่งผลการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงแช่เยือกแข็งนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของมะม่วงหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย โดยที่ความเสียหายของเซลล์จากการแช่เยือกแข็งนี้มีสาเหตุมาจากการเกิดผลึกน้ำแข็งจากบริเวณภายนอกเซลล์แพร่ขยายเข้ามาในไซโตพลาสซึมเมื่อเยื่อหุ้มเซลล์สูญเสียความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นทำให้เซลล์เกิดการแยกตัว แล้วส่งผลให้ภายหลังการทำละลายน้ำไม่สามารถกลับเข้าไปอยู่ภายในเซลล์ได้ ทำให้เซลล์สูญเสียความเต่ง ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของผลไม้ถูกทำลาย (Reid, 1993)

โครงสร้างระดับจุลภาคของเนื้อเยื่อมะม่วงแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตท แสดงในภาพที่ 14 ก-3 และ ข-3 จะสังเกตเห็นได้ว่าถึงแม้บางส่วนของผนังเซลล์จะมีรอยแตก หรือรอยยับ แต่เซลล์ของทั้งมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทก่อนการแช่เยือกแข็งมีความเสียหายน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม เนื่องจากการเติมแคลเซียมแลคเตทช่วยรักษาโครงสร้างผนังเซลล์ของมะม่วง จากการสร้างพันธะเชื่อมข้ามระหว่างแคลเซียมไอออนกับกรดกาแล็กทูโรนิกในสายเพกทินบริเวณมิดเดิ้ลเมลล่า (Alonso *et al.*, 2005) แต่อย่างไรก็ตามค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายไม่แตกต่างกับตัวอย่างควบคุม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าผลของแคลเซียมในการช่วยรักษาโครงสร้างของผนังเซลล์ที่ขึ้นนั้นไม่สามารถเอาชนะการเกิดผลึกน้ำแข็งจำนวนมากภายในเซลล์ ซึ่งมาจากการออสโมซิสของน้ำจำนวนมากจากสารละลายแคลเซียมแลคเตทเข้าสู่เซลล์ขณะที่ทำการแช่ตัวอย่าง

การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของเนื้อเยื่อมะม่วงแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส (ภาพที่ 14 ก-4 และ ข-4) พบว่าเซลล์ยังสามารถคงรูปร่างเดิมไว้ได้ใกล้เคียงเซลล์ของมะม่วงสดมากที่สุด โดยที่มะม่วงสุกบางส่วนที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสมีโครงสร้างผนังเซลล์ที่แข็งแรงกว่ามะม่วงสุกสังเกตได้จากการที่ผนังเซลล์ของมะม่วงสุกบางส่วนสามารถย้อมติดสีของโทลูอิดีนบลูได้อย่างชัดเจนกว่า เนื่องจากองค์ประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์ในผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ และมีดัดแลเมลล่าเกิดการสลายตัวระหว่างกระบวนการสุก ทำให้มะม่วงสุกมีโครงสร้างผนังเซลล์ที่อ่อนแอกว่ามะม่วงสุกบางส่วน (Brummell, 2006) และการแช่มะม่วงในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสยังช่วยลดความเสียหายของโครงสร้างผนังเซลล์มะม่วงจากการแช่เยือกแข็งได้ เนื่องจากกระบวนการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีการออสโมซิสด้วยน้ำตาลซูโครส สามารถช่วยลดความเสียหายของเนื้อเยื่อพืชจากการเกิดผลึกน้ำแข็งได้ แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าเยื่อหุ้มเซลล์ของมะม่วงเกิดการหดตัว หรือเรียกว่าพลาสโมไลซิส (plasmolysis) จากการที่น้ำเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ที่มีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์นี้จะถูกแทนที่ด้วยการเคลื่อนที่เข้ามาของสารละลายออสโมติกที่เคลื่อนที่จากบริเวณช่องว่างระหว่างเซลล์เข้ามาในเซลล์ ทำให้เซลล์ที่ผ่านการออสโมซิสยังคงรูปร่างอยู่ได้ (Martinez-Monzó *et al.*, 1998) อีกทั้งการแพร่ของแคลเซียมแลคเตทเข้าสู่ชั้นมะม่วงยังช่วยรักษาโครงสร้างผนังเซลล์ จากการเกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างแคลเซียมไอออนและสายเพกทินบริเวณมิดเดิลลามेलล่า เกิดเป็นโครงสร้างแคลเซียมเพกเตทที่แข็งแรง (Alonso *et al.*, 2005) ดังนั้น จะเห็นได้ว่ามะม่วงสุกบางส่วนที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็งและทำการละลาย เป็นมะม่วงที่ยังคงมีโครงสร้างของเซลล์สมบูรณ์ที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแน่นเนื้อที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับมะม่วงที่รีตเมนต์อื่น



ภาพที่ 14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงส่องผ่านของตัวอย่างสด และแช่เยือกแข็งของ มะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุก (กำลังขยาย 40x, สเกลบาร์ 50 μm) (ก) และ (ข) คือ มะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุก (1), (2), (3) และ (4) คือ ตัวอย่างสด, ตัวอย่าง แช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์, แช่แคลเซียมแลคเตท และแช่แคลเซียมแลคเตท และซูโครส ตามลำดับ (CW = ผนังเซลล์, P = เยื่อหุ้มเซลล์, VC = แวคิวโอล และ IS = ช่องว่างระหว่างเซลล์)

1.4 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของมะม่วงหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสตามความชอบของมะม่วงหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย โดยประเมินด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ใช้แบบทดสอบการยอมรับโดยใช้สเกลแบบ 9-point hedonic ทดสอบโดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน แสดงผลในตารางที่ 3 พบว่าการใช้มะม่วงสุกบางส่วนในการแช่เยือกแข็งและทำละลายช่วยปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ และสีของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยจะเห็นได้จากคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ และสีของมะม่วงสุกบางส่วนที่มีแนวโน้มสูงกว่ามะม่วงสุก เนื่องจากมะม่วงสุกบางส่วนมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่ามะม่วงสุก จึงสามารถทนต่อความเสียหายที่เกิดจากผลึกน้ำแข็งได้ดีกว่ามะม่วงสุก (Sriwimon and Boonsupthip, 2010; Rimkeeree and Charoenrein, 2014) ส่งผลให้มะม่วงสุกบางส่วนยังคงรูปร่างหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้ และเมื่อพิจารณาคะแนนความชอบด้านกลิ่นรสพบว่า ตัวอย่างมะม่วงในแต่ละที่รีดเมนต์มีคะแนนความชอบด้านกลิ่นรสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในขณะที่คะแนนความชอบด้านรสชาติของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ซึ่งอาจมีสาเหตุจากการออกซิเดชันของน้ำในสารละลายแคลเซียมแลคเตทเข้ามาในชั้นมะม่วง และการสูญเสียของแข็งที่ละลายได้ออกจากชั้นมะม่วง ทำให้มะม่วงมีรสชาติจืดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ในขณะที่รสชาติของมะม่วงสุกบางส่วนที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็งไม่แตกต่างกับมะม่วงสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมแลคเตทไม่ทำให้เกิดรสชาติขมในมะม่วง (Luna-Guzmán and Barrett, 2000) และน้ำตาลซูโครสสามารถช่วยกลบเกลื่อนรสชาติเปรี้ยวของมะม่วงสุกบางส่วนได้ ผลการประเมินความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม พบว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมากที่สุด ($P < 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากการช่วยรักษาโครงสร้างของผนังเซลล์ของแคลเซียมด้วยการเกิดพันธะเชื่อมข้ามกับเพกทิน (Alonso et al., 2005) ร่วมกับการใช้น้ำตาลซูโครสช่วยลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีออสโมซิส ซึ่งถือเป็นการลดปริมาณน้ำที่สามารถกลายเป็นน้ำแข็งได้ ส่งผลให้ความเสียหายของเซลล์จากการเกิดผลึกน้ำแข็งลดลง

ตารางที่ 3 คะแนนความชอบของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์หลังการแช่เยือกแข็ง

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	ระดับความสุก	ทรีตเมนต์		
		ตัวอย่างควบคุม	แคลเซียม	แคลเซียมและชูโครส
ลักษณะปรากฏ	สุกบางส่วน	5.25 ^{ba} ±0.04	5.98 ^{abA} ±0.47	6.83 ^{aA} ±0.04
	สุก	3.81 ^{aA} ±0.67	3.98 ^{aA} ±0.47	5.03 ^{aA} ±0.30
สี	สุกบางส่วน	6.10 ^{aA} ±0.17	6.22 ^{aA} ±0.30	6.47 ^{aA} ±0.17
	สุก	4.32 ^{aA} ±0.78	4.47 ^{aA} ±0.72	4.71 ^{aB} ±0.17
กลิ่นรส	สุกบางส่วน	5.30 ^{aA} ±0.37	4.67 ^{aA} ±0.32	5.35 ^{aA} ±0.21
	สุก	5.32 ^{aA} ±0.35	4.61 ^{aA} ±0.34	5.42 ^{aA} ±0.15
รสชาติ	สุกบางส่วน	4.44 ^{aB} ±0.15	3.72 ^{aA} ±0.13	5.04 ^{aA} ±0.74
	สุก	5.45 ^{aA} ±0.11	4.18 ^{ba} ±0.25	5.86 ^{aA} ±0.01
เนื้อสัมผัส	สุกบางส่วน	4.39 ^{ba} ±0.28	4.40 ^{ba} ±0.43	5.69 ^{aA} ±0.21
	สุก	3.50 ^{ba} ±0.10	3.43 ^{ba} ±0.23	4.87 ^{aA} ±0.18
ความชอบโดยรวม	สุกบางส่วน	4.71 ^{ba} ±0.02	4.62 ^{ba} ±0.08	5.67 ^{aA} ±0.45
	สุก	4.30 ^{ba} ±0.21	3.97 ^{ba} ±0.29	5.09 ^{aA} ±0.03

หมายเหตุ ^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละทรีตเมนต์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{A-B} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระดับความสุกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ถึงแม้ว่าผลคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลชูโครสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่จะเห็นได้ว่าคะแนนชอบด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของตัวอย่างมะม่วงสุกบางส่วนมีแนวโน้มมากกว่าตัวอย่างมะม่วงสุก ดังนั้นการเลือกใช้มะม่วงสุกบางส่วนแทนมะม่วงสุกในการแช่เยือกแข็งและทำละลายสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งได้ โดยคุณภาพทางประสาทสัมผัสสามารถ

ปรับปรุงได้ด้วยการนำมะม่วงสุกบางส่วนมาผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสม น้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็งและทำละลาย

อนึ่ง ถึงแม้ว่าการใช้มะม่วงสุกบางส่วนแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสม น้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็ง จะสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็งให้ดีขึ้น แต่จะเห็นได้ว่าค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายลดลงถึง 73.03% จากตัวอย่างมะม่วงสด จึงควรต้องมีการปรับปรุงเพิ่มเติม

ตอนที่ 2: ศึกษาผลของระยะเวลาการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดต่อโครงสร้างระดับโมเลกุล ระดับเอสเทอริฟิเคชัน อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และความหนืดของเพกติน

ในตอนี่ 2 นี้มีแนวคิดที่จะนำเพกตินมาใช้เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพมะม่วงแช่เยือกแข็ง เนื่องจากเพกตินมีส่วนช่วยในการเสริมสร้างโครงสร้างผนังเซลล์พืช แต่อย่างไรก็ตามเพกตินเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และเป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง การเติมเพกตินเข้าไปในเนื้อผลไม้ได้อย่างสม่ำเสมอทำได้ยาก ซึ่งการทำให้เพกตินให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง อาจจะช่วยทำให้เพกตินสามารถแพร่เข้าสู่เนื้อผลไม้ได้อย่างสม่ำเสมอมากขึ้น ดังนั้นในตอนี่ 2 นี้จึงศึกษาการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดเพื่อให้เพกตินมีขนาดโมเลกุลเล็กลง โดยได้นำเพกตินทางการค้า (commercial apple pectin) มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง และศึกษาผลของระยะเวลาการไฮโดรไลซ์เพกตินต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับโมเลกุล ระดับเอสเทอริฟิเคชัน อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และความหนืดของเพกติน

2.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเพกติน (average molecular weight)

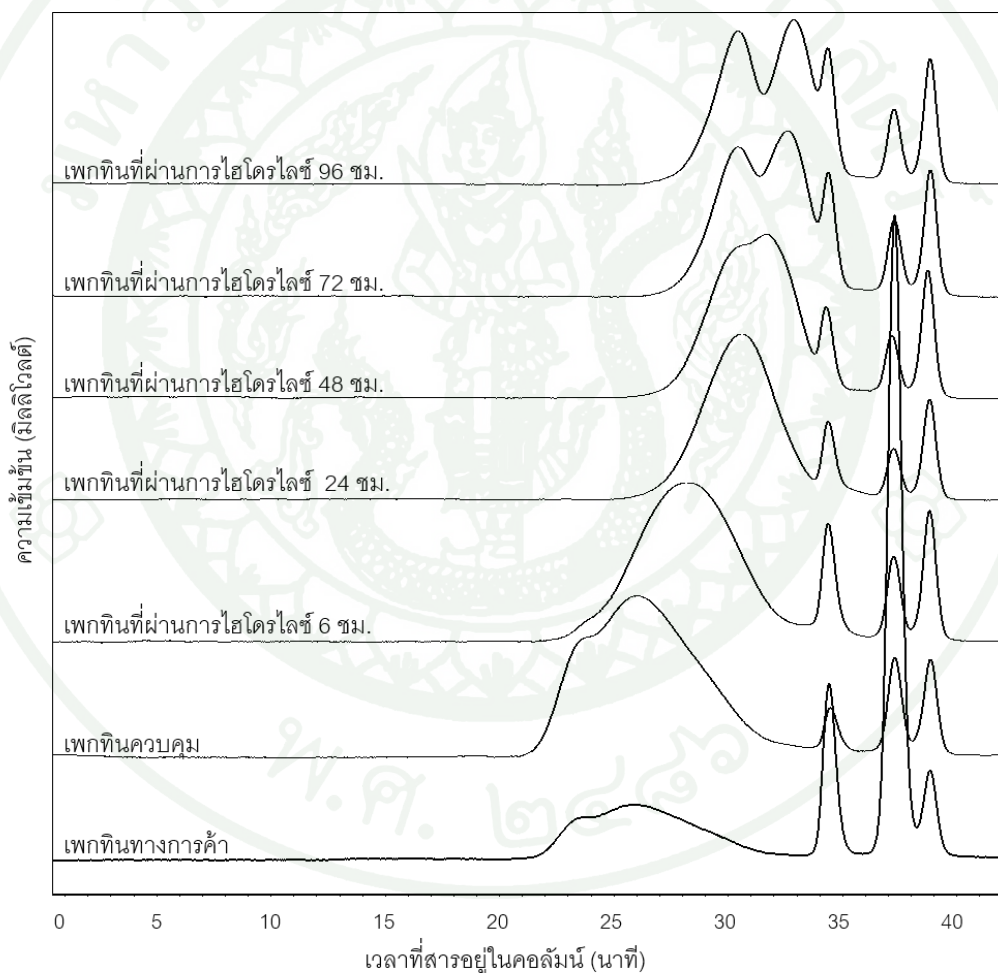
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเพกตินทางการค้า เพกตินควบคุม (เพกตินที่ไม่ได้ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด แต่ผ่านการโคอะไลซิสในน้ำกลั่น และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเช่นเดียวกับเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์) และเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวแรงดันสูงแบบแยกตามขนาด (HPSEC) แสดงผลในภาพที่ 15 และตารางที่ 4 โดยเมื่อพิจารณาโครมาโตแกรมของตัวอย่างเพกตินทางการค้า และตัวอย่างเพกตินควบคุม พบว่าโครมาโตแกรมของทั้ง 2 ตัวอย่างมีลักษณะ

คล้ายกัน โดยที่ตำแหน่งพีคของเพกตินพอลิเมอร์เกิดขึ้นที่เวลา (retention time) ใกล้เคียงกัน คือ 25.82 และ 25.93 นาที สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากับ 645.2 และ 601.8 กิโลดาลตัน ตามลำดับ ทั้งนี้การที่น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของตัวอย่างเพกตินควบคุมน้อยกว่าตัวอย่างเพกตินทางการค้าเล็กน้อย อาจมีสาเหตุมาจากผลของความสูงของพีคที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การวิเคราะห์ตำแหน่งของเวลาที่สารอยู่ในคอลัมน์คลาดเคลื่อนเล็กน้อย ซึ่งส่งผลให้การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่างเพกตินทางการค้า และเพกตินควบคุมมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย

นอกจากนี้ยังพบพีคที่เวลา 34.30, 37.16 และ 38.73 นาที สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากับ 2,400, 350 และ 123 ดาลตัน ซึ่งคาดว่าคือพีคของโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide), น้ำตาลกลูโคส และพีคของตัวทำละลาย (สารละลายไซเดียมไนเตรด ที่มีไซเดียมเอไซด์ละลายอยู่) ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าพีคของโอลิโกแซคคาไรด์ และน้ำตาลกลูโคสของตัวอย่างเพกตินควบคุมมีความสูงลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างเพกตินทางการค้า ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของโอลิโกแซคคาไรด์ และน้ำตาลกลูโคสบางส่วนถูกกำจัดออกไปเมื่อผ่านกระบวนการไดอะไลซิส

เมื่อพิจารณาผลของการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดพบว่าเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลงเมื่อถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดในระยะเวลาที่นานขึ้น โดยที่โครมาโตแกรมของตัวอย่างเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, 24 และ 48 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าพีคของเพกตินพอลิเมอร์เลื่อนไปทางขวามากขึ้น คือ มีเวลาที่สารอยู่ในคอลัมน์เพิ่มขึ้น คือ 28.12, 30.53 และ 31.69 นาที สอดคล้องกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่ลดลงอย่างรวดเร็ว คือ 140.7, 28.6 และ 13.2 กิโลดาลตัน ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่เพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกนี้เกิดจากการที่กรดไฮโดรไลซ์ส่วนของโซ่กิ่งของโมเลกุลน้ำตาลที่เกาะอยู่บนสายของเพกติน และตัดพันธะที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลแรมโนสที่แทรกอยู่ในสายพอลิเมอร์ของกรดกาแล็กทูโรนิก ทำให้เกิดการสลายตัวของเพกตินพอลิเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อน โดยประกอบไปด้วยส่วนของแรมโนกาแล็กทูโรแนน-1 ไฮโมกาแล็กทูโรแนนที่พันตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และไฮโมกาแล็กทูโรแนนที่เป็นพอลิเมอร์สายยาว สลายตัวออกเป็นส่วนประกอบย่อยต่างๆ และปลดปล่อยพอลิเมอร์ของไฮโมกาแล็กทูโรแนนออกมา (Round *et al.*, 2010) และเมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นเวลานาน 72 ชั่วโมงขึ้นไป พบว่าโครมาโตแกรมของเพกตินแยกออกเป็น 2 พีค โดยพีคที่ 1 ที่มีระยะเวลาที่สารอยู่ในคอลัมน์น้อยกว่า (30.29 นาที) คาดว่าน่าจะเป็นพอลิเมอร์ของไฮโมกาแล็กทูโรแนนที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก (33.3 กิโลดาลตัน) และพีคที่ 2 ที่มีระยะเวลาที่สารอยู่ในคอลัมน์

มากกว่า (32.53 นาที) คาดว่าน่าจะเป็นพอลิเมอร์ของไฮโมกาแล็กทูโรแนนที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย (7.6 กิโลดาลตัน) ตามลำดับ นอกจากนี้โครมาโตแกรมของเพกตินที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 96 ชั่วโมง ยังแสดงให้เห็นว่าพีคทั้ง 2 พีคแยกออกจากกันชัดเจนขึ้น และพีคทั้ง 2 เลื่อนไปทางขวาที่มีระยะเวลาที่สารอยู่ในคอลัมน์มากขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับโครมาโตแกรมของเพกตินที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 72 ชั่วโมง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนานขึ้น สายพอลิเมอร์ของไฮโมกาแล็กทูโรแนนจะค่อยๆ ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดจนมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ซึ่งคาดว่า การสลายตัวของไฮโมกาแล็กทูโรแนนนี้เกิดจากการถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดที่ส่วนปลายของสายพอลิเมอร์เท่านั้น (Kravtchenko *et al.*, 1993)



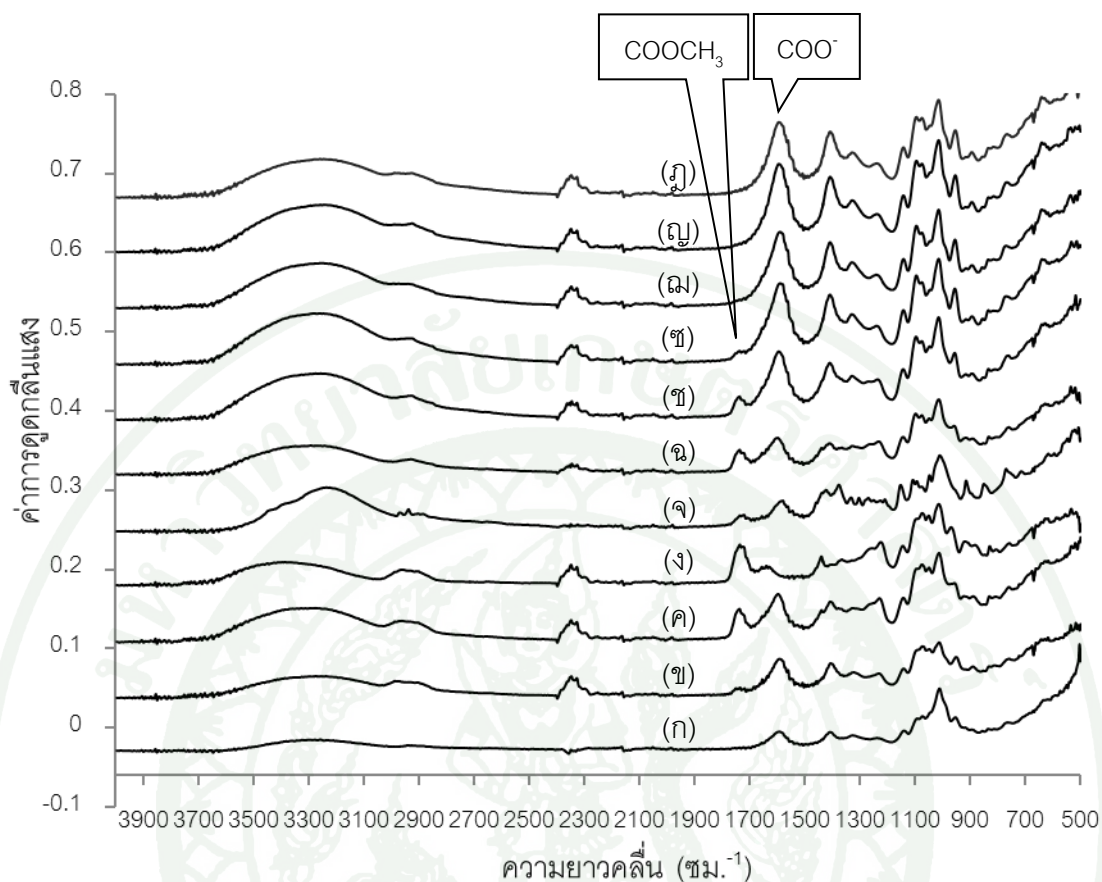
ภาพที่ 15 โครมาโตแกรมของเพกตินทางการค้า เพกตินควบคุม และเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวแรงดันสูงแบบแยกตามขนาด (HPSEC)

ตารางที่ 4 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเพกทินทางการค้า เพกทินควบคุม และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	เพกทินพีคที่ 1		เพกทินพีคที่ 2	
	เวลาที่สารอยู่ในคอลัมน์ (นาที)	น้ำหนักโมเลกุล (กิโลดาลตัน)	เวลาที่สารอยู่ในคอลัมน์ (นาที)	น้ำหนักโมเลกุล (กิโลดาลตัน)
เพกทินทางการค้า	25.82	645.2	-	-
เพกทินควบคุม	25.93	601.8	-	-
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 ชม.	28.12	140.7	-	-
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 24 ชม.	30.53	28.6	-	-
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 48 ชม.	31.69	13.2	-	-
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 72 ชม.	30.29	33.3	32.53	7.6
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 96 ชม.	30.35	32.1	32.77	6.5

2.2 ระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกติน (degree of esterification)

เนื่องจากระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกตินมีความสำคัญต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่ โดยเฉพาะความสามารถในการเกิดเจลของเพกติน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลของระยะเวลาการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดต่อระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกติน ซึ่งยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน โดยใช้วิธีฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโกปี (FT-IR) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกตินในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือ สามารถทำซ้ำได้ และมีขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อน โดยการวิเคราะห์ระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกตินด้วยเครื่อง FT-IR นี้ อาศัยหลักการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการสั่นของพันธะเคมีภายในโมเลกุล ซึ่งพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่คาร์บอนิลที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์ (carbonyl ester group; COOCH_3) และคาร์บอกซิเลตไอออน (carboxylate ion; COO^-) ที่เกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่น $1760 - 1730 \text{ cm}^{-1}$ และ $1630 - 1600 \text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกติน เนื่องจากระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกติน เท่ากับ $(\text{จำนวนหมู่คาร์บอกซิลที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์} / \text{จำนวนหมู่คาร์บอกซิลทั้งหมด}) \times 100$ ดังนั้นสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคที่ความยาวคลื่น 1760 cm^{-1} ต่อพื้นที่ใต้พีคที่ความยาวคลื่น 1760 cm^{-1} และ 1600 cm^{-1} จึงเทียบเท่ากับสัดส่วนของระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกติน ($\text{DE} = A_{1730} / (A_{1730} + A_{1600})$) (Singthong *et al.*, 2004) เพื่อที่จะวิเคราะห์ระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของตัวอย่างเพกติน จึงได้ทำการสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคของ $A_{1730} / (A_{1730} + A_{1600})$ กับระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกตินมาตรฐาน (0, 26, 62 และ 96%) (ภาคผนวกที่ ข4) ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 16 และ ตารางที่ 5 พบว่าตัวอย่างเพกตินทางการค้า และ เพกตินควบคุมมีระดับเอสเทอร์ฟิเคชันเท่ากับ 35.04 และ 43.44% ตามลำดับ ทั้งนี้การที่ระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกตินควบคุมมากกว่าเพกตินทางการค้าอาจมีสาเหตุมาจากกระบวนการไดอะไลซิสที่ทำให้เพกตินที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก และมีระดับเอสเทอร์ฟิเคชันต่ำถูกกำจัดออกไป เมื่อพิจารณาผลของการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดพบว่าเพกตินที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 และ 24 ชั่วโมง มีระดับเอสเทอร์ฟิเคชันลดลงเป็น 25.06 และ 18.96% ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าเมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมงขึ้นไป ไม่ปรากฏพีคของหมู่คาร์บอนิลที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์ แสดงให้เห็นว่าการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดทำให้เกิดการสลายพันธะเอสเทอร์ของหมู่เมทิลบนสายเพกติน โดยเมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดในระยะเวลาสั้น ระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกตินยิ่งลดลง จนกระทั่งไม่มีหมู่คาร์บอนิลที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์บนสายเพกติน



ภาพที่ 16 พูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) โพลีกาแล็กทูโรนิก, (ข) เพกตินที่มีระดับเอสเทอริฟิเคชัน 26%, (ค) 62%, (ง) 96%, (จ) เพกตินทางการค้า, (ฉ) เพกตินควบคุม, (ช) เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, (ซ) 24, (ฌ) 48, (ญ) 72 และ (ฎ) 96 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer; FT-IR)

ตารางที่ 5 ระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกทินทางการค้า เพกทินควบคุม และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	ระดับของเอสเทอร์ฟิเคชัน (%)
เพกทินทางการค้า	35.04 ^b ±1.48
เพกทินควบคุม	43.44 ^a ±0.17
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 ชม.	25.06 ^c ±1.01
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 24 ชม.	18.96 ^d ±1.80
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 48 ชม.	ไม่พบ
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 72 ชม.	ไม่พบ
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 96 ชม.	ไม่พบ

หมายเหตุ ^{a-d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

2.3 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเพกทิน (glass transition temperature; $T_{g, \text{onset}}$)

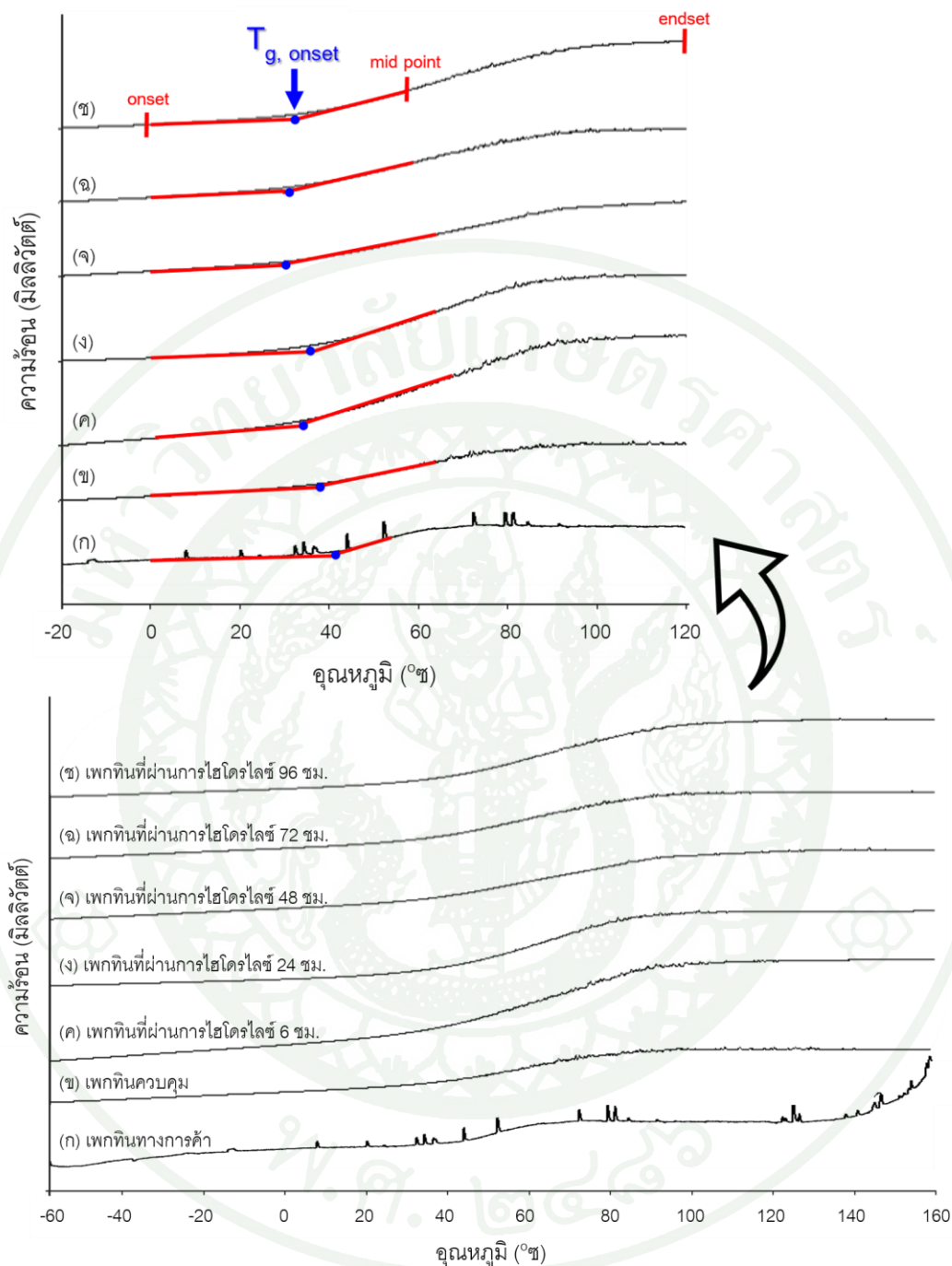
อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน คือ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาระหว่างสถานะกลาสและสถานะรับเบอรีของสารที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของสารพอลิเมอร์ คือ น้ำหนักโมเลกุล โดย Slade and Levine (1991) รายงานว่าสารพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำลง อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุล และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเพกทิน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเพกทินที่ผ่าน และไม่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด เพื่อศึกษาว่ามีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับโมเลกุลของเพกทินหลังจากถูกการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดหรือไม่ ผลอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างเพกทินที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ดังแสดงในตารางที่ 6 และภาพที่ 17 พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างเพกทินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเพกทินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนานขึ้น ($P < 0.05$) โดยอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดกลาสทรานซิชันของเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 96 ชั่วโมง ลดลงเหลือ 35.62 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดกลาสทรานซิชันของตัวอย่างเพกทิน

ทางการค้าซึ่งเท่ากับ 40.24 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่าการลดลงของอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนั้นสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่ลดลงของเพกติน มีงานวิจัยที่ศึกษาถึงระยะเวลาการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของสตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปร ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์สตาร์ชนานขึ้น จะส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของสตาร์ชลดลง (Chatakanonda *et al.*, 2011) ในขณะที่ผลงานวิจัยของ Mitsuki *et al.* (1999) ยังแสดงให้เห็นว่าอะกาโรสที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างอะกาโรสที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าการไฮโดรไลซ์เพกตินด้วยกรดเป็นสาเหตุให้เกิดการสลายตัวของสายเพกติน ทำให้เพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลง และมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลงด้วย

ตารางที่ 6 อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดกลาสทรานซิชันของเพกตินทางการค้า เพกตินควบคุม และเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดกลาสทรานซิชัน (°C)
เพกตินทางการค้า	40.24 ^a ± 1.26
เพกตินควบคุม	39.06 ^{ab} ± 1.64
เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 ชม.	36.77 ^{bcd} ± 2.18
เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 24 ชม.	38.01 ^{abc} ± 1.63
เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 48 ชม.	33.02 ^e ± 0.93
เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 72 ชม.	34.09 ^{de} ± 0.26
เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 96 ชม.	35.62 ^{cde} ± 0.14

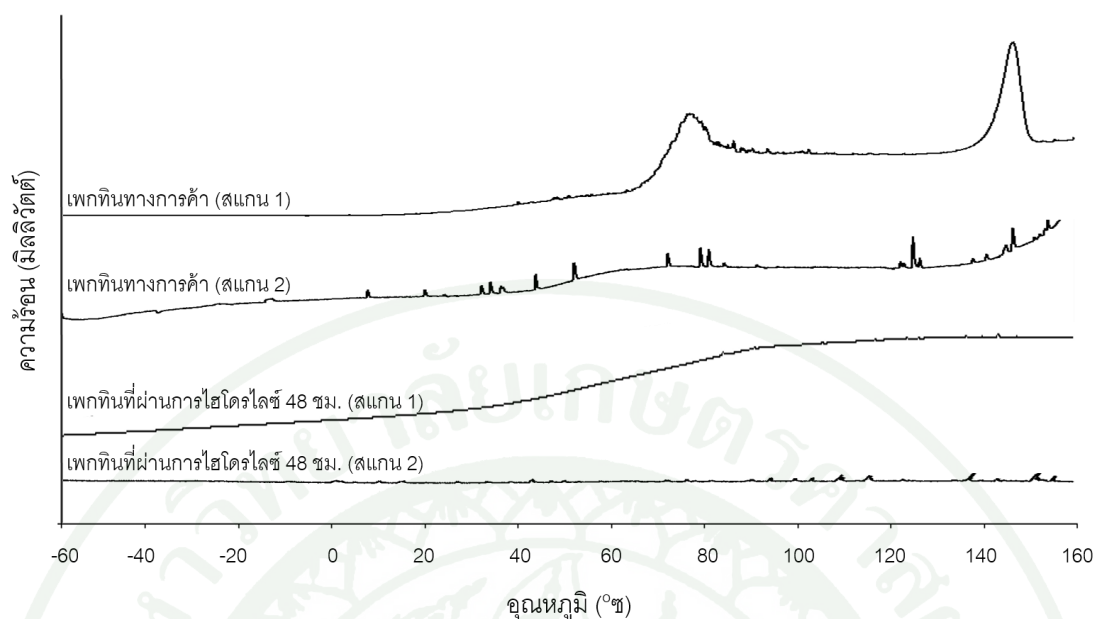
หมายเหตุ ^{a-e} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)



ภาพที่ 17 กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตัวอย่าง (ก) เพกทินทางการค้า (สแกนที่ 2), (ข) เพกทินควบคุม, (ค) เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, (ง) 24, (จ) 48, (ฉ) 72 และ (ช) 96 ชั่วโมง (สแกนที่ 1) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) โดยให้ความร้อนตัวอย่างจากอุณหภูมิ -60 ถึง 160 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 5 องศาเซลเซียส/นาที

การวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเพกทินทางการคั่ว นั้นแตกต่างจากการวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด เนื่องจากเพกทินทางการคั่วเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก (semi-crystalline) คือ มีทั้งส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบแบบผลึก และส่วนของโมเลกุลที่จัดเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบแบบอสัณฐาน (Lutz *et al.*, 2009) ในขณะที่เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนั้นได้ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเพกทินเป็นแบบโครงสร้างอสัณฐานเพียงอย่างเดียว โดยผลการวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่แตกต่างกันของตัวอย่างเพกทินทางการคั่ว และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง แสดงในภาพที่ 18

ในส่วนของการวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเพกทินทางการคั่ว พบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเพกทินทางการคั่วด้วยเครื่อง DSC ในสแกนแรก เกิดพีคการดูดกลืนความร้อน 2 พีค ที่ช่วงอุณหภูมิ 64 – 88 และ 133 – 152 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และหลังจากให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเพกทินอีกครั้งหนึ่งพบการเกิดกลาสทรานซิชันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากเพกทินเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก ดังนั้นพีคการดูดกลืนความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ 133 – 152 องศาเซลเซียส ที่พบเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างครั้งแรก จึงคาดว่าเกิดจากการสลายโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกของเพกทินซึ่งเป็นแบบผันกลับไม่ได้ ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเพกทินอีกครั้งหนึ่งพีคการดูดกลืนความร้อนนี้จึงหายไป ในขณะที่พีคการดูดกลืนความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ 64 – 88 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน คือ พีคการดูดความร้อนที่เรียกว่า enthalpic relaxation ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการคลายตัว (relaxation) ของโมเลกุลในโครงสร้างส่วนที่เป็นอสัณฐานของเพกทิน เนื่องจากสารที่มีโครงสร้างอสัณฐานเมื่ออยู่ในสภาวะกลาส คือ มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน จะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ จึงเกิดการรีแลกซ์เพื่อลดความตึงของโมเลกุลในโครงสร้าง ทำให้เกิดพีคที่เรียกว่า enthalpic relaxation (Clas *et al.*, 1999) ดังนั้นการวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเพกทินทางการคั่วจึงควรให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง 2 ครั้ง โดยครั้งแรกเพื่อกำจัดพีค enthalpic relaxation ที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันออกไปก่อน แล้วหลังจากการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเพกทินครั้งที่ 2 จึงจะปรากฏอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่แท้จริง



ภาพที่ 18 กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตัวอย่างเพกทินทางการค้า และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) โดยให้ความร้อนตัวอย่างจากอุณหภูมิ -60 ถึง 160 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 5 องศาเซลเซียส/นาที (สแกนที่ 1 และ 2)

ในขณะที่การวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน หรือการเกิดกลาสทรานซิชันของตัวอย่างเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดได้หลังจากการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างครั้งแรก ทั้งนี้เนื่องจากเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด และผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีลักษณะโครงสร้างแบบอสัณฐาน และเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเป็นครั้งที่ 2 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อนของตัวอย่าง ซึ่งคาดว่าเกิดจากตัวอย่างเพกทินนี้ไม่สามารถกลับมาฟอร์มโครงสร้างอสัณฐานได้อีกหลังจากการให้ความร้อน และความเย็นอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นการวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด จึงสามารถวิเคราะห์ได้จากการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างครั้งแรก

2.4 ความหนืดของสารละลายเพกติน (apparent viscosity)

ความหนืดของสารละลายเพกตินลดลงเมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดในระยะเวลานานขึ้น (ตารางที่ 7) ซึ่งการลดลงของความหนืดของเพกตินนั้นสอดคล้องกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ระดับเอสเทอร์ฟิเคชัน และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่ลดลงของเพกติน โดยที่การลดลงของความหนืดของสารละลายเพกตินภายหลังผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้น คือ ขั้นที่ 1 เมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 – 24 ชั่วโมง เพกตินมีความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่ความหนืดของเพกตินลดลงถึง 71 และ 90% หลังจากเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความหนืดของสารละลายเพกตินทางการค้า (33.83 เซนติพอยส์) ในขณะที่ขั้นที่ 2 ความหนืดของเพกตินจะลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมงขึ้นไป โดยที่ความหนืดของเพกตินลดลง 94% เมื่อเทียบกับความหนืดของสารละลายเพกตินทางการค้า เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Thibault *et al.* (1993) ซึ่งรายงานว่าสารละลายเพกตินมีความหนืดลดลงเมื่อถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดด้วยระยะเวลาที่นานขึ้น โดยที่หลังจากเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง ความหนืดของเพกตินจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกรดจะไปตัดพันธะที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของแรมโนส และกรดกาแล็กทูโรนิก ซึ่งเป็นพันธะที่สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่าย ในขณะที่หลังจากเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมงขึ้นไป อัตราการลดลงของความหนืดของสารละลายเพกตินจะช้าลง ซึ่งคาดว่าความหนืดที่ลดลงของเพกตินนี้เกิดจากการที่กรดไปตัดพันธะระหว่างโมเลกุลของกรดกาแล็กทูโรนิก ในขณะที่ Round *et al.* (2010) รายงานว่าการที่ความหนืดของสารละลายเพกตินลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการใช้กรดไฮโดรไลซ์เพกตินนั้น เกิดจากผลของกรดที่ทำให้สายพอลิเมอร์ของเพกตินที่พันตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ซับซ้อน (ประกอบไปด้วยส่วนของแรมโนกาแล็กทูโรแนน-1 และไฮโมกาแล็กทูโรแนน) เกิดการสลายตัวออกเป็นส่วนประกอบย่อยต่างๆ และทำให้เกิดการปลดปล่อยพอลิเมอร์ของไฮโมกาแล็กทูโรแนนออกมา ซึ่งไม่สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการไฮโดรไลซ์เพกตินโดยใช้กรดนั้นจะสามารถตัดพันธะระหว่างโมเลกุลของกรดกาแล็กทูโรนิกเดี่ยวๆ ได้

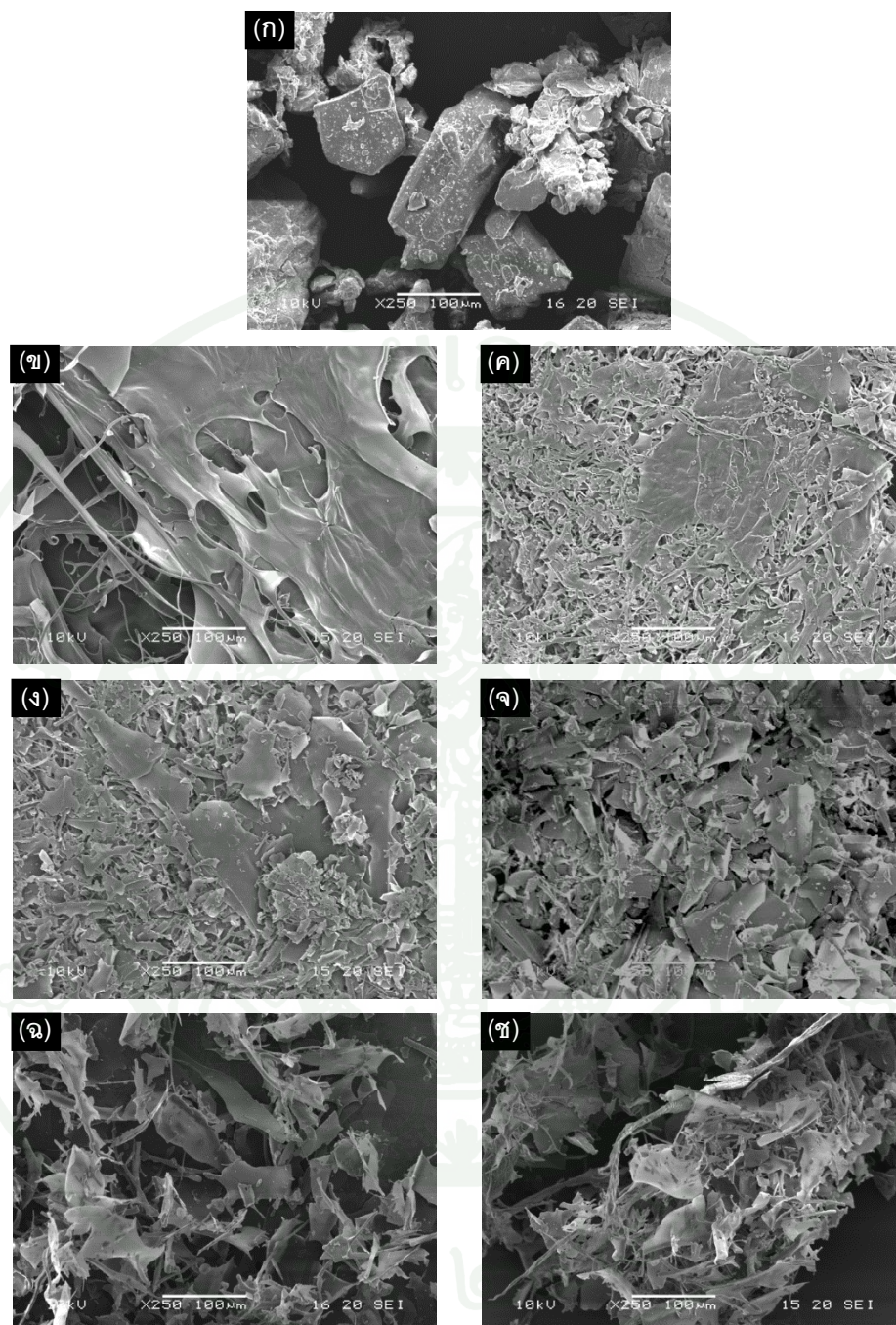
ตารางที่ 7 ความหนืดของสารละลายเพกทินทางการค้า และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด
นาน 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	ความหนืด (เซนติพอยส์)
เพกทินทางการค้า	33.83 ^a ±0.67
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 ชม.	9.81 ^b ±0.04
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 24 ชม.	3.47 ^c ±0.07
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 48 ชม.	2.01 ^d ±0.00
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 72 ชม.	1.96 ^d ±0.05
เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 96 ชม.	1.93 ^d ±0.01

หมายเหตุ ^{a-d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

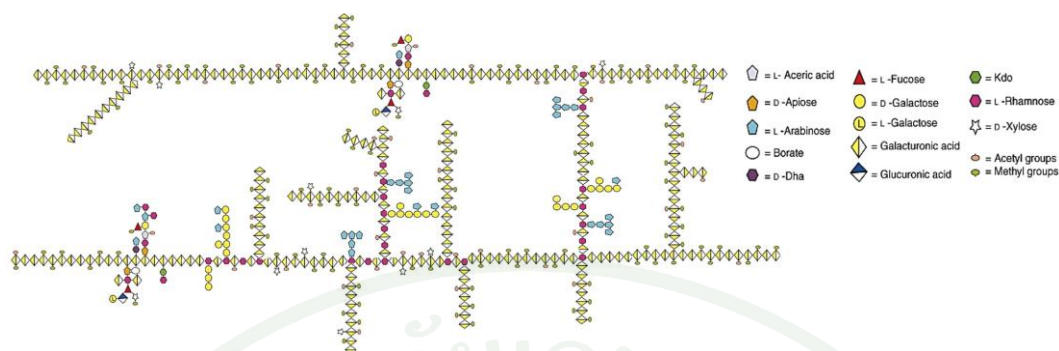
2.5 โครงสร้างระดับจุลภาคของเพกทิน

ผลการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของเพกทินแสดงในภาพที่ 19 จากภาพจะเห็นได้ว่าตัวอย่างเพกทินทางการค้ามีลักษณะโครงสร้างเป็นเม็ดหยาบ (granular structure) ในขณะที่ตัวอย่างเพกทินควบคุมซึ่งผ่านกระบวนการไดอะไลซิส และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นบาง (flake-like lamella structure) เมื่อเพกทินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ถึง 48 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางของเพกทินค่อยๆ ถูกเปลี่ยนให้มีขนาดเล็กลง และจะถูกทำให้มีขนาดเล็กลงจนกลายเป็นชิ้นเล็กๆ เมื่อเพกทินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดในระยะเวลา 72 ถึง 96 ชั่วโมง จึงอาจสรุปได้ว่าการไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรด ส่งผลให้โครงสร้างของเพกทินแตกออกเป็นชิ้นส่วนที่เล็กลง โดยเมื่อไฮโดรไลซ์เพกทินในระยะเวลาที่นานขึ้น ยิ่งส่งผลให้โครงสร้างของเพกทินมีขนาดเล็กลง

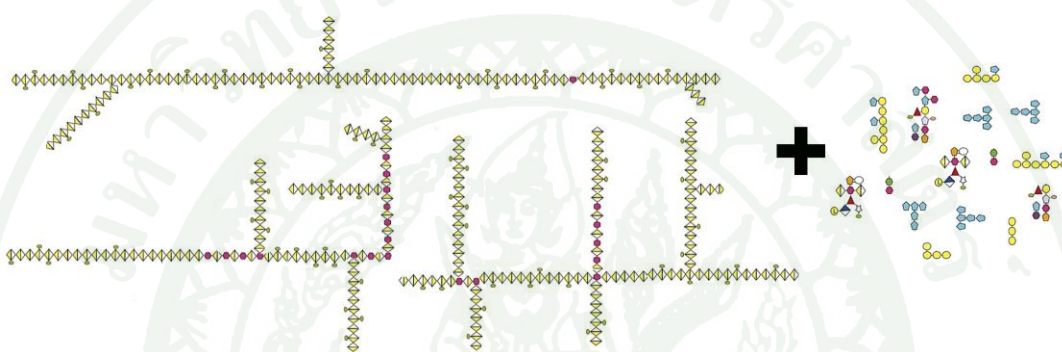


ภาพที่ 19 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่าง (ก) เพกทินทางการค้า, (ข) เพกทินควบคุม, (ค) เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6, (ง) 24, (จ) 48, (ฉ) 72 และ (ช) 96 ชั่วโมง

จากผลการทดลองในตอนี่ 2 นี้ สามารถคาดคะเนกลไกการสลายตัวของโมเลกุลเพกตินจากการถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดได้ ดังแสดงในภาพที่ 20 เพกตินซึ่งเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อน ประกอบไปด้วยส่วนของไฮโมกาแล็กทูโรแนน โดยที่บนสายพอลิเมอร์นี้ มักมีหมู่เมทิลมาสร้างพันธะเอสเทอร์อยู่กับหมู่คาร์บอกซิลของกรดกาแล็กทูโรนิก หรือมีโมเลกุลน้ำตาลเกาะกับโมเลกุลของกรดกาแล็กทูโรนิก และนอกจากนี้ยังมีส่วนของแรมโนกาแล็กทูโรแนน-1 และแรมโนกาแล็กทูโรแนน-2 (Mohnen, 2008) (ภาพที่ 20ก) เมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดในช่วงระยะเวลา 6 ชั่วโมงแรก จะเกิดการสลายตัวของโซ่กิ่งของโมเลกุลน้ำตาลที่เกาะอยู่บนสายของเพกติน (Round *et al.*, 2010) และเกิดการสลายพันธะเอสเทอร์ของหมู่เมทิลบนสายเพกตินบางส่วน (ภาพที่ 20ข) เมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง จะทำให้พันธะเอสเทอร์ของหมู่เมทิลบนสายเพกตินเกิดการสลายตัวทั้งหมด อีกทั้งพันธะที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลแรมโนสที่แทรกอยู่ในสายพอลิเมอร์ของกรดกาแล็กทูโรนิกจะถูกตัดออกด้วยกรด ทำให้เกิดการสลายตัวของเพกตินออกเป็นส่วนประกอบย่อยต่างๆ และปลดปล่อยพอลิเมอร์ของไฮโมกาแล็กทูโรแนนออกมา (Round *et al.*, 2010) (ภาพที่ 20ค) และเมื่อเพกตินถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นเวลานาน 96 ชั่วโมง โครงสร้างของเพกตินที่เหลืออยู่ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของไฮโมกาแล็กทูโรแนนที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก และไฮโมกาแล็กทูโรแนนที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย จะค่อยๆ ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเฉพาะบริเวณส่วนปลายของสายพอลิเมอร์จนมีขนาดโมเลกุลเล็กลง (Kravtchenko *et al.*, 1993) (ภาพที่ 20ง)



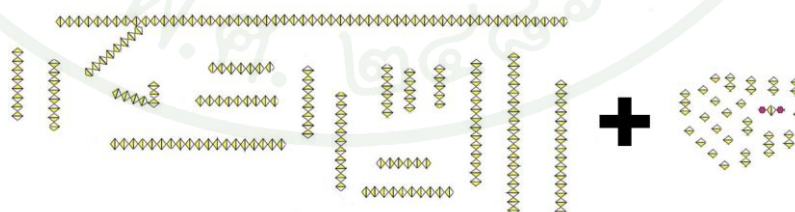
(ก) เพกตินที่ไม่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด



(ข) เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง



(ค) เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง



(ง) เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 96 ชั่วโมง

ภาพที่ 20 กลไกการการสลายตัวของเพกตินจากการถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 – 96 ชั่วโมง

ที่มา: ภาพ (ก) ดัดแปลงจาก Mohnen (2008)

ตอนที่ 3: ศึกษาผลของการใช้มะม่วงสุกบางส่วน และการเติมแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลซูโครส เพกทิน และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง

ในตอนที 3 นี้เป็นการปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยการใช้มะม่วงสุกบางส่วน นำมาผ่านกระบวนการเบื้องต้นก่อนการแช่เยือกแข็งด้วยแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลซูโครส รวมทั้งได้มีการนำเพกทิน และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดจากการทดลองตอนที่ 2 มาใช้ร่วมด้วย ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยเสริมสร้างโครงสร้างผนังเซลล์แก่มะม่วงก่อนการแช่เยือกแข็งและทำละลาย อีกทั้งการทดลองตอนที่ 3 นี้ ยังเพิ่มอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งมะม่วงให้มากกว่าในการทดลองตอนที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากกรณีการ (2555) ได้ศึกษาผลของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของมะม่วงสุกหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย พบว่ามะม่วงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องไครโอจินิก เมื่อนำมาทำละลายแล้วมีความแน่นเนื้อสูงกว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า หรือแบบปานกลาง ดังนั้นในตอนที 3 นี้ จึงได้เลือกใช้วิธีการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอัตราการแช่เยือกแข็งเท่ากับ 4.86 องศาเซลเซียส/นาที่ มาใช้ในการแช่เยือกแข็งมะม่วง จากนั้นนำตัวอย่างมะม่วงมาเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 และ 150 วัน นำมาทำละลายที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และนำมาตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย

การนำขึ้นมะม่วงมาแช่ในสารละลายเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยมุ่งหวังว่าขนาดโมเลกุลที่เล็กลงของเพกทินจะทำให้เพกทินสามารถผ่านเข้าไปสู่บริเวณผนังเซลล์พืช ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างผนังเซลล์พืชได้มากยิ่งขึ้น และยังช่วยให้เพกทินสามารถแพร่เข้าสู่เนื้อผลไม้ได้อย่างสม่ำเสมอมากขึ้น ในการทดลองตอนที่ 3 นี้ได้เลือกใช้เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 และ 48 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบว่าโครงสร้างระดับโมเลกุลของเพกทินที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดทั้งสองระดับนี้ จะมีผลต่อการแพร่เข้าไปในขึ้นมะม่วงและช่วยในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของมะม่วงหรือไม่

3.1 ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของมะม่วงก่อนการแช่เยือกแข็ง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งในแต่ละทรีตเมนต์ แสดงในตารางที่ 8

3.1.1 ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในขณะที่มะม่วงสุกบางส่วนที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส รวมทั้งแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 และ 48 ชั่วโมง มีปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับมะม่วงสุกบางส่วนที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์ ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากผลของการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีการออสโมซิสโดยใช้น้ำตาลซูโครส ทำให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากชั้นมะม่วงเข้าสู่สารละลายซูโครส ปริมาณความชื้นในชั้นมะม่วงจึงลดลง (Raoult-Wack, 1994)

3.1.2 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในขณะที่มะม่วงสุกบางส่วนที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส รวมทั้งแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 และ 48 ชั่วโมง มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เนื่องจากการแพร่ของแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลซูโครส และเพกทินเข้าสู่ชั้นมะม่วง

ตารางที่ 8 ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนการแช่เยือกแข็ง

คุณลักษณะ	ทรีตเมนต์					
	R	PR-Ctrl	PR-Ca+Su	PR-Ca+Su +Pectin	PR-Ca+Su +6h Pectin	PR-Ca+Su +48h Pectin
ปริมาณความชื้น (%)	78.82 ^{ab} ±0.25	79.80 ^a ±0.21	75.82 ^c ±0.16	77.24 ^{bc} ±0.21	76.62 ^c ±1.29	76.04 ^c ±1.42
ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (°บริกซ์)	22.75 ^{bc} ±1.13	21.83 ^c ±0.40	25.13 ^{ab} ±0.32	25.65 ^a ±1.48	24.68 ^{ab} ±1.31	25.28 ^a ±0.18
ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (% ของกรดมาลิก)	0.08 ^c ±0.02	0.34 ^{ab} ±0.09	0.43 ^a ±0.01	0.30 ^b ±0.01	0.32 ^{ab} ±0.02	0.38 ^{ab} ±0.03

หมายเหตุ R = มะม่วงสุก, PR = มะม่วงสุกบางส่วน, Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ซูโครส, Pectin = เพกทินทางการค้า, 6h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลส์ 6 ชม. และ 48h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลส์ 48 ชม.

^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันในแต่ละทรีตเมนต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

3.1.3 ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้

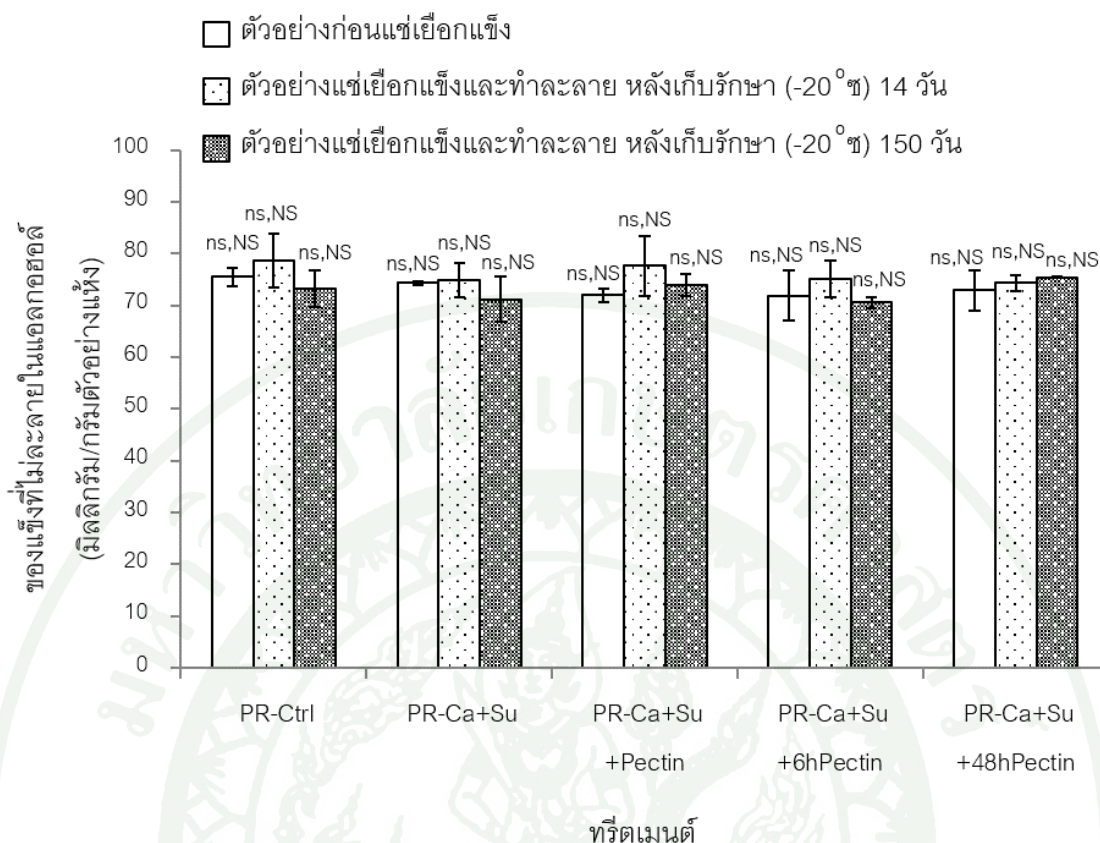
ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของมะม่วงสุกมีค่าน้อยกว่ามะม่วงสุกบางส่วน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เนื่องจากในระหว่างกระบวนการสุกกรดในผลไม้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการหายใจ (Medlicott and Tompson, 1985) ในขณะที่มะม่วงสุกบางส่วนที่ไม่ผ่าน และผ่านการทรีตเมนต์มีปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

3.2 ปริมาณเพกทิน

3.2.1 ของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (alcohol insoluble solids)

ของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ (alcohol insoluble solids) หรือ AIS คือ องค์ประกอบของผนังเซลล์พืชที่ถูกสกัดด้วยการตกตะกอนโดยใช้แอลกอฮอล์ ซึ่งประกอบด้วย โปรตีน สตาร์ช และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช (non-starch polysaccharides) ได้แก่ เพกทิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส (Reinders and Their, 1998; จริงแท้, 2549)

จากการวิเคราะห์ค่า AIS ของตัวอย่างมะม่วงสด และมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส นาน 14 และ 150 วัน ดังแสดงในภาพที่ 21 และ ตารางผนวกที่ ค2 ผลการทดลองพบว่าค่า AIS ของตัวอย่างมะม่วงสด และมะม่วงแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษานาน 14 และ 150 วัน ในแต่ละทรีตเมนต์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) โดยมีค่า AIS อยู่ในช่วง 70 - 79 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้ง สอดคล้องกับผลการทดลองของกรรณิการ์ (2555) ที่รายงานว่าตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วต่างกัน 3 แบบ คือ แบบเร็ว แบบปานกลาง และแบบช้า และผ่านการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำรอบที่ 1, 2 และ 3 มีค่า AIS ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้สันนิษฐานว่า เนื่องจากการแช่เยือกแข็งไม่ได้เปลี่ยนองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช เช่นเดียวกับผลการวิจัยของ Sirijariyawat and Charoenrein (2013) ที่รายงานว่า การแช่เยือกแข็งไม่มีผลต่อค่า AIS ของ แอปเปิ้ล มะม่วง แคนตาลูป และสับปะรด โดยการเปลี่ยนแปลงของ AIS ในผลไม้ส่วนใหญ่มาจาก กระบวนการสุก ซึ่ง Rimkeeree and Charoenrein (2014) ได้รายงานว่าค่า AIS ของตัวอย่าง มะม่วงลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมะม่วงมีระดับความสุกมากขึ้น เนื่องจากระหว่างกระบวนการสุก



ภาพที่ 21 ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

หมายเหตุ PR = มะม่วงสุกบางส่วน, Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ซูโครส, Pectin = เพกทินทางการค้า, 6h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 ชม. และ 48h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 48 ชม.

^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละทรีตเมนต์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

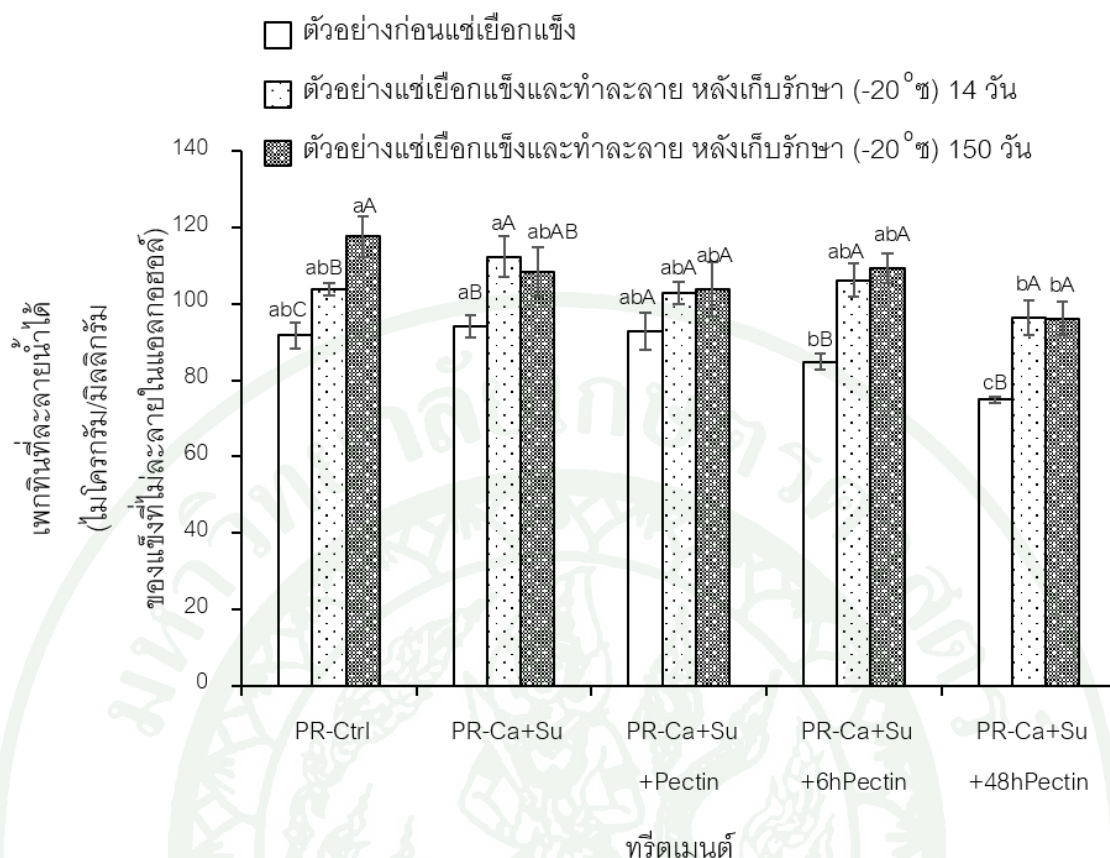
^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระยะเวลาการเก็บรักษาไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

ของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์จะถูกทำให้สลายตัวเป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดสั้นลง กลายเป็นของแข็งที่ละลายได้ในแอลกอฮอล์ นอกจากนี้การลดลงของค่า AIS ยังอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงแปงไปเป็นน้ำตาลที่ละลายได้ และการเปลี่ยนเส้นใย (fiber) ไปเป็นของแข็งที่ละลาย

ได้ในแอลกอฮอล์อีกด้วย (El-Zoghbi, 1994) ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่ากระบวนการแช่เยือกแข็งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของ AIS

3.2.2 เพกทินที่ละลายน้ำได้ (water soluble pectin)

ปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ของตัวอย่างมะม่วงก่อนแช่เยือกแข็ง และมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสนาน 14 และ 150 วัน แสดงในภาพที่ 22 และตารางผนวกที่ ค3 ผลการทดลองพบว่าปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ของตัวอย่างมะม่วงก่อนแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์ และที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส หรือแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมงมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ในแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง มีปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุด ($P < 0.05$) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการที่ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยสารละลายเพกทินถูกแช่อยู่ในสารละลายเป็นเวลานานรวม 2 ชั่วโมง จึงทำให้เกิดการสลายตัวของเพกทินบริเวณผนังเซลล์ และมิถิเลลลามอลล่ากลายเป็นเพกทินที่ละลายน้ำแล้วหลุดออกจากชิ้นตัวอย่างตั้งแต่วินาทีแรกของการแช่ตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็ง สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Prinzivalli *et al.* (2006) ที่รายงานว่าการแช่ตัวอย่างสตรอเบอรี่ในสารละลายออสโมติกนาน 2 ชั่วโมงขึ้นไป ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนเพกทินซึ่งเป็นเพกทินที่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำลดลง เนื่องจากระยะเวลาในการแช่ตัวอย่างที่นานขึ้นทำให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบเพกทินบริเวณผนังเซลล์และมิถิเลลลามอลล่า กลายเป็นเพกทินที่สามารถละลายน้ำได้ นอกจากนี้การแพร่ของเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง ซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กนั้นสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้ โดยที่โครงสร้างระดับโมเลกุลของตัวอย่างเพกทินนี้ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ของไฮโดรอกซีแอลกอฮอล์ที่ไม่มีหมู่เมทิลมาเกาะบนสายพอลิเมอร์ เพกทินที่มีหมู่คาร์บอกซิลอิสระนี้จึงสามารถเกิดพันธะเชื่อมไฮโดรเจนกับแคลเซียมไอออนที่เติมลงไปได้ดี เกิดเป็นโครงสร้างแคลเซียมเพกเตต egg-box model ที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์นี้มีปริมาณเพกทินที่ละลายน้ำได้ลดลง ในขณะที่การทรีตเมนต์ตัวอย่างมะม่วงด้วยเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง ซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยส่วนของโซ่กิ่ง และยังคงมีพันธะเอสเทอร์ของหมู่เมทิลบนโมเลกุลของกรดกาแล็กทูโรนิก ทำให้สายพอลิเมอร์ของเพกทินเกิดพันธะเชื่อมไฮโดรเจนกับแคลเซียมได้น้อยกว่า จึงอาจเกิดการสลายตัวของเพกทินที่เติมเข้าไปกลายเป็นเพกทินที่ละลายน้ำระหว่างขั้นตอนการแช่ตัวอย่าง



ภาพที่ 22 ปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้ของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

หมายเหตุ PR = มะม่วงสุกบางส่วน, Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ชูโครส, Pectin = เพกตินทางการค้า, 6h Pectin = เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลส์ 6 ชม. และ 48h Pectin = เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลส์ 48 ชม.

^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันในแต่ละทรีตเมนต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

เมื่อพิจารณาผลของการแช่เยือกแข็งและทำละลายต่อปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้ของตัวอย่างมะม่วงพบว่ามะม่วงแช่เยือกแข็งมีปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้เพิ่มมากขึ้นในทุกทรีตเมนต์ เนื่องจากการแช่เยือกแข็งทำให้น้ำภายในเซลล์เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็น

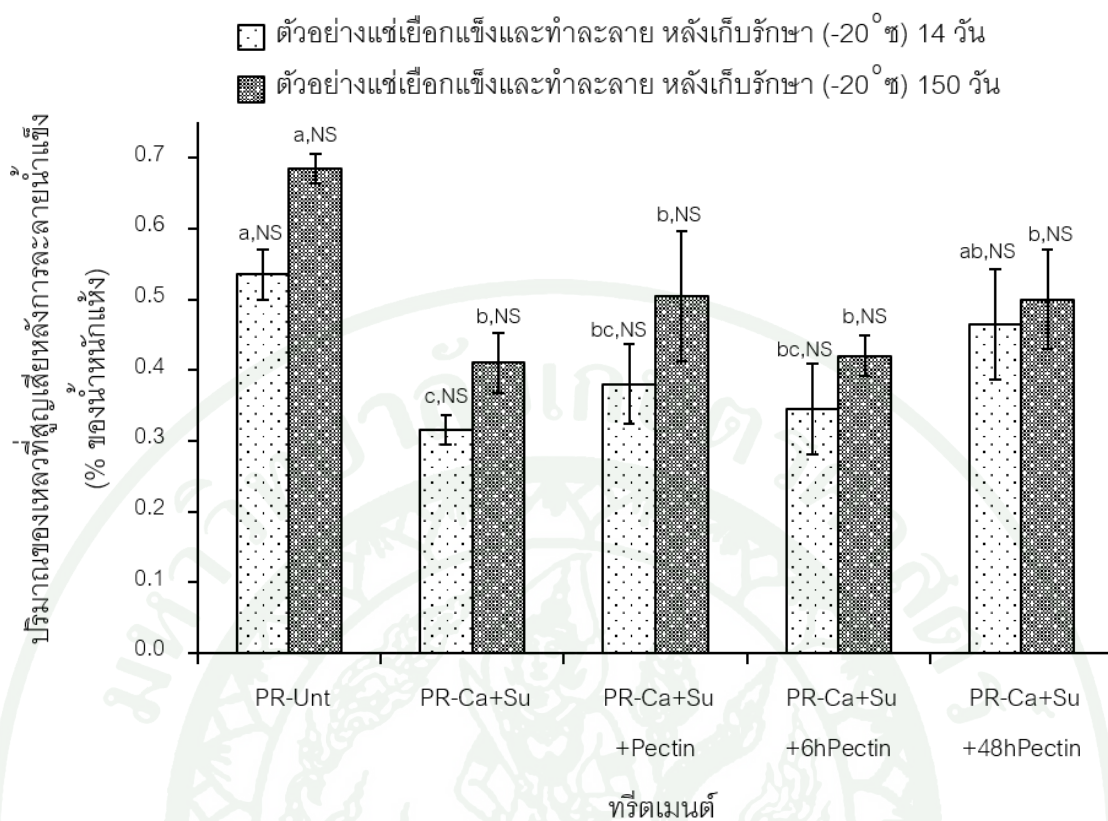
น้ำแข็ง ซึ่งเมื่อน้ำกลายเป็นน้ำแข็งปริมาตรน้ำจะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเสียหายกับผนังเซลล์ของผลไม้ เพกตินที่ผนังเซลล์เกิดการสลายตัว ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลของเพกตินจากในรูปที่ไม่ละลายเปลี่ยนเป็นเพกตินในรูปที่ละลายได้ ทำให้ปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้สูงขึ้น (สุพัตรา และ สงวนศรี, 2554) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Rimkeeree and Charoenrein (2014) ที่รายงานวามะม่วงแช่เยือกแข็งมีปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมะม่วงสด เนื่องจากการสลายตัวของโครงสร้างผนังเซลล์ที่มีสาเหตุมาจากการเกิดผลึกน้ำแข็ง และการละลายของน้ำแข็งระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งและทำละลาย และเมื่อพิจารณาระยะเวลาการเก็บรักษามะม่วงแช่เยือกแข็งต่อปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้ พบว่าตัวอย่างมะม่วงแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์มีปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้สูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ($P < 0.05$) ในขณะที่ปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้ของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ก่อนการแช่เยือกแข็งไม่แตกต่างกันเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจาก 14 วัน เป็น 150 วัน ($P \geq 0.05$)

3.3 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง

ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสนาน 14 และ 150 วัน แสดงในภาพที่ 23 และตารางผนวกที่ ค4 ผลการทดลองพบว่ามะม่วงสุกบางส่วนที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์มีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งสูงที่สุด ($P < 0.05$) ในขณะที่มะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส รวมทั้งแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกตินทางการค้า หรือเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 6 และ 48 ชั่วโมง มีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งลดลง เนื่องจากการลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีออสโมซิสทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถกลายเป็นน้ำแข็งได้ลดลง ส่งผลให้ความเสียหายของเซลล์จากการเกิดผลึกน้ำแข็งลดลง (Marani *et al.*, 2001) รวมทั้งผลของแคลเซียมแลคเตทที่ช่วยรักษาโครงสร้างผนังเซลล์ด้วยการเกิดพันธะเชื่อมข้ามกับเพกตินเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมเพกเตทซึ่งไม่ละลายน้ำ เพิ่มความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์ ทำให้การสูญเสียน้ำออกจากเซลล์หลังการละลายน้ำแข็งลดลง (Reno *et al.*, 2011) อีกทั้งเพกตินที่แพร่เข้าไปยังช่วยให้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งลดลง โดย Xie and Zhao (2004) รายงานว่าการแช่สตรอเบอร์รี่ในสารละลายเพกตินก่อนการแช่เยือกแข็ง ช่วยลดปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง โดยที่เพกตินจะแพร่เข้าไปอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างเซลล์ ช่วยกักเก็บน้ำในชั้นผลไม้ ลดการ

สูญเสียน้ำหนักออกจากเซลล์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Buggenhout *et al.* (2006) ที่รายงานว่า เพกทินช่วยลดปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง เนื่องจากเพกทินที่เติมลงไปจะไปเคลือบอยู่ที่ผิวของชิ้นผลไม้ จำกัดการสูญเสียของเหลวของชิ้นผลไม้หลังการทำละลาย อีกทั้ง Maity *et al.* (2011) ยังรายงานว่า การเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) เช่น เพกทินลงไป ในแครอทก่อนการแช่เยือกแข็ง ช่วยให้แครอทมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งลดลง เนื่องจากสารไฮโดรคอลลอยด์มีความสามารถในการจับกับน้ำ (water-binding capacity) ได้ดี แต่อย่างไรก็ตามการทดลองนี้พบว่าปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง มีแนวโน้มสูงกว่าตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์อื่น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรดเป็นเวลานาน ทำให้ให้เพกทินมีน้ำหนักโมเลกุล และระดับเอสเทอริฟิเคชันต่ำลง (ตอนที่ 2) ซึ่งอาจส่งผลให้ความสามารถในการจับกับน้ำของเพกทินลดลง เนื่องจากมีงานวิจัยที่ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุล และระดับเอสเทอริฟิเคชันของเพกทินต่อคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ (water-sorption properties) พบว่าแอปเปิ้ลเพกทินซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และระดับเอสเทอริฟิเคชันมากกว่าเพกทินที่สกัดจากดอกทานตะวัน มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำดีกว่า (Panchev *et al.*, 2010) นอกจากนี้การแช่ตัวอย่างมะม่วงในสารละลายเป็นเวลานาน ยังทำให้เกิดการสลายตัวของเพกทินบริเวณผนังเซลล์ และมิดเดิลลามেলা (Prinzivalli *et al.*, 2006) ทำให้โครงสร้างผนังเซลล์ของตัวอย่างมะม่วงไม่แข็งแรง จึงส่งผลให้มะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง มีปริมาณน้ำที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งค่อนข้างสูงกว่าตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์อื่น

เมื่อพิจารณาระยะเวลาการเก็บรักษามะม่วงแช่เยือกแข็งต่อปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง พบว่าปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของตัวอย่างมะม่วงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นในทุกทรีตเมนต์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Simandjuntak *et al.* (1996) ที่รายงานว่า เมลอนแช่เยือกแข็งมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 10 เดือน โดยอาจมีสาเหตุมาจากความเสียหายทางกลเนื่องจากการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งระหว่างการเก็บรักษา ตัวอย่างในตู้แช่เยือกแข็ง ส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่ผนังเซลล์ หรือจากการทำงานของเอนไซม์ที่เร่งการสลายตัวของผนังเซลล์ และเยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลให้ผลไม้แช่เยือกแข็งมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น



ภาพที่ 23 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์

หมายเหตุ PR = มะม่วงสุกบางส่วน, Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ซูโครส, Pectin = เพกทินทางการค้า, 6h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 ชม. และ 48h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 48 ชม.

^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันในแต่ละทรีตเมนต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระยะเวลาการเก็บรักษาไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

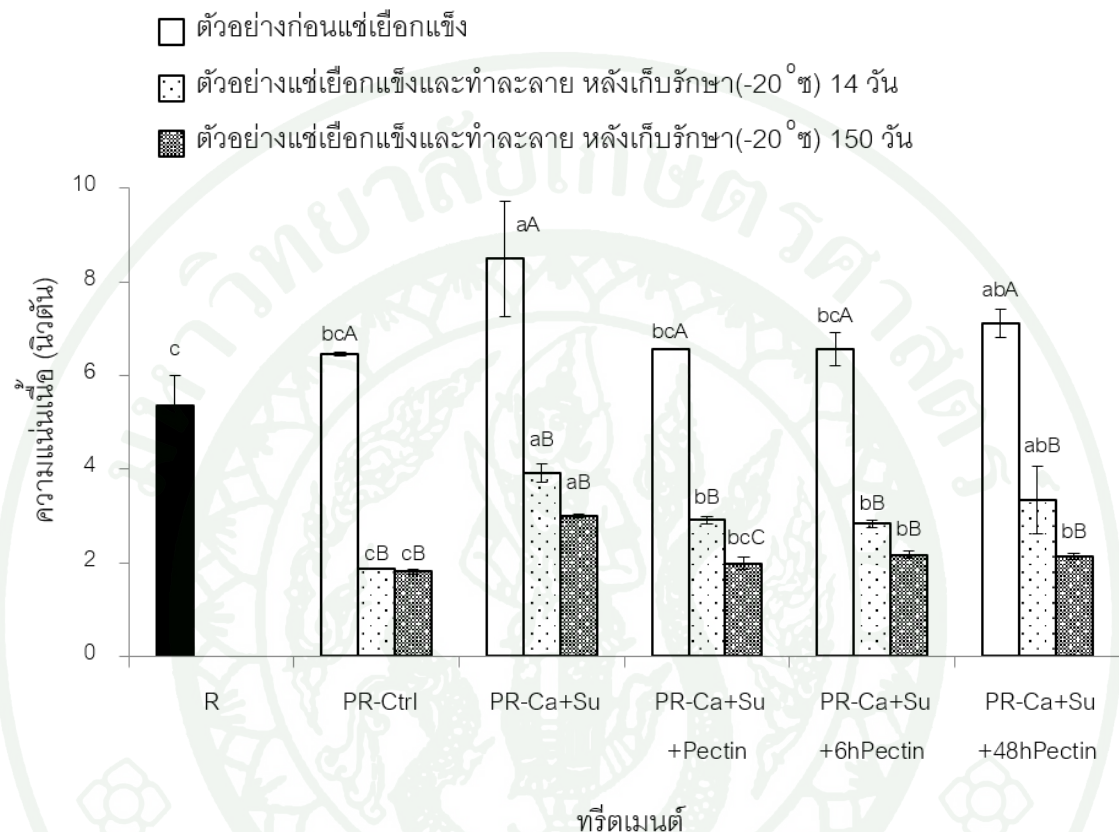
3.4 ความแน่นเนื้อ

ค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส นาน 14 และ 150 วัน แสดงในภาพที่ 24 และตารางผนวกที่ ค5 เมื่อพิจารณาตัวอย่างมะม่วงก่อนแช่เยือกแข็ง พบว่ามะม่วงสุกบางส่วนมีความแน่นเนื้อมากกว่ามะม่วงสุกเนื่องจากโครงสร้างผนังเซลล์ที่แข็งแรงของมะม่วงสุกบางส่วน ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้จากผลการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกจากการทดลองตอนที่ 1 (ภาพที่ 14) ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ พบว่าผลของการแช่มะม่วงในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส ทำให้มะม่วงมีความแน่นเนื้อสูงที่สุด สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Pereira *et al.* (2007) ที่รายงานว่าฝรั่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทและน้ำตาลซูโครสมีค่าความแน่นเนื้อสูงขึ้นเนื่องจากกระบวนการออกซิเดชันด้วยสารละลายน้ำตาลซูโครสทำให้ชั้นฝรั่งมีความยืดหยุ่น และทนต่อการเปลี่ยนรูปได้ดีขึ้น อีกทั้งแคลเซียมแลคเตทยังช่วยรักษาโครงสร้างผนังเซลล์พืช โดยเกิดการเชื่อมโยงข้ามระหว่างแคลเซียมไอออนกับหมู่คาร์บอกซิลบนสายเพกทินเกิดเป็นแคลเซียมเพกเตตที่ไม่ละลายน้ำ ช่วยเพิ่มความแน่นแข็งให้กับโครงสร้างผนังเซลล์ของผลไม้ ในขณะที่ตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง มีค่าความแน่นเนื้อไม่ต่างกับตัวอย่างมะม่วงสุกบางส่วนที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง มีแนวโน้มค่าความแน่นเนื้อสูงกว่าตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลของการไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรดทำให้เพกทินมีขนาดโมเลกุลเล็กลงสามารถแพร่เข้าไปในชั้นมะม่วงได้ดีขึ้น จึงสามารถเข้าไปช่วยจับกับแคลเซียมไอออนที่เดิมเข้าไป เกิดเป็นโครงสร้างแคลเซียมเพกเตต egg-box model ส่งผลให้โครงสร้างผนังเซลล์ของมะม่วงมีความแข็งแรงสูงขึ้น (Reno *et al.*, 2011)

ผลของการแช่เยือกแข็งและทำลายต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงที่เก็บรักษานาน 14 วัน พบว่ามะม่วงแช่เยือกแข็งมีค่าความแน่นเนื้อลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างสดในทุกทรีตเมนต์ โดยที่มะม่วงสุกบางส่วนที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์มีค่าความแน่นเนื้อหลังการแช่เยือกแข็งและทำลายต่ำที่สุด ($P < 0.05$) ในขณะที่มะม่วงสุกบางส่วนที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียม

แลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสมีความแน่นเนื้อสูงที่สุด เนื่องจากผลของการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีออสโมซิส ทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถกลายเป็นน้ำแข็งได้น้อยลง ความเสียหายของเนื้อสัมผัสมะม่วงแช่เยือกแข็งจากผลึกน้ำแข็งจึงน้อยลง ร่วมกับผลของแคลเซียมแลคเตทที่ช่วยรักษาโครงสร้างผนังเซลล์ของมะม่วงทำให้มะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์นี้มีค่าความแน่นเนื้อหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายสูงที่สุด (Gras *et al.*, 2003; Ohnishi and Miyawaki, 2005) ในขณะที่มะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง มีค่าความแน่นเนื้อรองลงมา ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง จนมีขนาดโมเลกุลเล็กลงสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้ ทำให้การแพร่ของแคลเซียมแลคเตท และน้ำตาลซูโครสผ่านผนังเซลล์ได้น้อยลง เนื่องจากทั้งเพกทิน แคลเซียม และน้ำตาลซูโครสนั้นจำเป็นต้องใช้พื้นที่ว่างบริเวณผนังเซลล์ที่มีอยู่อย่างจำกัดร่วมกัน (Xie and Zhao, 2004) ทำให้ผลของการป้องกันการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสจากแคลเซียมแลคเตท และน้ำตาลซูโครสลดลง นอกจากนี้การแช่ตัวอย่างมะม่วงในสารละลายเป็นเวลานานยังอาจทำให้เกิดการสลายตัวของเพกทินบริเวณผนังเซลล์ และมิดเดิลลามেলা (Prinzivalli *et al.*, 2006) ทำให้โครงสร้างผนังเซลล์ของตัวอย่างมะม่วงไม่แข็งแรง ค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง จึงน้อยกว่ามะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมงนี้มีแนวโน้มค่าความแน่นเนื้อสูงกว่ามะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง เนื่องจากขนาดโมเลกุลที่เล็กลงทำให้เพกทินสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้ดีขึ้น จึงช่วยจับกับแคลเซียมไอออน เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์มะม่วงได้ ในขณะที่เพกทินทางการค้า และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า ทำให้การแพร่ของเพกทินเข้าสู่ชั้นมะม่วงนั้นไม่สม่ำเสมอหรือเข้าไปไม่ได้มาก โดยเพกทินบางส่วนที่สามารถแพร่เข้าไปในชั้นมะม่วงจะไม่สามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้ เนื่องจากมีขนาดโมเลกุลใหญ่ ในขณะที่เพกทินบางส่วนจะไปเคลือบอยู่ที่ผิวของมะม่วงจำกัดการแพร่ของแคลเซียมแลคเตทและน้ำตาลซูโครสเข้ามาในเซลล์มะม่วง ทำให้ผลของแคลเซียมแลคเตทและน้ำตาลซูโครสในการช่วยป้องกันความเสียหายทางด้านเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองของ Buggenhout *et al.* (2006) ที่รายงานว่าความแน่นเนื้อของสตรอเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่ในสารละลายเพกทินผสมเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส และแคลเซียมคลอไรด์ก่อนการแช่เยือกแข็งน้อยกว่าตัวอย่างสตรอเบอร์รี่ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส และแคลเซียมคลอไรด์เท่านั้น เนื่องจาก

เพกทินจะไปเคลือบอยู่ที่ผิวของสตรอเบอรี่มากกว่าที่จะถูกแพร่เข้าไปเนื้อสตรอเบอรี่ ทำให้การแพร่ของเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส และแคลเซียมคลอไรด์เข้าไปในสตรอเบอรี่ไปเป็นได้อย่างจำกัด



ภาพที่ 24 ค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสของมะม่วงสุก และมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

หมายเหตุ R = มะม่วงสุก (ตัวอย่างอ้างอิง), PR = มะม่วงสุกบางส่วน, Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ซูโครส, Pectin = เพกทินทางการค้า, 6h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 ชม. และ 48h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 48 ชม.

^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันในแต่ละทรีตเมนต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

เมื่อพิจารณาระยะเวลาการเก็บรักษามะม่วงแช่เยือกแข็งต่อความแน่นเนื้อ พบว่าค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษานาน 150 วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างมะม่วงแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษานาน 14 วัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rincon and Kerr (2010) ที่รายงานวาระยะเวลาการเก็บรักษามะม่วงแช่เยือกแข็งที่นานขึ้น เป็นสาเหตุให้ความแน่นเนื้อของมะม่วงแช่เยือกแข็งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยอาจมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นขนาดของผลึกน้ำแข็งในระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากการตกผลึกซ้ำของน้ำแข็ง (ice recrystallization) ซึ่งอาจเกิดจากสภาวะในการเก็บรักษาที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นลง (temperature fluctuation) นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากโครงสร้างผนังเซลล์ที่เปราะบางของมะม่วง (Kerr, 2004) แต่อย่างไรก็ตามมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสยังคงรักษาคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงได้ดีที่สุดแม้ว่าระยะเวลาการเก็บรักษาจะนานถึง 150 วัน โดยมีค่าความแน่นเนื้อสูงที่สุดเมื่อเทียบกับมะม่วงแช่เยือกแข็งจากทรีตเมนต์อื่น ($P < 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสุกที่ใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง (5.36 นิวตัน) พบว่าหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายมะม่วงสุกบางส่วนที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแคลเซียมแลคเตทและน้ำตาลซูโครสมีค่าความแน่นเนื้อเท่ากับ 3.00 นิวตัน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแน่นเนื้อที่ลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างมะม่วงอ้างอิง เท่ากับ 44.03%

และเมื่อพิจารณาผลของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งต่อความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษานาน 14 วัน โดยเปรียบเทียบตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสซึ่งเป็นทรีตเมนต์ที่ให้ผลดีที่สุดในการช่วยรักษาคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วง ระหว่างการแช่เยือกแข็งมะม่วงแบบช้าจากการทดลองตอนที่ 1 (ภาพที่ 12, ตารางผนวกที่ ค1) กับการแช่เยือกแข็งมะม่วงแบบเร็วจากการทดลองตอนที่ 3 ทั้งนี้ในการทดลองตอนที่ 1 และ ตอนที่ 3 ใช้อัตราส่วนเนื้อผลไม้ต่อสารละลายในการแช่ตัวอย่างแตกต่างกัน คือ อัตราส่วนเนื้อผลไม้ต่อสารละลายเท่ากับ 1:4 และ 1:2.5 ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนเนื้อผลไม้ต่อสารละลายที่ใช้ในการทดลองอาจมีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) ระหว่างกระบวนการออสโมซิส ดังที่ Bongirwar and Sreenivasan (1997) รายงานว่าการใช้อัตราส่วนเนื้อผลไม้ต่อสารละลายลดลงจาก 1:4.5 เป็น 1:1 ส่งผลให้น้ำหนักที่ลดลง (weight loss) ของตัวอย่างกล้วยมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความแน่นเนื้อของมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีค่าสูงกว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า ถึงแม้จะใช้อัตราส่วนเนื้อผลไม้ต่อสารละลายในการแช่ตัวอย่างน้อยกว่า โดยที่ตัวอย่างมะม่วงที่แช่เยือกแข็งแบบเร็วมีเปอร์เซ็นต์ความแน่นเนื้อที่ลดลงหลังจากการแช่เยือกแข็งและทำละลายเท่ากับ 53.94% น้อยกว่ามะม่วงที่

แช่เยือกแข็งแบบช้า (73.03%) สอดคล้องกับผลการทดลองของกรรณิการ์ (2552) ที่รายงานว่า มะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีค่าความแน่นเนื้อสูงกว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และแบบช้า ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำลายเนื้อสัมผัส น้อยกว่าอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ภายนอก เซลล์ซึ่งทำลายโครงสร้างของเซลล์ได้มากกว่า (Charoenrein and Reid, 1989) ทำให้มะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีความแน่นเนื้อสูงกว่า และมีเปอร์เซ็นต์ความแน่นเนื้อที่ลดลงน้อยกว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า

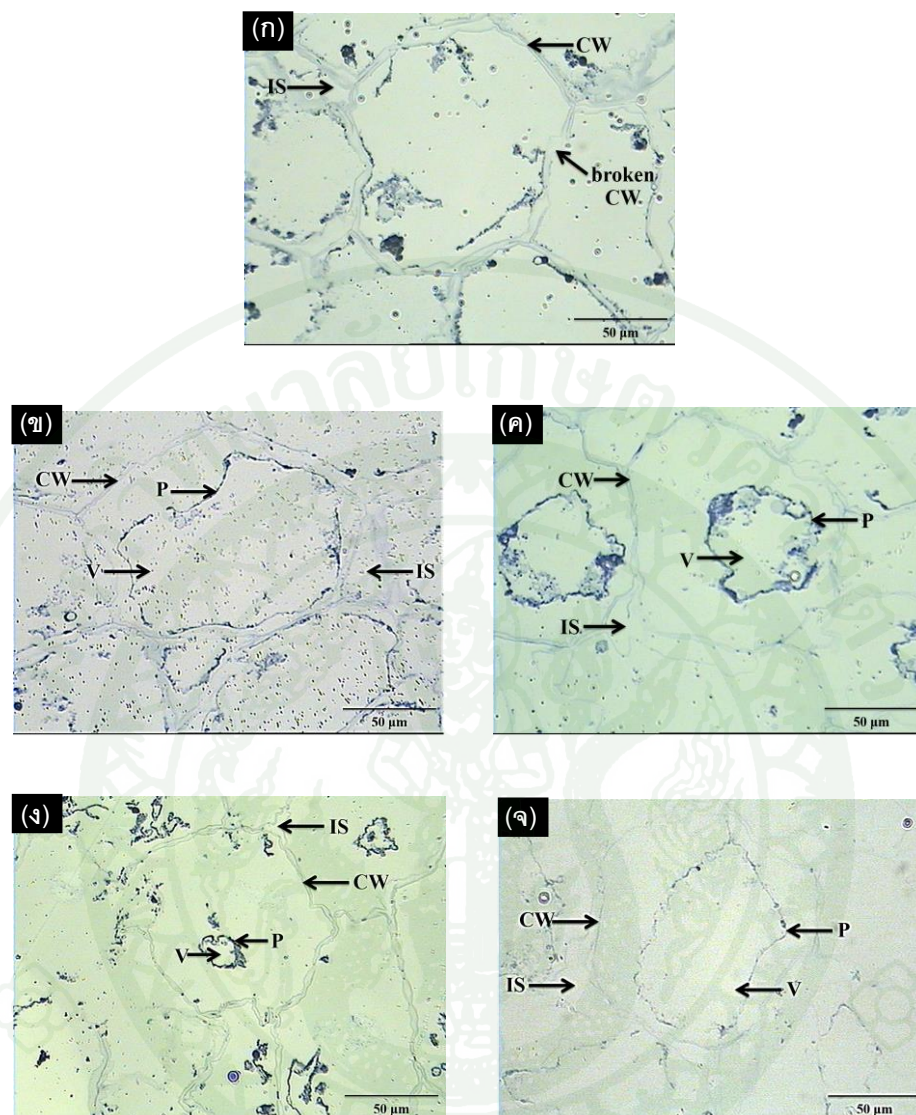
3.5 โครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงแช่เยือกแข็ง

โครงสร้างระดับจุลภาคภายในของเนื้อเยื่อมะม่วงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งในแต่ละ ทรีตเมนต์สองด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน แสดงในภาพที่ 25 แสดงให้เห็นว่ามะม่วงสุก บางส่วนที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์นั้นได้รับความเสียหายเนื่องจากการแช่เยือกแข็งมากที่สุด โดยจะเห็น ได้จากผนังเซลล์ และเยื่อหุ้มเซลล์ที่ฉีกขาด (ภาพ 25ก) ทำให้ไม่สามารถรักษาความดันเต่งภายใน เซลล์ไว้ได้ ส่งผลให้หลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายมะม่วงมีค่าความแน่นเนื้อต่ำที่สุดเมื่อ เปรียบเทียบกับมะม่วงสุกบางส่วนที่ผ่านการทรีตเมนต์ แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างระดับจุลภาค ภายในเนื้อเยื่อมะม่วงสุกบางส่วนที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์ แต่ใช้การแช่เยือกแข็งแบบเร็วนี้ เซลล์ ได้รับความเสียหายจากการแช่เยือกแข็งน้อยกว่ามะม่วงสุกบางส่วนที่แช่เยือกแข็งแบบช้า (ตอนที่ 1) โดยที่เซลล์ยังคงรูปร่างได้ดีกว่า ในขณะที่มะม่วงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า โครงสร้าง ผนังเซลล์ และเยื่อหุ้มเซลล์เกิดความเสียหาย และเซลล์ไม่สามารถคงรูปร่างไว้ได้ (ภาพที่ 14 ก-2) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chassagne-Berces *et al.* (2009) ที่ศึกษาผลของอัตราเร็วในการแช่ เยือกแข็งต่อโครงสร้างระดับจุลภาคภายในเนื้อเยื่อของแอปเปิ้ล โดยรายงานว่าแอปเปิ้ลที่แช่เยือก แข็งแบบช้า จะเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ทำให้ผนังเซลล์ของแอปเปิ้ลมีรูปร่างผิดปกติ ในขณะที่ แอปเปิ้ลที่แช่เยือกแข็งแบบเร็ว เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก ทำให้โครงสร้างผนังเซลล์ของแอปเปิ้ลมี ลักษณะคล้ายกับแอปเปิ้ลสดที่สุด เช่นเดียวกับ Brown (1997) ที่รายงานว่า การแช่เยือกแข็งแบบ เร็วช่วยรักษาโครงสร้างผนังเซลล์พืชได้ดีกว่า เนื่องจากการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้เกิดผลึก น้ำแข็งขนาดเล็กจำนวนมาก ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำออกจากเซลล์ และความเสียหายของ ผนังเซลล์น้อยลง ทำให้เกิดความเสียหายต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสหลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย น้อยลง

ภาพที่ 25ข แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของเนื้อเยื่อมะม่วงแช่เยือกแข็งที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส พบว่าโครงสร้างผนังเซลล์พืชยังสามารถคงรูปร่างเดิมไว้ได้ใกล้เคียงเซลล์ของมะม่วงสดมากที่สุด เมื่อเทียบกับมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์อื่นๆ โดยเนื้อเยื่อของมะม่วงยังคงรักษาโครงสร้างผนังเซลล์ และเยื่อหุ้มเซลล์เอาไว้ได้ เนื่องจากการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีการออสโมซิสด้วยน้ำตาลซูโครส ทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถกลายเป็นน้ำแข็งได้ลดลง ความเสียหายของเนื้อเยื่อพืชจากผลึกน้ำแข็งจึงลดลง แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าการเกิดการหดตัวของเยื่อหุ้มเซลล์ เนื่องจากระบวนการออสโมซิส ทำให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ ซึ่งการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์จะถูกแทนที่ด้วยการเคลื่อนที่เข้ามาของสายละลายออสโมติก ทำให้เซลล์ที่ผ่านการออสโมซิสยังคงรูปร่างอยู่ได้ (Martínez-Monzó *et al.*, 1998) ในขณะที่การแพร่ของแคลเซียมแลคเตทเข้าสู่ชั้นมะม่วงช่วยรักษาโครงสร้างผนังเซลล์จากการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างแคลเซียมไอออนและสายเพกทินบริเวณเมดัลลาลาเมลล่า เกิดเป็นโครงสร้างแคลเซียมเพกเตทที่แข็งแรง (Alonso *et al.*, 2005) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของเซลล์มะม่วงสุกบางส่วนที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสมีความสมบูรณ์ที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแน่นเนื้อที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับมะม่วงทรีตเมนต์อื่น

เมื่อพิจารณาผลของการแช่เพกทินต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของเนื้อเยื่อมะม่วงแช่เยือกแข็ง พบว่ามะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง โครงสร้างบางส่วนของผนังเซลล์มีรอยแตก หรือรอยยับ และเยื่อหุ้มเซลล์หดตัวจนมีขนาดเล็กลง โดยเฉพาะตัวอย่างที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง (ภาพที่ 25ค และ ง) แต่อย่างไรก็ตามมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง ยังคงรักษาสภาพเซลล์ได้ดีกว่ามะม่วงที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์ ส่งผลให้ตัวอย่างมะม่วงมีค่าความแน่นเนื้อสูงกว่า และมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งต่ำกว่า ตัวอย่างมะม่วงที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Reno *et al.* (2011) ที่ศึกษาผลของการแช่สตรอเบอรี่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ผสมน้ำตาลกลูโคส และเพกทินต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็ง ซึ่งรายงานว่าการแช่เพกทินช่วยป้องกันความเสียหายของเซลล์จากการแช่เยือกแข็ง โดยการใช้เพกทินความเข้มข้นสูง (มากกว่า 2%) ทำให้การเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งบริเวณช่องว่างระหว่างเซลล์เกิดขึ้นช้าลง การหดตัวของเซลล์ลดลง เซลล์จึงยังคงรักษาความดันเต่งไว้ได้ ส่งผลให้ตัวอย่างสตรอเบอรี่ยังคงมีความแน่นเนื้อสูง และมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งลดลง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างมะม่วงแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง (ภาพที่ 25จ) พบว่าโครงสร้างผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ของตัวอย่างมะม่วงนี้ยังคงค่อนข้างสมบูรณ์ โดยที่การหดตัวของเยื่อหุ้มเซลล์นั้นน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง ทำให้เซลล์ยังคงสามารถรักษาความดันเต่งไว้ได้ ส่งผลให้ความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงหลังแช่เยือกแข็งและทำละลายสูงกว่าตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยเพกทินทางการค้า หรือเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นได้ว่าตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมงนี้มีโครงสร้างผนังเซลล์ที่ค่อนข้างบางกว่าตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์อื่น สังเกตได้จากผนังเซลล์ของตัวอย่างมะม่วงที่ย้อมติดสีของโทลูอิดีนบลูได้ไม่ชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการสลายตัวของเพกทินบริเวณผนังเซลล์ และมิตได้ลดลงมาจากการที่ตัวอย่างมะม่วงถูกแช่อยู่ในสารละลายนานเกินไป (Prinzivalli *et al.*, 2006) อีกทั้งการทรีตเมนต์ตัวอย่างมะม่วงด้วยสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมงซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้ ทำให้ทั้งเพกทิน แคลเซียม และซูโครสจำเป็นต้องใช้พื้นที่ว่างบริเวณผนังเซลล์ที่มีอยู่อย่างจำกัดร่วมกัน (Xie and Zhao, 2004) ดังนั้นการแพร่ของแคลเซียมแลคเตทเข้าสู่เซลล์จึงเป็นไปอย่างจำกัด ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมอิสระที่สามารถสร้างพันธะเชื่อมข้ามกับสายเพกทินบริเวณผนังเซลล์ลดลง ตัวอย่างมะม่วงจึงมีโครงสร้างผนังเซลล์ค่อนข้างบาง ความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์นี้จึงน้อยกว่าตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสเท่านั้น



ภาพที่ 25 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงส่องผ่านของมะม่วงสุกบางส่วนแช่เยือกแข็ง และ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสนาน 14 วัน (น) ตัวอย่างควบคุม, (ข) แช่ แคลเซียมแลคเตทและซูโครส, (ค) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทิน, (ง) แช่ แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 6 ชม. และ (จ) แช่ แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 48 ชม. (CW = ผนังเซลล์, broken CW = ผนังเซลล์แตก, P = เยื่อหุ้มเซลล์, V = แวคิวโอล และ IS = ช่องว่างระหว่างเซลล์) (กำลังขยาย 40x, สเกลบาร์ 50 µm)

จากผลการทดลองในตอนที 3 นี้ สามารถเขียนกลไกการปรับปรุงคุณภาพมะม่วงแช่เยือกแข็งด้วยแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลซูโครส และเพกทินที่ผ่านและไม่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด ดังแสดงในภาพที่ 26 ตัวอย่างมะม่วงสุกบางส่วนที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์ การจัดเรียงตัวของเซลล์มีความสม่ำเสมอ ผนังเซลล์สมบูรณ์ไม่ฉีกขาด เยื่อหุ้มเซลล์อยู่ชิดติดกับผนังเซลล์ สามารถกักเก็บของเหลวภายในเซลล์ไว้ได้ ทำให้เซลล์มีความเต่งไม่เหี่ยว (ภาพที่ 26 ก-1) เมื่อนำตัวอย่างมะม่วงนี้ไปผ่านการแช่เยือกแข็งและทำละลายพบว่าผนังเซลล์ และเยื่อหุ้มเซลล์เกิดการฉีกขาดจากผลึกน้ำแข็ง ทำให้ไม่สามารถรักษาความเต่งเต่งภายในเซลล์ไว้ได้ (ภาพ 26 ก-2)

ในขณะที่การแช่ตัวอย่างมะม่วงในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส ทำให้เกิดการสร้างพันธะเชื่อมข้ามระหว่างแคลเซียมไอออนและสายเพกทินบริเวณเมดเดิลลาเมลล่า เกิดเป็นโครงสร้างแคลเซียมเพกเตท egg-box model ที่แข็งแรง และผลของกระบวนการออสโมซิสด้วยน้ำตาลซูโครส ทำให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ ซึ่งการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์จะถูกแทนที่ด้วยการเคลื่อนที่เข้ามาของสายละลายออสโมติก ทำให้เซลล์ที่ผ่านการออสโมซิสยังคงรูปร่างอยู่ได้ (ภาพที่ 26 ข-1) หลังการแช่เยือกแข็งและทำละลายตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์นี้ยังคงมีโครงสร้างของเซลล์สมบูรณ์ที่สุด (ภาพที่ 26 ข-2) เนื่องจากผลของการช่วยรักษาโครงสร้างผนังเซลล์พีซของแคลเซียมแลคเตท และการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีออสโมซิสด้วยน้ำตาลซูโครส ทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถกลายเป็นน้ำแข็งได้ลดลง ส่งผลให้ความเสียหายของผนังเซลล์พีซจากการเกิดผลึกน้ำแข็งลดลง

ภาพที่ 26 ค-1 แสดงกลไกการปรับปรุงคุณภาพมะม่วงแช่เยือกแข็งด้วยแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลซูโครส และเพกทินทางการค้า ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ ไม่สามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้ จึงอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างเซลล์ ทำหน้าที่เชื่อมแต่ละเซลล์เข้าด้วยกัน นอกจากนี้เพกทินบางส่วนจะไปเคลือบอยู่ที่ผิวของมะม่วงจำกัดการแพร่ของแคลเซียมแลคเตทและน้ำตาลซูโครสเข้ามาในเซลล์ โดยแคลเซียมที่สามารถแพร่ผ่านเข้ามาในเซลล์มะม่วงได้จะสร้างพันธะเชื่อมข้ามกับเพกทินบริเวณผนังเซลล์ และเพกทินที่เติมเข้าไปได้ ในขณะที่การออสโมซิสด้วยน้ำตาลซูโครส ช่วยลดปริมาณน้ำภายในชิ้นตัวอย่าง เมื่อนำมะม่วงมาแช่เยือกแข็งพบว่าบางส่วนของโครงสร้างผนังเซลล์เกิดความเสียหาย เซลล์มีรอยยับ และเยื่อหุ้มเซลล์หดตัว (ภาพที่ 26 ค-2) ทั้งนี้เนื่องจากการแช่ตัวอย่างในสารละลายเป็นเวลานานทำให้เกิดการสลายตัวของเพกทินบริเวณผนังเซลล์มะม่วง และการที่เพกทินเคลือบอยู่ที่ผิวมะม่วงทำให้ผลของการช่วยรักษาโครงสร้างของแคลเซียมแลคเตทและน้ำตาลซูโครสลดลง

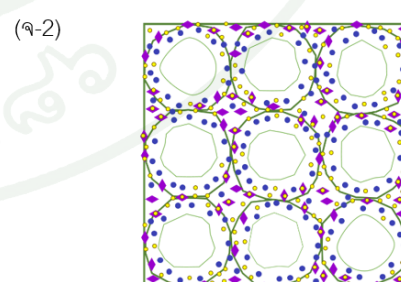
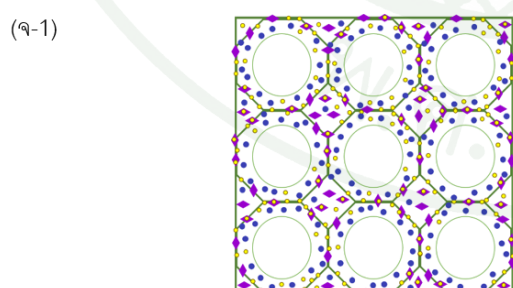
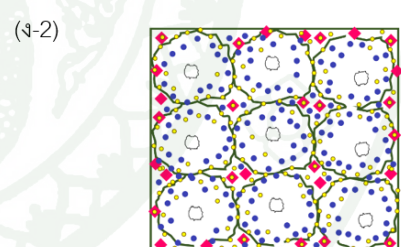
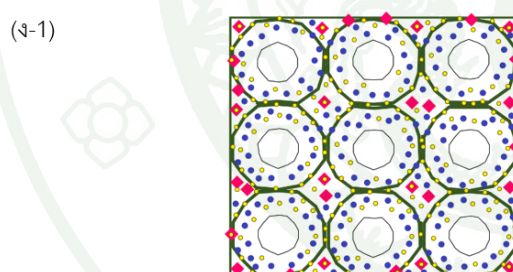
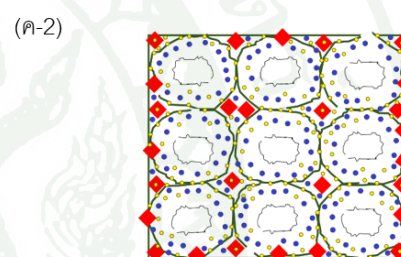
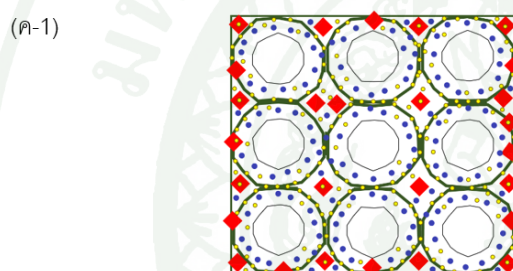
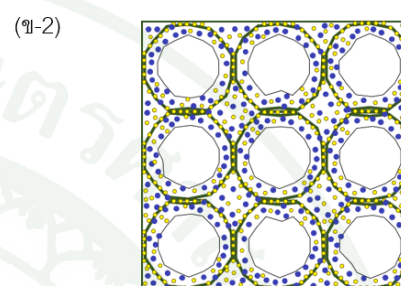
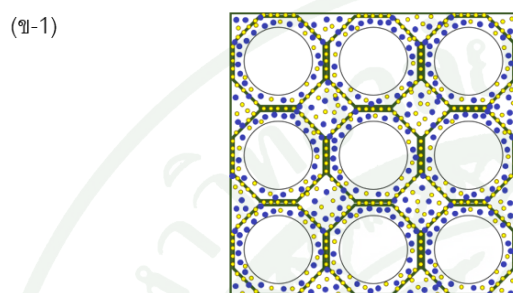
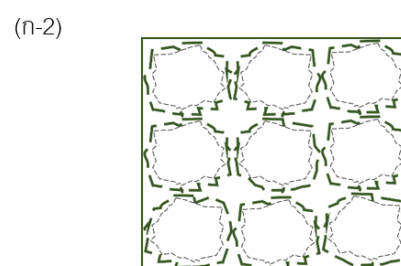
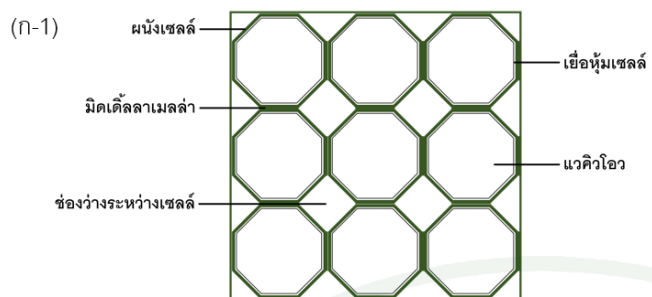
ภาพที่ 26 ง-1 แสดงกลไกการปรับปรุงคุณภาพมะม่วงแช่เยือกแข็งด้วยแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลซูโครส และเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 6 ชั่วโมง ซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กลง และพันธะเอสเทอร์ของหมู่เมทิลบนสายเพกตินบางส่วนเกิดการสลายตัว แต่อย่างไรก็ตามเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 ชั่วโมงนี้ไม่สามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้ จึงอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างเซลล์ และบางส่วนจะไปเคลือบอยู่ที่ผิวของมะม่วงเช่นเดียวกับเพกตินทางการค้า เมื่อนำมะม่วงมาแช่เยือกแข็งพบว่าบางส่วนโครงสร้างผนังเซลล์เกิดความเสียหาย เซลล์มีรอยยับ และเยื่อหุ้มเซลล์หดตัวลง (ภาพที่ 26 ง-2) เช่นเดียวกับตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยเพกตินทางการค้า

ในขณะที่การทรีตเมนต์มะม่วงด้วยเพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง ซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กลงจนสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้ ประกอบกับตัวอย่างเพกตินนี้ไม่มีหมู่เมทิลที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์บนสายเพกตินจึงสามารถเกิดพันธะเชื่อมข้ามกับแคลเซียมไอออนที่เติมลงไปได้ดี ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์มะม่วงได้ แต่อย่างไรก็ตามทั้งเพกติน แคลเซียม และน้ำตาลซูโครสนั้นจำเป็นต้องใช้พื้นที่บริเวณผนังเซลล์ที่มีอยู่อย่างจำกัดร่วมกัน ทำให้การแพร่ของแคลเซียมแลคเตทและน้ำตาลซูโครสเข้าสู่ชั้นมะม่วงได้น้อยลง อีกทั้งการที่ตัวอย่างถูกแช่อยู่ในสารละลายเป็นเวลานานทำให้เพกตินที่บริเวณผนังเซลล์เกิดการสลายตัว ส่งผลให้โครงสร้างผนังเซลล์อ่อนแอ (ภาพที่ 26 จ-1) หลังการแช่เยือกแข็งและทำละลาย ตัวอย่างมะม่วงจากทรีตเมนต์นี้ยังคงรักษาโครงสร้างผนังเซลล์ และแรงดันเต่งภายในเซลล์ไว้ได้ (ภาพที่ 26 จ-2) แต่เนื่องจากโครงสร้างผนังเซลล์ที่อ่อนแอทำให้ตัวอย่างมะม่วงจากทรีตเมนต์นี้มีความแน่นน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส

ภาพที่ 26 กลไกการปรับปรุงคุณภาพมะม่วงแช่เยือกแข็งด้วยแคลเซียมแลคเตท น้ำตาลซูโครส และเพกทิน (ก) ตัวอย่างควบคุม, (ข) แช่แคลเซียมแลคเตทและซูโครส, (ค) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทิน, (ง) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 6 ชม. และ(จ) แช่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 48 ชม. (1) และ (2) คือ ตัวอย่างก่อนแช่เยือกแข็ง และตัวอย่างหลังแช่เยือกแข็ง ตามลำดับ

หมายเหตุ

- | | |
|--|--|
| ● แคลเซียมออกไซด์ | ● ซูโครส |
| ◆ เพกทินทางการค้า | ◆ เพกทินทางการค้า – แคลเซียม |
| ◆ เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 6 ชม. | ◆ เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 6 ชม. - แคลเซียม |
| ◆ เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 48 ชม. | ◆ เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 48 ชม. - แคลเซียม |
| ●●●●● เพกทิน (มิดเดิ้ลลามาเลล่า) – แคลเซียมออกไซด์ | |



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. มะม่วงสุกบางส่วนสามารถนำมาใช้แทนมะม่วงสุกในกระบวนการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากเนื้อเยื่อสามารถทนต่อความเสียหายจากการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้มากกว่า โดยการใช้มะม่วงสุกบางส่วนร่วมกับการปรับปรุงคุณภาพของมะม่วงด้วยสารละลายแคลเซียมแลคเตท และน้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็งและทำละลาย ทำให้มะม่วงมีความแน่นเนื้อ และคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสสูงขึ้น มีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งลดลง และความเสียหายของผนังเซลล์เนื่องจากการแช่เยือกแข็งและทำละลายลดลง เนื่องจากโครงสร้างผนังเซลล์ที่แข็งแรงของมะม่วงสุกบางส่วน และผลของแคลเซียมแลคเตทในการช่วยรักษาโครงสร้างผนังเซลล์ด้วยการจับกับเพกทินที่อยู่บริเวณมิดเดิ้ลลามาเลลา ร่วมกับผลของการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยน้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็ง ทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถกลายเป็นน้ำแข็งได้ลดลง ส่งผลให้ความเสียหายของมะม่วงแช่เยือกแข็งจากการเกิดผลึกน้ำแข็งลดลง

2. การไฮโดรไลซ์เพกทินด้วยกรดส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเพกทิน โดยทำให้โมเลกุลเพกทินเกิดการแตกตัว ซึ่งระยะเวลาในการไฮโดรไลซ์เพกทินที่นานขึ้น ส่งผลให้เพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และความหนืดลดลง อีกทั้งยังทำให้เกิดการสลายพันธะเอสเทอร์ของหมู่เมทิลบนสายเพกทิน ทำให้เพกทินมีระดับเอสเทอร์ฟิเคชันลดลง และยังทำให้คุณสมบัติการกักน้ำของเพกทินลดลงอีกด้วย ซึ่งสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่ลดลงของเพกทิน

3. การแช่มะม่วงในสารละลายเพกทินทางการค้า หรือสารละลายเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 6 และ 48 ชั่วโมง ก่อนการแช่เยือกแข็งและทำละลาย มีผลดีต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็งน้อยกว่าการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีออสโมซิสโดยใช้น้ำตาลซูโครส ร่วมกับการเติมแคลเซียมแลคเตทเพื่อรักษาโครงสร้างผนังเซลล์ภายในเนื้อเยื่อมะม่วง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความไม่สม่ำเสมอของการแพร่ของเพกทินเข้าสู่เนื้อเยื่อมะม่วง รวมทั้งการเคลือบอยู่ที่ผิวมะม่วงของเพกทิน แต่อย่างไรก็ตามการใช้เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดนาน 48 ชั่วโมง ส่งผลดีต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งมากกว่าตัวอย่างเพกทินอื่น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากขนาดโมเลกุลที่ลดลงของเพกทินทำให้การแพร่ของเพกทินเข้าสู่เนื้อเยื่อมะม่วงเพื่อช่วยรักษาโครงสร้างผนังเซลล์ของมะม่วงแช่เยือกแข็งได้ดีขึ้น

4. อัตราการแช่เยือกแข็งมีผลสำคัญต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง โดยการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (-80 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้มะม่วงมีคุณภาพเนื้อสัมผัสดีกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้า (-20 องศาเซลเซียส)

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาผลของการเติมน้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็ง เพื่อสามารถใช้ในการอธิบายผลการทดลองได้ชัดเจนยิ่งขึ้น
2. ควรมีการศึกษาผลของการแช่มะม่วงในสารละลายเพกตินที่ผ่าน และไม่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเพียงอย่างเดียวก่อนการแช่เยือกแข็ง เพื่อสามารถเปรียบเทียบผลของเพกตินที่มีโครงสร้างโมเลกุลต่างกันต่อคุณภาพของมะม่วงแช่เยือกแข็งได้ดียิ่งขึ้น
3. ขั้นตอนการแช่ตัวอย่างมะม่วงในสารละลายเพกตินนาน 1 ชั่วโมง ก่อนแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสอีก 1 ชั่วโมง อาจทำให้ตัวอย่างมะม่วงมีเนื้อสัมผัสนิ่มลงจากการถูกแช่ในสารละลายนานเกินไป การลดเวลาการแช่มะม่วงในสารละลายเพกติน หรือสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสลง อาจช่วยให้คุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งดีขึ้น
4. ขั้นตอนการแช่ตัวอย่างมะม่วงในสารละลายเพกตินก่อนแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครส อาจทำให้การแพร่ของแคลเซียมแลคเตท และน้ำตาลซูโครสเข้าสู่ตัวอย่างลดลง การปรับปรุงลำดับขั้นตอนการแช่ตัวอย่าง โดยแช่มะม่วงในสารละลายแคลเซียมแลคเตทผสมน้ำตาลซูโครสเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างเซลล์ของตัวอย่างมะม่วงก่อนแช่ในสารละลายเพกตินอาจจะช่วยให้คุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงแช่เยือกแข็งดีขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรรณิการ์ โอ่วเจริญ. 2555. ผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-ละลาย น้ำแข็งซ้ำต่อเนื่องสัมผัสและสารประกอบเพกทินของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จริงแท้ ศิริพานิช. 2538. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ, นครปฐม.

_____. 2549. สรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวและการวางของพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ, นครปฐม.

ชุมพล บัวขจร. 2554. การวิเคราะห์แนวโน้มการส่งออกมะม่วงไทย. แหล่งที่มา: http://library.cmu.ac.th/faculty/econ/Exer751409/2554/Exer2554_no55, 30 มีนาคม 2557.

น้ำฝน เจริญพันธ์. 2552. ผลของการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีออสโมซิสและการเติม แคลเซียมต่อคุณภาพของแคนตาลูปแช่เยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประเสริฐ ศรีสาธ. 2545. การทำสวนมะม่วง. พิมพ์ครั้งที่ 1. อักษรสยามการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

พานิชย์ ยศปัญญา. 2540. มะม่วงนอกฤดู. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มติชน, กรุงเทพฯ.

สงวนศรี เจริญเหรียญ และ กัญญารัตน์ รัฟกุล. 2556. พฤติกรรมกลาสทรานซิชั่นของน้ำตาล ในระหว่างการผลิตถั่วตัด. ว. อาหาร 43(3): 74-81.

สวณิต อิชยาวณิชย์. 2556. ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดกลาสทรานซิชั่นระหว่างการอบแห้งกับ คุณภาพของอาหารแห้งที่ผลิตได้. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 23 (1): 241-249.

- สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2546. การแช่เยือกแข็งอาหาร, น. 154-186. ใน คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, บรรณาธิการ. **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สุพัตรา โพธิเศษ และ สงวนศรี เจริญเหรียญ. 2554. ผลของความสุกและการแช่เยือกแข็งต่อเนื้อสัมผัสและองค์ประกอบเพกทินในมะละกอ. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร** 42 (1): 664-666.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2557. **นำเข้า-ส่งออกสินค้าที่สำคัญ**. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export.php, 5 มีนาคม 2557.
- Abbas, K. A. 2010. The significance of glass transition temperature in processing of selected fried food products: A review. **Modern Applied Science** 4 (5): 3-21.
- Akhtar, M., E. Dickinson, J. Mazoyer and V. Langendorff. 2002. Emulsion stabilizing properties of depolymerized pectin. **Food Hydrocoll.** 16: 249-256.
- Alandes, L., I. Hernando, A. Quiles, I. Pérez-Munuera and M.A. Lluch. 2006. Cell wall stability of fresh-cut Fuji apples treated with calcium lactate. **J. Food Sci.** 71: 615-620.
- Ali, Z.M., L-H. Chin and H. Lazan. 2004. A comparative study on wall degrading enzymes, pectin modifications and softening during ripening of selected tropical fruits. **Plant Sci.** 167: 317-327.
- 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 treatments. **J. Food Sci.** 70 (9): 526-530.

- AOAC. 2000. **Official Method of Analysis**. 17th ed., The Association of Official Analytical Chemists, Arlington, Virginia.
- Arthey, D. and P.R. Ashurst. 1996. **Fruit Processing**. Black Academic and Professional, London.
- Baker, R.A. 1993. Firmness of canned grapefruit sections improved with calcium lactate. **J. Food Sci.** 58: 1107–1110.
- Bartley, I.M. and M. Knee. 1982. The chemistry of textural changes in fruit during storage. **Food Chem.** 9: 47-58.
- Berserker, B. 2006. **Hemicellulose**. Available Source: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hemicellulose.png>, September 17, 2012.
- Blond, G. and M.L. Meste. 2004. Principle of frozen storage, pp. 25-53. *In* Y.H. Hui, P. Cornillon, I.G. Legeretta, M.H. Lim., K.D. Murrell and W.K. Nip, eds. **Handbook of Frozen Foods**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Bongirwar, D.R. and A. Sreenivasan. 1977. Studies on osmotic dehydration of banana. **J. Food Sci. Tech.** 14: 104-112.
- Brown, M.S. 1997. Texture of frozen fruits and vegetables. **J. Texture Stud.** 7 (4): 391-404.
- Brummell, D.A. 2006. Cell wall disassembly in ripening fruit. **Function Plant Biology** 33: 103-119.

- Buggenhout, S.V., 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.
- 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.
- Chaplin, M. 2014. **Cellulose**. Available Source: <http://www.lsbu.ac.uk/water/hycel.html>, March 24, 2014.
- Chassagne-Berces, S., 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.
- Chatakanonda, P., R. Wansuksri and K. Sriroth. 2011. Impact of annealing on susceptibility to acid hydrolysis and physico-chemical properties of cassava starch. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 45: 284-294.
- Chomchalow, N. and P.N. Songkhla. 2008. Thai Mango Export: A Slow-but Sustainable Development. **Assumption University Journal of Technology** 12 (1): 1-8.
- Clas, S.D., C.R. Dalton and B.C. Hancock. 1999. Differential scanning calorimetry: applications in drug development. **Pharmaceutical Sci. Tech. Today** 2: 311-320.

- Costell, E., E. Carbonell and L. Duran. 1993. Rheological indexes of fruit content in jams- effect of formulation on flow plasticity of sheared strawberry and peach jams. **J. Texture Stud.** 24: 375-390.
- Cruvinel, R.S.R., M.E.T. Prado, J.V. Resende and M.A.Cirille. 2009. Preservation of frozen pineapple pieces through the vacuum impregnation with pectin and calcium propionate. **Rev. Ciênc. Agron.** 40(4): 539-548.
- Edwards, M. 1995. Change in cell structure, p. 213. *In* S.T. Beckett, ed. **Physico-Chemical Aspects of Food Processing.** Chapman & Hall, London.
- El-Aouar, A.A., P.M. Azoubel, Jr.J.L. Barbosa and F.E.X. Murr. 2006. Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). **J. Food Eng.** 75: 267-274.
- El-Zoghbi, M. 1994. Biochemical changes in some tropical fruits during ripening. **Food Chem.** 49 (1): 33-37.
- Fellows, P. 1990. **Food Processing Technology: Principles and Practice.** Ellis Horwood Limited, New York.
- Fennema, O.R. 1976. Freezing preservation, pp. 173-215. *In* O.R. Fennema, ed. **Principles of Food Science Part II: Physical Principles of Food Preservation.** Marcel Dekker, Inc., New York.
- Fito, P., A. Chiralt, J.M. Barat, W.E.L. Spiess and D. Behsnlian. 2001. **Osmotic Dehydration and Vacuum Impregnation.** Technomic, Inc. Lancaster.

- Fraeye, I, T. Duvetter, E. Doungla, A.V. Loey and M. Hendrickx. 2010. Fine-tuning the properties of pectin-calcium gels by control of pectin fine structure, gel composition and environmental conditions. **Trends Food Sci. Tech.** 21: 219-228.
- Garna, H., N. Mabon, K. Nott, B. Wathelet and M. Paquot. 2006. Kinetic of the hydrolysis of pectin galacturonic acid chains and quantification by ionic chromatography. **Food Chem.** 96: 477-484.
- Gras, M.L., D. Vidal, N. Betoret, A. Chiralt and P. Fito. 2003. Calcium fortification of vegetables by vacuum impregnation interactions with cellular matrix. **J. Food Eng.** 56: 9-284.
- Hernández-Muñoz, P., S. Herrera and A. Morilla. 2006. Effect of calcium dips and chitosan coatings on postharvest life of strawberries (*Fragaria x ananassa*). **Postharvest Biol.Tec.** 39 (3): 247-253.
- Kerr, W.L. 2004. Texture in frozen foods, pp. 149-168. *In* Y.H. Hui, P. Cornillon, I.G. Legeretta, M.H. Lim, K.D. Murrell and W.K. Nip, eds. **Handbook of Frozen Foods**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Ketsa, S., C. Sugunya, D.K., Joshua and L. Susan. 1999. Firmness, pectin component and cell hydrolases of mango fruit following low-temperature stress. **J. Hortic. Sci. Biotech.** 74 (6): 685-689.
- Khotimchenko, M., V. Kovalev, E. Kolenchenko and Y. Khotimchenko. 2012. Acidic method for the low molecular pectin preparation. **Int. J. Pharm. Pharm. Sci.** 4(1): 279-283.
- Kravtchenko, T.P., M. Penci, A.G.J. Voragen and W. Pilnik. 1993. Enzymatic and chemical degradation of some industrial pectins. **Carbohydr. Polym.** 20: 195-205.

- Kupchik, L.A., N.T. Kartel, E.S. Bogdanov, O.V. Bogdanova and M.P. Kupchik. 2006. Chemical modification of pectin to improve its sorption properties. **Russ. J. of Appl. Chem** 79(3): 457-460.
- Lara, I., P. Garcia and M. Vendrell. 2004. Modifications in cell wall composition after cold storage of calcium-treated strawberry (*Fragaria X ananassa* Duch.) fruit. **Postharvest Biol. Tech.** 34: 331-339.
- Lazar, M.E. 1968. Dehydrofreezing of fruits and vegetables, pp.347-375. In D.K. Tressler, W.B. Van Arsdell and M.J. Copley, eds. **The Freezing Preservation of Foods**, vol. 3. AVI, Westport.
- Li, B. and D-W. Sun. 2002. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods - A review. **J. Food Eng.** 54: 175-182.
- Lowithun, N. and S. Charoenrein. 2009. Influence of osmodehydrofreezing with different sugars on the quality of frozen rambutan. **Int. J. Food Sci. Tech.** 44: 2183-2188.
- Luna-Guzmán, I. and D.M. Barrett. 2000. Comparison of calcium chloride and calcium lactate effectiveness in maintain shelf stability and quality of fresh-cut cantaloupes. **Postharvest Biol. Tec.** 19 (1): 61-72.
- Lutz, R., A. Aserin, L. Wicker and N. Garti. 2009. Structure and physical properties of pectins with block-wise distribution of carboxylic acid groups. **Food Hydrocoll.** 23: 786-794.
- Maity, T., O.P. Chauhan, A. Shah, P.S. Raju and A.S. Bawa. 2011. Quality characteristics and glass transition temperature of hydrocolloid pre-treated frozen pre-cut carrot. **Int. J. Food Prop.** 14: 17-28.

- 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. Hort.* 96: 91-101.
- Manganaris, G.A., M. vasilakakis, G. Diamantidis and I. Mignani. 2005. Effect of calcium additives on physicochemical aspects of cell wall pectin and sensory attributes of canned peach (*Prunus persica* (L) Batsch cv Andross). *J. Sci. Food Agr.* 85 (13): 1765-1770.
- Marani, C.M., M.E. Agnelli and R.H. Mascheroni. 2001. Quality of osmo-frozen products, pp.187–196. *IIF-IIR Commission C2*. Bristol
- Martínez-Monzó, J., N. Martínez-Navarrete, A. Chiralt and P. Fito. 1998. Mechanical and structural changes in apple (Var. Granny Smith) due to vacuum impregnation with cryoprotectants. *J. Food Sci.* 63 (3): 499-503.
- McFeeters, R.F. and S.A. Armstrong. 1984. Measurement of pectin methylation in plant cell walls. *Anal. Biochem.* 139: 212-217.
- Medlicott, A.P. and A.K. Thompson. 1985. Analysis of sugars and organic acids in ripening mango fruits (*Mangifera indica* L, var, Keitt) by high performance liquid chromatography. *J. Sci. Food Agr.* 36: 561-566.
- Meilgaard, M.C., G.V. Civille and B.T. Carr. 2007. **Sensory Evaluation Techniques**. 4th ed. CRC Press, Boca Raton.
- Mesbahi, G., J. Jamalian and A. Farahnaky. 2005. A comparative study on functional properties of beet and citrus pectins in food systems. *Food Hydrocoll.* 13; 731-738.

- Mitsuiki, M., A. Mizuno and M. Motoki. 1999. Determination of molecular weight of agars and effect of the molecular weight on the glass transition. **J. Agr. Food Chem.** 47: 473-478.
- Mohnen, D. 2008. Pectin structure and biosynthesis. **Plant Biology.** 11: 266-277.
- Ohnishi, S. and O. Miyawaki. 2005. Osmotic dehydrofreezing for protection of rheological properties of agricultural products from freezing-injury. **Food Sci. Technol. Res.** 11 (1): 52-58.
- Panchev, I.N., A. Slavov, Kr. Nikolova and D. Kovacheva. 2010. On the water-sorption properties of pectin. **Food Hydrocoll.** 24: 763-769.
- Park, O.H. 2004. **Quality and customer acceptability of frozen cantaloupe.** M.S. Thesis, Texas Tech University.
- Pereira, L.M., S.M. Carmello-Guerreiro, H.M. Bolini, R.L. Cunha and M.D. Hubinger. 2007. Effect of calcium salts on the texture, structure and sensory acceptance of osmotically dehydrated guavas. **J. Sci. Food Agr.** 87: 1149-1156.
- Powell, D.A., E.R. Morris, M.J. Gidley and D.A. Rees. 1982. Conformations and interactions of pectins II. Influence of residue sequence on chain association in calcium pectate gels. **J. Mol. Biol.** 155: 517-531.
- Prinzivalli, C., A. Brambilla, D. Maffi, R.L. Scalzo and D. Torreggiani. 2006. Effect of osmosis time on structure, texture and pectin composition of strawberry tissue. **Eur. Food Res. Technol.** 224: 119-127.

- Rao, V.N.M. and X. Quintero. 2005. Rheological properties of solid foods, pp. 101-148. *In* M.A. Rao, S.S.H. Rizvi and A.K. Datta, eds. **Engineering properties of foods**. Taylors & Francis group, LLC., Florida.
- Raoult-Wack, A.L. 1994. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. **Trends Food Sci. Tech.** 5: 255-260.
- Reid, D. 1993. Basic physical phenomena in the freezing and thawing of plant and animal tissues, pp. 1-19. *In* C.P. Mallet, ed. **Frozen Food Technology**. Blackie Academic & Professional, Glasgow.
- Reinder, G. and H.P. Their. 1998. Non-starch polysaccharides of tomatoes I. Characterizing pectins and hemicelluloses. **Eur. Food Res. Technol.** 209: 43-46.
- Reno, M.J., M.E.T. Prado and J.V. Resende. 2011. Microstructural changes of frozen strawberries submitted to pre-treatments with additives and vacuum impregnation. **Ciênc. Technol. Aliment.** 31 (1): 247-256.
- Rimkeeree, K. 2012. **Effect of cultivar and ripening stage on the quality and microstructure of frozen mangoes (*Mangifera indica* L.)**. M.E. Thesis, Kasetsart University.
- Rimkeeree, K. and S. Charoenrein. 2014. Effect of cultivar and ripening stage on quality and microstructure of frozen mangoes (*Mangifera indica* Linn.). **Int. J. Food Prop.** 17 (5): 1093-1108.
- Rincon, A. and W.L. Kerr. 2010. Influence of osmotic dehydration, ripeness and frozen storage on physicochemical properties of mango. **J. Food Process Pres.** 34: 887-903.

Rolin, C., and J. De Vries. 1990. Pectin. pp. 401-434. *In* P. Harris ed. **Food gels**. Elsevier Applied Science, London.

Round, A.N., N.M. Rigby, A.J. MacDougall and V.J. Morris. 2010. A new view of pectin structure revealed by acid hydrolysis and atomic force microscopy. **Carbohydr. Res.** 345: 487-497.

Simandjuntak, V., D.M. Barrett and R.E. Wrolstad. 1996. Cultivar and frozen storage effects on muskmelon (*Cucumis melo*) colour, texture and cell wall polysaccharide composition. **J. Sci. Food Agric.** 71: 291-296.

Singthong, J., S.W. Cui, S. Ningsanond and H.D. Goff. 2004. Structural characterization, degree of esterification and some gelling properties of Krueo Ma Noy (*Cissampelos pareira*) pectin. **Carbohydr. Polym.** 58: 391-40.

Sirijariyawat, A., S. Charoenrein and D.M. Barrett. 2012. Texture improvement of fresh and frozen mangoes with pectin methylesterase and calcium infusion. **J. Sci. Food Agric.** 92: 2581-2586.

_____ and _____. 2013. Texture and pectin content of four frozen fruits treated with calcium. **J. Food Process. Pres.** DOI: 10.1111/jfpp.12096.

Slade, L. and H. Levine. 1991. Beyond water activity: recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety. **Cri. Rev. Food Sci. Nutr.** 30: 115-360.

Sousa, M.B., W. Canet, M.D. Alvarez and M.E. Tortosa. 2005. The effect of the pre-treatments and the long and short-term frozen storage on the quality of raspberry (cv. *Heritage*). **Eur. Food Res. Technol.** 221: 132-144.

- Sriwimon, W. and W. Boonsupthip. 2010. Utilization of partially ripe mangoes for freezing preservation by impregnation of mango juice and sugars. **LWT – Food Sci. Technol.** 44: 357-383.
- Sun, D-W. and L. Zheng. 2006. Innovation in freezing process, pp. 175-195. *In* Da-Wen Sun, ed. **Handbook of Frozen Food Processing and Packaging**. CRC Press, Inc., New York.
- Tharanathan, R.N., H.M. Yashoda and T.N. Prabha. 2006. Mango (*Mangifera indica* L.), “The King of Friuts”-An Overview. **Food Rev. Int.** 22(2): 95-123.
- Thibault, J. F., C. M. G. C. Renard, M. A. V. Axelos, P. Roger and M.-J. Crepeau. 1993. Studies of the length of homogalacturonic regions in pectins by acid hydrolysis. **Carbohydr. Res.** 238: 271-286.
- Torreggiani, D. 1993. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. **Food Res. Int.** 26 (1): 59-68.
- _____. and G. Bertolo. 2001. Osmotic pre-treatments in fruit processing: Chemical, physical and structural effects. **J. Food Eng.** 49: 247-253.
- Torres, J.D., P. Talens, I. Escriche and A. Chiralt. 2006. Influence of process conditions on mechanical properties of osmotically dehydrated mango. **J. Food Eng.** 74: 240-246.
- United Nations Conference on Trade and Development. 2012. **Mango**. Available Source: <http://www.unctad.info/en/Infocomm/AACP-Products/COMMODITY-PROFILE---Mango/>, March 6, 2014.

- United States Department of Agriculture. 2012. **National Nutrient Database for Standard Reference**. Available Source: <http://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/2347?fg=&man=&facet=&format=&count=&max=25&offset=&sort=&qlookup=mango>, March 6, 2014.
- Vásquez-Caicedo, A.L., S. Neidhart and R. Carle. 2004. Postharvest ripening behavior of nine Thai mango cultivars and their suitability for industrial applications. **Acta Hortic.** 645: 617-625.
- Vicente, A.R., A. Powell, L.C. Greve and J.M. Labavitch. 2007. Cell wall disassembly events in boysenberry (*Rubus idaeus* L. x *Rubus ursinus* Cham. & Schldl.) fruit development. **Funct. Plant Biol.** 34: 614-623.
- Vorwerk, S., S. Somerville and C. Somerville. 2004. The role of plant cell wall polysaccharide composition in disease resistance. **Trends Plant Sci.** 9 (4): 203-209.
- Xie, J. and Y. Zhao. 2004. Use of vacuum impregnation to develop high quality and nutritionally fortified frozen strawberries. **J. Food Process. Pres.** 28: 117-132.
- 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 Agr.** 86: 713-721.
- Yi, Y. and R.J. Neufeld. 2005. Immobilization of cells in polysaccharide gels, pp. 867-892. In S. Dumitriu ed. **Polysaccharides: Structural Diversity and Functional Versatility**.







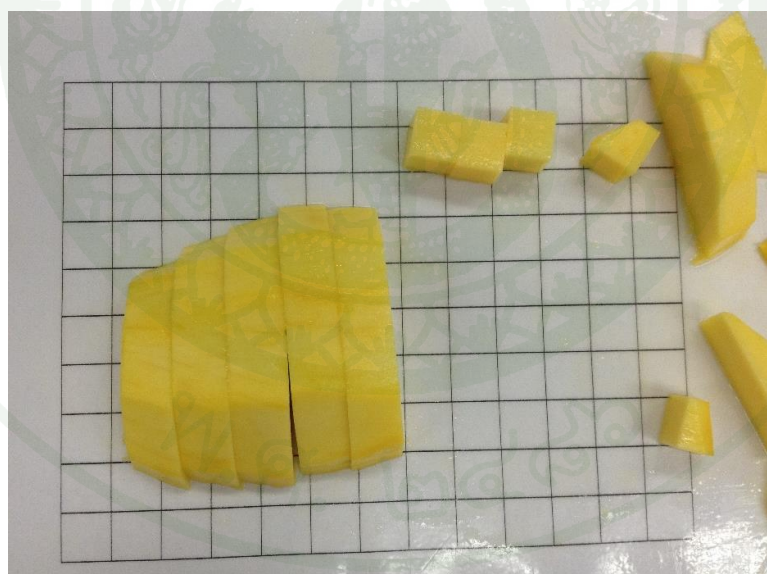
ภาพผนวกที่ ก1 มะม่วงสุกบางส่วนซื้อจากตลาดสี่มุมเมือง



ภาพผนวกที่ ก2 มะม่วงสุกซื้อจากตลาดสี่มุมเมือง



ภาพผนวกที่ ก3 สีผิวของมะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 ที่ระยะการสุกต่างๆ (ก) มะม่วงสุกบางส่วน และ (ข) มะม่วงสุก



ภาพผนวกที่ ก4 การหั่นตัวอย่างมะม่วงให้เป็นรูปลูกบาศก์ขนาด 1.5 ซม.³



ภาพผนวกที่ ก5 แช่ตัวอย่างมะม่วงในสารละลายก่อนการแช่เยือกแข็ง



ภาพผนวกที่ ก6 ชั้บสารละลายส่วนเกินออกจากตัวอย่างมะม่วงด้วยกระดาษชั้บ



1. สีของเนื้อมะม่วงในระหว่างการสุกที่ระยะต่างๆ



ภาพผนวกที่ ๑ (ก) สีผิว และ (ข) สีเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 ที่ระยะการสุกต่างๆ

ที่มา: Rimkeeree and Charoenrein (2014)

(ก) สีของผิวมะม่วงในระหว่างการสุกที่ระยะต่างๆ ได้แก่ ระยะที่ 1 สีเหลือง 0-30% (unripe) ระยะที่ 2 สีเหลือง 75% (partially ripe) ระยะที่ 3 สีเหลือง 90% (ripe) และระยะที่ 4 สีเหลือง 100% (fully ripe)

(ข) สีของเนื้อมะม่วงในระหว่างการสุกที่ระยะต่างๆ ได้แก่ ระยะที่ 1 สีเหลือง 0-30% (unripe) ระยะที่ 2 สีเหลือง 31-60% (partially ripe) ระยะที่ 3 สีเหลือง 61-99% (ripe) และระยะที่ 4 สีเหลือง 100% (fully ripe)

2. ปริมาณความชื้น และปริมาณของแข็งทั้งหมด (AOAC, 2000)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1.1 ตู้อบลมร้อน

2.1.2 ภาชนะใส่ตัวอย่าง (moisture can) ทำด้วยอลูมิเนียม

2.1.3 เดซิเคเตอร์ (desiccator)

2.1.4 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

2.2 วิธีการวิเคราะห์

2.2.1 ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ในภาชนะอลูมิเนียมมีฝาปิดที่ผ่านการอบจนน้ำหนักคงที่

2.2.2 นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่

2.2.3 คำนวณหาปริมาณความชื้นจากสูตร

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

2.2.4 คำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมดจากสูตร

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

3. ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (AOAC, 2000)

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง

3.1.2 เครื่องปั่นผสม

3.2 สารเคมี

3.2.1 ฟีนอล์ฟทาลีน (ใน 95% เอทานอล) ความเข้มข้น 1%

3.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

3.3 วิธีการวิเคราะห์

3.3.1 ชั่งตัวอย่างมะม่วง 10 กรัม หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ เติมน้ำกลั่นเล็กน้อย บดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นเปื่อย

3.3.2 ถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แล้วกรองด้วยผ้าขาวบาง

3.3.3 ปิเปตส่วนที่กรองได้ 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์

3.3.4 ไทเทรตสารละลายตัวอย่างกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนกระทั่งถึงจุดยุติซึ่งมีสีชมพูอ่อน

3.3.5 บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต นำมาคำนวณค่าความเป็นกรดในรูปของกรดมาลิก ตามสูตร

$$\% \text{ค่าความเป็นกรด} = \frac{N_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} \times \text{mEq}_{\text{malic acid}} \times 50 \times 100}{\text{Wt.}_{\text{mango}} \times 10}$$

โดยที่: N_{NaOH} = นอร์มัลลิตีของ NaOH (มิลลิอีควิวาเลนต์/มิลลิลิตร)
 V_{NaOH} = ปริมาตรของ NaOH (มิลลิลิตร)
 $\text{mEq}_{\text{malic acid}}$ = มิลลิอีควิวาเลนต์ของกรดมาลิก ($\text{mEq}_{\text{malic acid}} = 0.067$)
 $\text{Wt.}_{\text{mango}}$ = น้ำหนักมะม่วง (กรัม)

4. การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายกรดกาแล็กทูโรนิก

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

4.1.1 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)

4.1.2 เครื่องเขย่าสารละลาย (vortex)

4.1.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)

4.2 สารเคมี

4.2.1 กรดกาแล็กทูโรนิก (D-(+)-Galacturonic acid)

4.2.2 สารละลายไฮเดียมเตตระบอเรต (ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น) ความเข้มข้น 0.0125 โมลาร์

4.2.3 เมตาไฮดรอกซีไดฟีนิล (ในไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5%) ความเข้มข้น 0.15%

4.3 วิธีการวิเคราะห์

4.3.1 เตรียมสารละลายกรดกาแล็กทูโรนิกมาตรฐานความเข้มข้น 1,001 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร โดยชั่งกรดกาแล็กทูโรนิก 0.1001 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

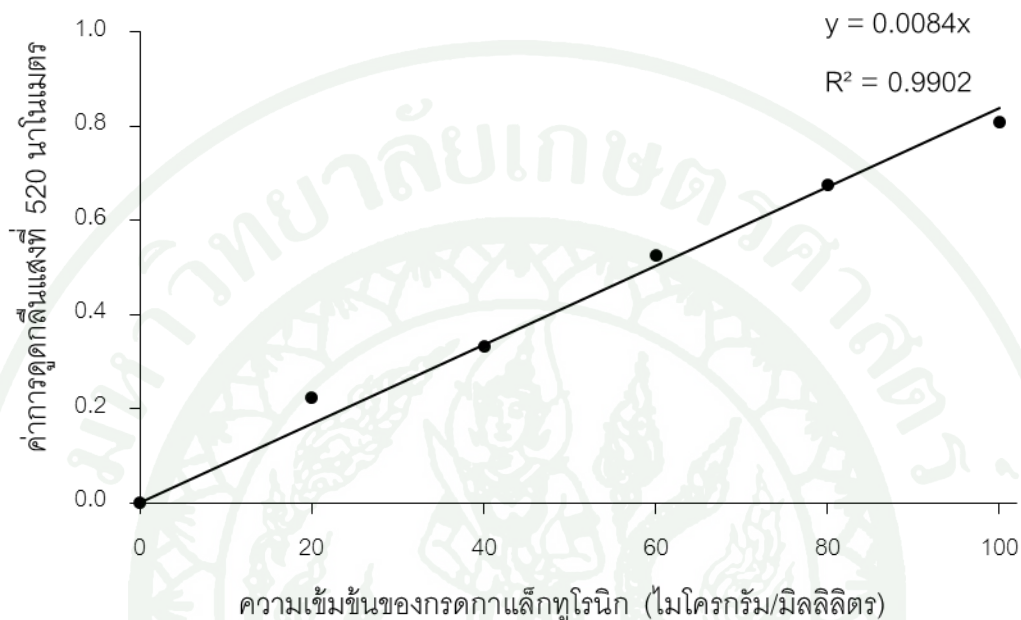
4.3.2 เตรียมสารละลายกรดกาแล็กทูโรนิกความเข้มข้น 20.02, 40.04, 60.06, 80.08 และ 100.10 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร โดยปิเปตสารละลายกรดกาแล็กทูโรนิกมาตรฐานความเข้มข้น 1,001 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ปริมาตร 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

4.3.3 ปิเปตสารละลายกรดกาแล็กทูโรนิกความเข้มข้น 20.02, 40.04, 60.06, 80.08 และ 100.10 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร ใส่ลงในสารละลายไฮเดียมเตตระบอเรตปริมาตร 4.8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 5 นาที

4.3.4 ทำให้เย็นแล้วจึงเติมสารละลายเมตาไฮดรอกซีไดฟีนิลปริมาตร 80 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที

4.3.5 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร

4.3.6 สร้างกราฟมาตรฐานจากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของสารละลายกรดกาแล็กทูโรนิกมาตรฐานระหว่าง 0 – 100.10 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร



ภาพผนวกที่ ข2 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของกรดกาแล็กทูโรนิกกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร

5. ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (ดัดแปลงตามวิธีการของ Lowithun and Charoenrein, 2009)

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

5.1.1 ตู้ควบคุมอุณหภูมิต่ำ

5.1.2 กระดาษชั่ง

5.1.3 ถังซีปล็อก

5.1.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง

5.2 วิธีการวิเคราะห์

5.2.1 นำชิ้นมะม่วงวางบนกระดาษซับที่บรรจุในถุงซิปล็อก ปิดปากถุงให้สนิทและทิ้งไว้ให้น้ำแข็งละลายในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างมะม่วงคงที่ (5 ชั่วโมง) ชั่งน้ำหนัก วัดค่า 6 ซ้ำ

5.2.2 คำนวณปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งต่อน้ำหนักแห้ง ตามสมการ

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

โดยที่: W_o : น้ำหนักของกระดาษซับก่อนละลายน้ำแข็ง
 W_t : น้ำหนักของกระดาษซับหลังละลายน้ำแข็ง
 W_s : น้ำหนักของตัวอย่างก่อนละลายน้ำแข็ง
 TS : เปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งทั้งหมดในตัวอย่าง

6. การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายเดกซ์แทรน

6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

6.1.1 โครมาโตกราฟีของเหลวแรงดันสูงแบบแยกตามขนาด (High Performance Size Exclusion Chromatography; HPSEC) ประกอบด้วย บั๊ม (Waters 600) เครื่องขจัดแก๊ส (degasser) เครื่องฉีดสารตัวอย่าง (injector) และเครื่องตรวจชนิดของสารแบบวัดการหักเหของแสง (differential refractive index detector, Waters 410)

6.1.2 ชุดคอลัมน์ ประกอบด้วย คอลัมน์ปกป้อง (guard column; Shodex OH SB-G) คอลัมน์ที่ 1 (Shodex OHpak SB-806M HQ) และคอลัมน์ที่ 2 (Shodex OHpak SB-804 HQ)

6.1.3 แผ่นกรองสารละลายชนิดไนลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมครอน

6.1.4 หลอดฉีดยาปริมาตร 5 มิลลิลิตร

6.1.5 ชุดกรองน้ำกลั่น

6.2 สารเคมี

6.2.1 เดกซ์แทรนมาตรฐาน น้ำหนักโมเลกุล 50, 150, 270 และ 670 กิโลดาลตัน

6.2.2 สารละลายโซเดียมไนเตรต ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ที่มีโซเดียมเฮไซด์ ความเข้มข้น 0.02% (น้ำหนักโดยปริมาตร)

6.2.3 น้ำกลั่น 2 ครั้ง (double distilled water)

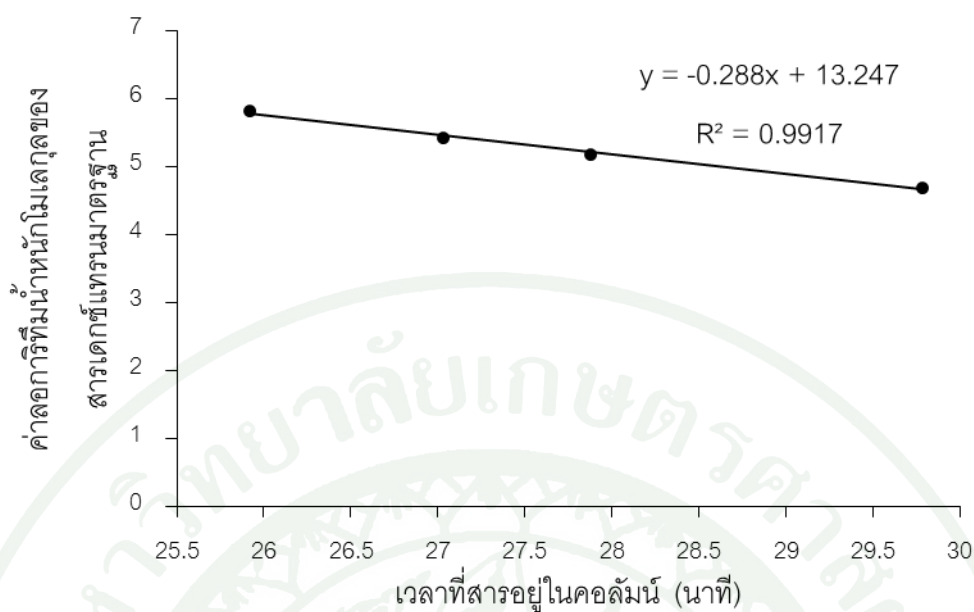
6.3 วิธีการวิเคราะห์

6.3.1 เตรียมสารละลายเดกซ์แทรนมาตรฐาน (น้ำหนักโมเลกุล 50, 150, 270 และ 670 กิโลดาลตัน) ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/มิลลิตร โดยชั่งเดกซ์แทรนมาตรฐาน 5 มิลลิกรัม ละลายในสารละลายโซเดียมไนเตรตความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ที่มีสารละลายโซเดียมเฮไซด์ความเข้มข้น 0.02% (น้ำหนักโดยปริมาตร) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร

6.3.3 กรองสารละลายเดกซ์แทรนผ่านแผ่นกรองสารละลายชนิดไนลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมครอน

6.3.2 ฉีดสารละลายเดกซ์แทรนเข้าคอลัมน์ โดยใช้อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 0.6 มิลลิลิตร/นาที เพื่อวิเคราะห์เวลาที่สารอยู่ในคอลัมน์ (retention time)

6.3.3 สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าลอการิทึมน้ำหนักโมเลกุล (log molecular weight) ของเดกซ์แทรนมาตรฐาน กับเวลาที่สารอยู่ในคอลัมน์



ภาพผนวกที่ ข3 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าลอการิทึมน้ำหนักโมเลกุลของเด็กซ์แทรนมาตรฐานกับเวลาที่สารอยู่ในคอแลมน์

7. การสร้างกราฟมาตรฐานระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกทิน

7.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

7.1.1 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer; FT-IR)

7.2 สารเคมี

7.2.2 โพลีกลีแล็กทูโรนิก (ระดับเอสเทอร์ฟิเคชัน 0%)

7.2.3 เพกทินมาตรฐานที่มีระดับเอสเทอร์ฟิเคชัน 26, 62 และ 96%

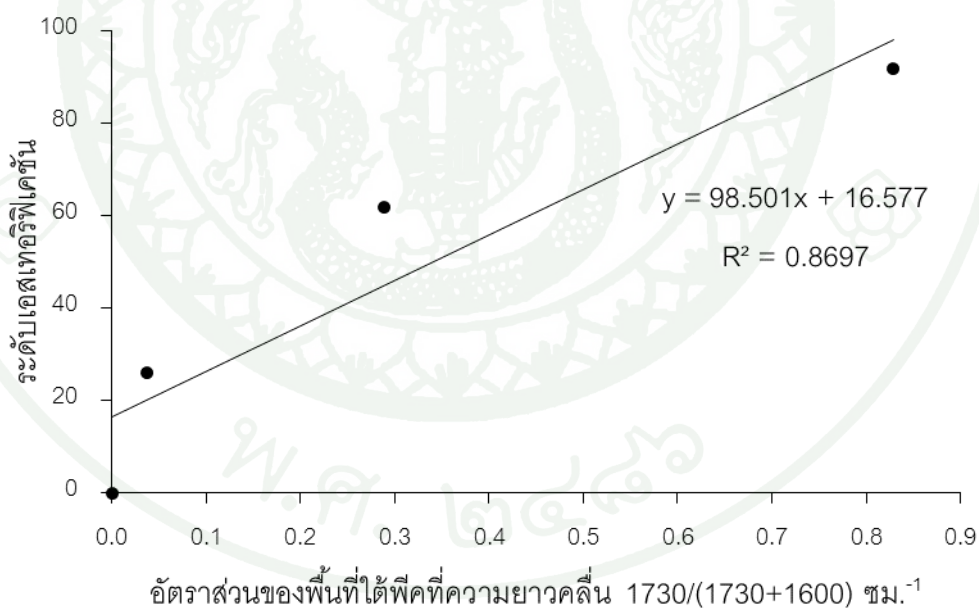
7.3 วิธีการวิเคราะห์

7.3.1 วิเคราะห์ระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกทินด้วยเครื่อง FT-IR โดยใช้วิธี Attenuated Total Reflectance (ATR) ตั้งค่าความละเอียด (resolution) เท่ากับ 4 cm^{-1} วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเพกทินในช่วงความยาวคลื่น 4,000 – 500 cm^{-1}

7.3.2 ตักสารโพลีกลีคอลแล็กทอโรนิก และเพกทินมาตรฐานลงไปในช่วงสำหรับใส่ตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเครื่อง FT-IR

7.3.3 วิเคราะห์พื้นที่ใต้พีคของหมู่คาร์บอนิลที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์ (carbonyl ester group; COOCH_3) และคาร์บอกซิเลตไอออน (carboxylate ion; COO^-) ที่ช่วงความยาวคลื่น 1760 – 1730 cm^{-1} และ 1630 – 1600 cm^{-1} ตามลำดับ ด้วยโปรแกรม OPUS Data Collection Program เวอร์ชัน 6.5

7.3.4 สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกทิน กับอัตราส่วนของพื้นที่ใต้พีคที่ความยาวคลื่น 1730/(1730+1600) cm^{-1}



ภาพผนวกที่ ข4 กราฟมาตรฐานระหว่างระดับเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกทิน กับอัตราส่วนของพื้นที่ใต้พีคที่ความยาวคลื่น 1730/(1730+1600) cm^{-1}

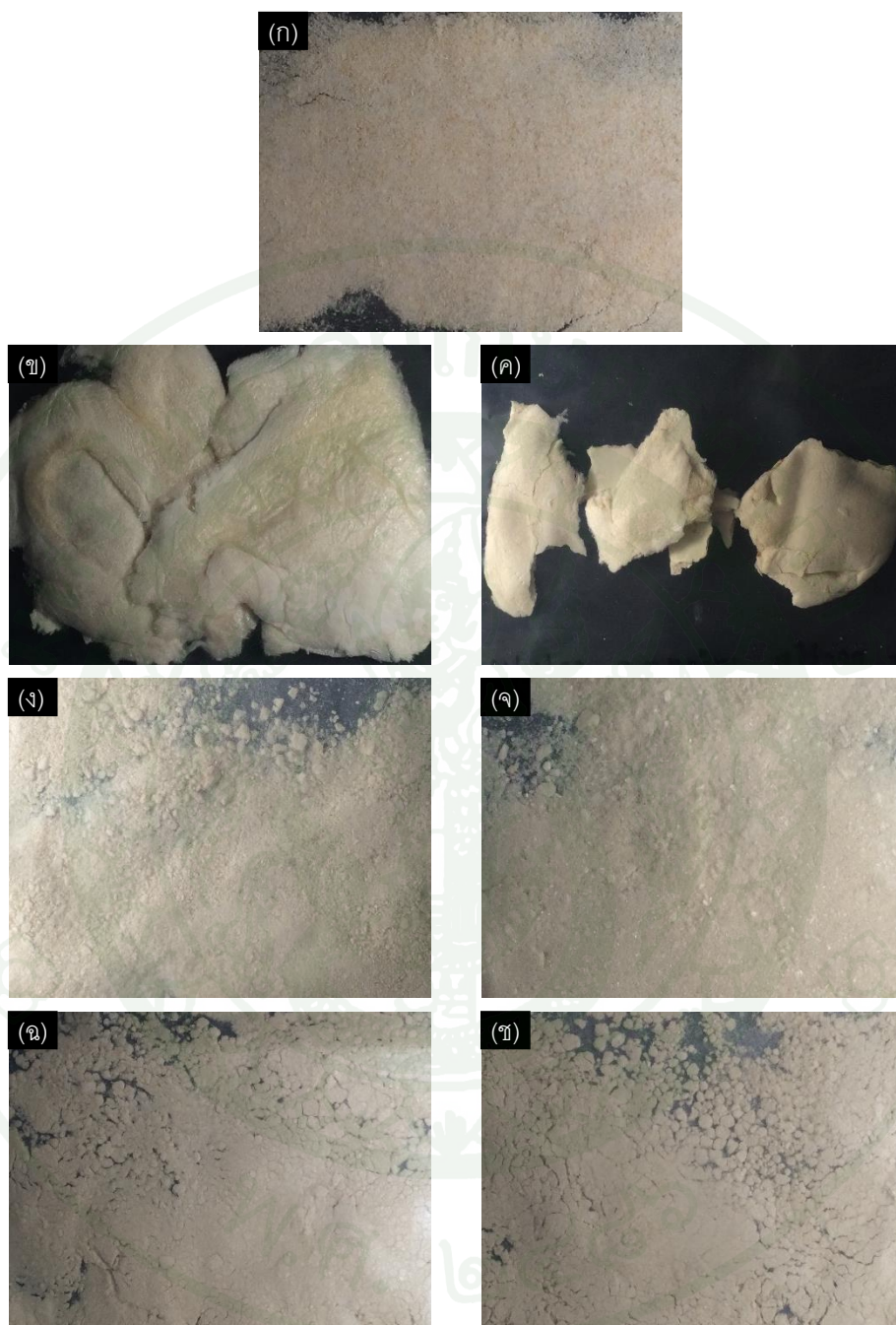


ตารางผนวกที่ ค1 ความแน่นเนื้อ คะแนนความแน่นเนื้อ และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของมะม่วงสุกบางส่วน และมะม่วงสุกในแต่ละทรีตเมนต์หลังการแช่เยือกแข็ง

คุณลักษณะ	ระดับความสุก	ทรีตเมนต์		
		ตัวอย่างควบคุม	แคลเซียม	แคลเซียม และชูโครส
ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)	สุกบางส่วน	1.27 ^{b,NS} ±0.03	1.35 ^{b,NS} ±0.01	2.74 ^{b,NS} ±0.16
	สุก	0.99 ^{b,NS} ±0.16	1.27 ^{b,NS} ±0.36	2.23 ^{a,NS} ±0.24
คะแนนความแน่นเนื้อ (QDA)	สุกบางส่วน	1.18 ^{b,NS} ±0.28	1.30 ^{ab,NS} ±0.02	1.81 ^{a,NS} ±0.09
	สุก	0.67 ^{a,NS} ±0.02	0.77 ^{a,NS} ±0.19	1.18 ^{a,NS} ±0.25
ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (% ของน้ำหนักแห้ง)	สุกบางส่วน	0.57 ^{ab,NS} ±0.06	0.71 ^{a,NS} ±0.09	0.39 ^{b,NS} ±0.01
	สุก	0.57 ^{a,NS} ±0.05	0.67 ^{a,NS} ±0.03	0.42 ^{b,NS} ±0.01

หมายเหตุ ^{a-b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละทรีตเมนต์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระดับความสุกไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)



ภาพผนวกที่ ค1 ภาพตัวอย่าง (ก) เพกตินทางการค้า และ (ข, ค, ง, จ, ฉ, ช) เพกตินหลังผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (ข) เพกตินควบคุม, (ค) เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นเวลา 6, (ง) 24, (จ) 48, (ฉ) 72 และ (ช) 96 ชั่วโมง

ตารางผนวกที่ ค2 ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

ตัวอย่าง	ทรีตเมนต์				
	PR-Ctrl	PR-Ca+Su	PR-Ca+Su +Pectin	PR-Ca+Su +6h Pectin	PR-Ca+Su +48h Pectin
ตัวอย่างก่อนแช่เยือกแข็ง	75.52 ^{ns,NS} ±1.75	74.30 ^{ns,NS} ±0.28	71.92 ^{ns,NS} ±1.22	71.86 ^{ns,NS} ±4.84	72.93 ^{ns,NS} ±3.90
ตัวอย่างแช่เยือกแข็งและทำละลาย หลังเก็บรักษา (-20 °ซ) 14 วัน	78.64 ^{ns,NS} ±5.14	74.90 ^{ns,NS} ±3.32	77.60 ^{ns,NS} ±5.75	75.02 ^{ns,NS} ±3.53	74.36 ^{ns,NS} ±1.57
ตัวอย่างแช่เยือกแข็งและทำละลาย หลังเก็บรักษา (-20 °ซ) 150 วัน	73.21 ^{ns,NS} ±3.57	71.17 ^{ns,NS} ±4.39	73.87 ^{ns,NS} ±2.08	70.57 ^{ns,NS} ±1.08	75.42 ^{ns,NS} ±0.13

หมายเหตุ PR = มะม่วงสุกบางส่วน, Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ซูโครส, Pectin = เพกทินทางการค้า, 6h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 ชม. และ 48h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 48 ชม.

^{ns} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละทรีตเมนต์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระยะเวลาการเก็บรักษาไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ค3 ปริมาณเพกตินที่ละลายน้ำได้ของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

ตัวอย่าง	ทรีตเมนต์				
	PR-Ctrl	PR-Ca+Su	PR-Ca+Su +Pectin	PR-Ca+Su +6h Pectin	PR-Ca+Su +48h Pectin
ตัวอย่างก่อนแช่เยือกแข็ง	91.70 ^{abC} ±3.46	94.01 ^{aB} ±2.92	92.78 ^{abA} ±4.96	84.84 ^{bB} ±2.03	74.95 ^{cB} ±0.83
ตัวอย่างแช่เยือกแข็งและทำละลาย หลังเก็บรักษา (-20 °ซ) 14 วัน	103.70 ^{abB} ±1.62	112.31 ^{aA} ±5.35	102.76 ^{abA} ±2.86	106.22 ^{abA} ±4.43	96.38 ^{bA} ±4.67
ตัวอย่างแช่เยือกแข็งและทำละลาย หลังเก็บรักษา (-20 °ซ) 150 วัน	117.59 ^{aA} ±5.25	108.49 ^{abAB} ±6.49	103.92 ^{abA} ±7.06	109.34 ^{abA} ±3.89	96.20 ^{bA} ±4.45

หมายเหตุ PR = มะม่วงสุกบางส่วน, Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ซูโครส, Pectin = เพกตินทางการค้า, 6h Pectin = เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 ชม. และ 48h Pectin = เพกตินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 48 ชม.

^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละทรีตเมนต์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระยะเวลาการเก็บรักษามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ค4 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์

ตัวอย่าง	ทรีตเมนต์				
	PR-Ctrl	PR-Ca+Su	PR-Ca+Su +Pectin	PR-Ca+Su +6h Pectin	PR-Ca+Su +48h Pectin
ตัวอย่างแช่เยือกแข็งและทำละลาย หลัง เก็บรักษา (-20 °ซ) 14 วัน	0.54 ^{a,NS} ±0.04	0.32 ^{c,NS} ±0.02	0.38 ^{bc,NS} ±0.06	0.35 ^{b,NS} ±0.06	0.47 ^{ab,NS} ±0.08
ตัวอย่างแช่เยือกแข็งและทำละลาย หลัง เก็บรักษา (-20 °ซ) 150 วัน	0.69 ^{a,NS} ±0.02	0.41 ^{b,NS} ±0.04	0.51 ^{b,NS} ±0.09	0.42 ^{b,NS} ±0.03	0.50 ^{b,NS} ±0.07

หมายเหตุ PR = มะม่วงสุกบางส่วน, Ctrl = ตัวอย่างควบคุม Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ซูโครส, Pectin = เพกทินทางการค้า, 6h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 ชม. และ 48h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 48 ชม.

^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละทรีตเมนต์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{NS} ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระยะเวลาการเก็บรักษาไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

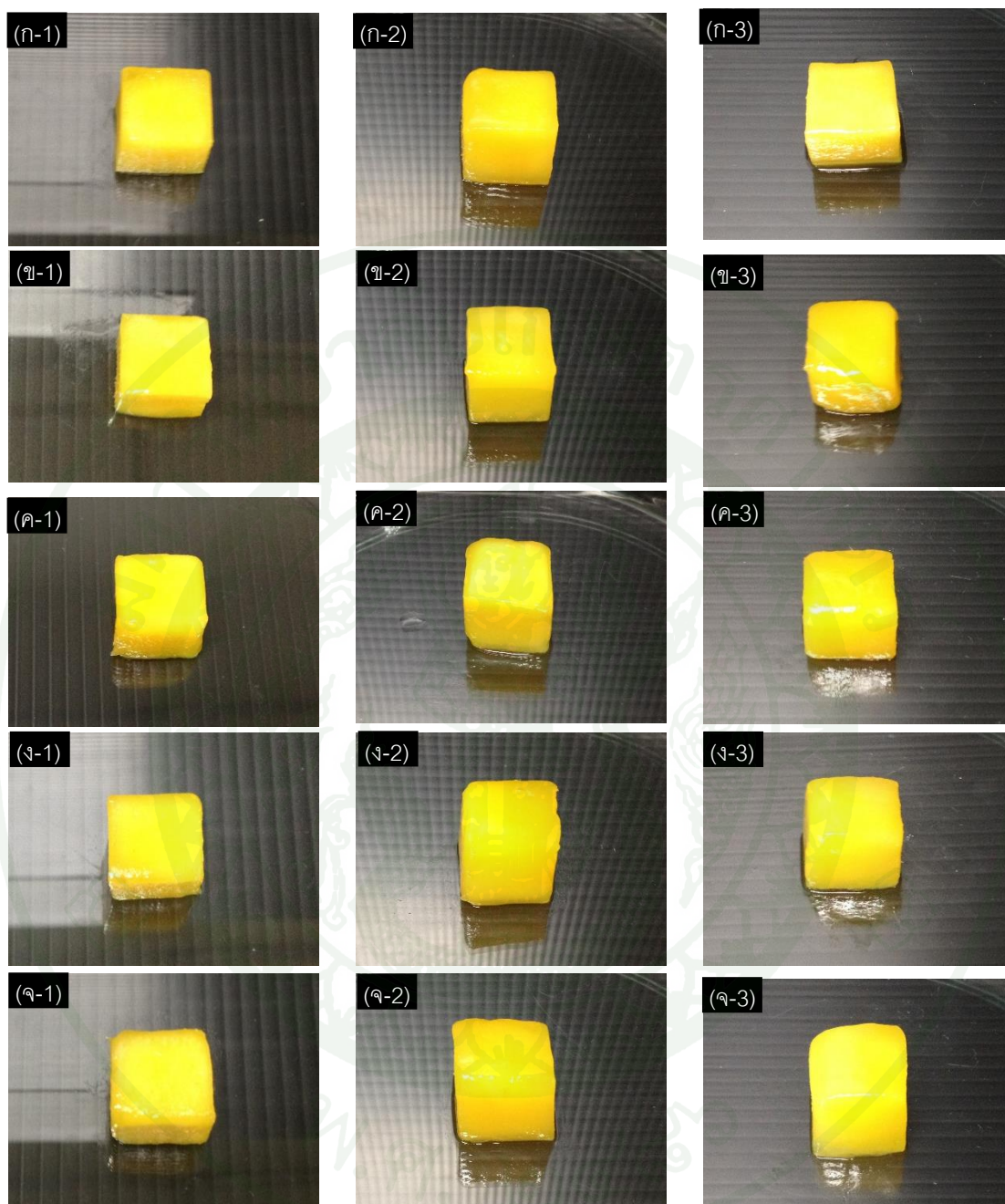
ตารางผนวกที่ ค5 ค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสของมะม่วงสุก และมะม่วงสุกบางส่วนในแต่ละทรีตเมนต์ก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง

ตัวอย่าง	ทรีตเมนต์					
	R	PR-Ctrl	PR-Ca+Su	PR-Ca+Su +Pectin	PR-Ca+Su +6h Pectin	PR-Ca+Su +48h Pectin
ตัวอย่างก่อนแช่เยือกแข็ง	5.36 ^c ±0.64	6.46 ^{bcA} ±0.05	8.49 ^{aA} ±1.23	6.55 ^{bcA} ±0.01	6.56 ^{bcA} ±0.35	7.10 ^{abA} ±0.30
ตัวอย่างแช่เยือกแข็งและทำละลาย หลังเก็บรักษา (-20 °ซ) 14 วัน	-	1.86 ^{cB} ±0.01	3.91 ^{aB} ±0.19	2.91 ^{bB} ±0.09	2.83 ^{bB} ±0.08	3.39 ^{abB} ±0.70
ตัวอย่างแช่เยือกแข็งและทำละลาย หลังเก็บรักษา (-20 °ซ) 150 วัน	-	1.81 ^{cB} ±0.05	3.00 ^{aB} ±0.04	1.98 ^{bcC} ±0.13	2.17 ^{bB} ±0.08	2.13 ^{bB} ±0.07

หมายเหตุ R = มะม่วงสุก (ตัวอย่างอ้างอิง), PR = มะม่วงสุกบางส่วน, Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, Ca = แคลเซียมแลคเตท, Su = ชูโครส, Pectin = เพกทินทางการค้า, 6h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 6 ชม. และ 48h Pectin = เพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ 48 ชม.

^{a-c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละทรีตเมนต์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{A-C} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละระยะเวลาการเก็บรักษามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)



ภาพผนวกที่ ค2 ลักษณะปรากฏของมะม่วงสุกบางส่วน (ก) ตัวอย่างควบคุม, (ข) แซ่แคลเซียมแลคเตทและซูโครส, (ค) แซ่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทิน, (ง) แซ่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 6 ชม. และ (จ) แซ่แคลเซียมแลคเตท ซูโครส และเพกทินที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 48 ชม. (1), (2) และ (3) คือ ตัวอย่างก่อนแช่เยือกแข็ง, ตัวอย่างแช่เยือกแข็งและทำละลายหลังเก็บรักษา (-20°C) นาน 14 และ 150 วัน ตามลำดับ



การวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส

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

1.1 การคัดเลือก

1.1.1 การทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ Duo-trio test

คัดเลือกผู้ทดสอบโดยวิธี Duo-trio test เพื่อประเมินความสามารถของผู้ทดสอบในการแยกแยะความแตกต่างระหว่างตัวอย่างที่มีลักษณะคล้ายกัน โดยให้ผู้ทดสอบ ทดสอบตัวอย่างอ้างอิง จากนั้นจึงทดสอบตัวอย่างอีก 2 ตัวอย่างที่เหลือ และให้ผู้ทดสอบเลือกตัวอย่างที่เหมือนกับตัวอย่างอ้างอิง โดยให้ผู้ทดสอบทำการทดสอบ 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำผู้ทดสอบต้องประเมินตัวอย่างรุ่นที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน (ภาพผนวกที่ 1)

ผู้ทดสอบที่ผ่านการคัดเลือกต้องสามารถประเมินถูกมากกว่า 60% (ตอบถูก 2 ใน 3 ครั้ง) จึงสามารถผ่านเข้าสู่การคัดเลือกรอบต่อไป

1.1.2 การทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบเรียงลำดับ (Ranking tests)

ผู้ทดสอบที่ผ่านการคัดเลือกจากการทดสอบแบบ Duo-trio test จะต้องผ่านการทดสอบขั้นต่อไป คือ การทดสอบโดยวิธี Ranking tests เพื่อวัดความสามารถของผู้ทดสอบในการแยกแยะระดับความเข้มของคุณลักษณะที่ต้องการศึกษา โดยให้ผู้ทดสอบจัดลำดับความแน่นเนื้อโดยใช้วงความเข้มข้นต่างกัน 3 ระดับ (ภาพผนวกที่ 2)

ผู้ทดสอบที่ผ่านการคัดเลือกต้องสามารถจัดลำดับถูกทั้งหมด หรือจัดลำดับผิดเพียงบางตัวอย่างที่มีระดับความเข้มข้นใกล้เคียงกัน

1.2 การฝึกฝน

ครั้งที่ 1 ฝึกให้ผู้ทดสอบรู้จักและคุ้นเคยกับสเกล โดยใช้สเกล 5 ระดับ (ภาพผนวกที่ ง3) ดังนี้

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

ตัวอย่างที่ใช้ในการฝึกฝนความแน่นเนื้อ คือ วุ้นความเข้มข้น 0.5% แทนระดับคะแนน 1, วุ้นความเข้มข้น 1% แทนระดับคะแนน 3 และ วุ้นความเข้มข้น 1.5% แทนระดับคะแนน 5 โดยใช้เวลาฝึกประมาณ 30 นาที

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

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

ครั้งที่ 4 ให้ผู้ทดสอบประเมินตัวอย่างด้านความแน่นเนื้อโดยใช้ตัวอย่างเหมือนกับตัวอย่างที่ใช้ในการฝึกฝนแต่ให้รหัสเลขสุ่ม 3 หลัก และใช้แบบทดสอบเหมือนกับแบบทดสอบที่ใช้จริง หลังจากการประเมิน แจ้งให้ผู้ทดสอบทราบผลการประเมิน ฝึกให้ผู้ทดสอบคุ้นเคยกับสเกลโดยใช้ตัวอย่างเช่นเดียวกับการฝึกครั้งที่ 1 ใช้เวลาฝึกประมาณ 30 นาที หลังจากการฝึกฝนให้ผู้ทดสอบประเมินตัวอย่างอีกครั้ง แต่ใช้ตัวอย่างที่มีระดับความเข้มข้นทั้งเหมือนและต่างจากตัวอย่างที่ใช้ในการ

ฝึกฝน หลังจากการประเมิน แจ้งให้ผู้ทดสอบทราบผลการประเมิน และให้ผู้ทดสอบทบทวนซ้ำอีกครั้ง

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ Duo-trio test		
ชื่อผู้ทดสอบชิม วันที่ คำชี้แจง: กรุณาทดสอบตัวอย่างตามลำดับจากซ้ายไปขวา ตัวอย่างซ้ายสุด คือ ตัวอย่างอ้างอิง ประเมินตัวอย่างที่เหลืออีก 2 ตัวอย่าง และแสดงเครื่องหมายกากบาท (x) ในช่องของตัวอย่างที่เหมือนตัวอย่างอ้างอิง ทดสอบตัวอย่างโดยการเคี้ยว กรุณاب้วนปากระหว่างตัวอย่าง		
Reference	Code.....	Code.....
		
คำแนะนำ :		

ภาพผนวกที่ ง1 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ Duo-trio test

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบเรียงลำดับ (Ranking tests)

ชื่อผู้ทดสอบทีม วันที่

คำชี้แจง: กรุณาทดสอบตัวอย่างตามลำดับจากซ้ายไปขวา และเรียงลำดับตัวอย่างเหล่านี้ตามความแน่นเนื้อที่กำหนดจาก ลำดับที่ 1 (น้อยที่สุด) ไปลำดับที่ 3 (มากที่สุด) ทดสอบตัวอย่างโดยการเคี้ยว กรุณาบ้วนปากระหว่างตัวอย่าง

ความแน่นเนื้อ	ความแน่นเนื้อ รหัส
แน่นเนื้อน้อยที่สุด (1)	
แน่นเนื้อปานกลาง (2)	
แน่นเนื้อมากที่สุด (3)	

คำแนะนำ :

.....

ภาพผนวกที่ ๒ แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบเรียงลำดับ (Ranking tests)

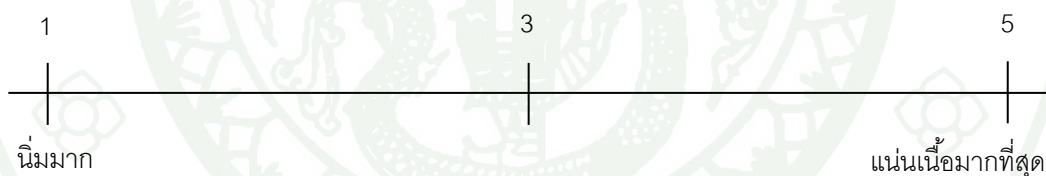
แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ QDA

ชื่อผู้ทดสอบ..... วันที่.....

เพศ ☐ ชาย ☐ หญิง อายุ.....ปี

คำชี้แจง: โปรดทำเครื่องหมายเส้นตรงและเขียนรหัสของแต่ละตัวอย่างบนเครื่องหมายเส้นตรงนั้น เพื่อแสดงตำแหน่งที่ท่านได้ให้แก่แต่ละตัวอย่างในด้านความแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์ตามที่ท่านคิดว่าเหมาะสมที่สุด โดยให้ท่านชิมตัวอย่างอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง ได้แก่ วุ้นที่มีความเข้มข้น 3 ระดับ ซึ่งแทนคะแนนด้านความแน่นเนื้อ คือ 1, 3 และ 5 คะแนนตามลำดับ โดยคะแนนอ้างอิงด้านความแน่นเนื้อได้ให้ไว้บนเส้นตัวอย่างแล้ว โปรดทำการทดสอบตามลำดับตัวอย่างที่จัดเรียงไว้ให้ จากซ้ายไปขวา

ความแน่นเนื้อ



คำแนะนำ :

ภาพผนวกที่ 3 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ QDA

2. การเตรียมวุ้น

3.1 วัตถุดิบ

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

3.1.2 น้ำหวานแดง ตราเฮลล์บลูบอย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องให้ความร้อน (hot plate)

3.2.2 เทอร์โมมิเตอร์

3.2.3 ถ้วยพลาสติก

3.3 วิธีการเตรียม

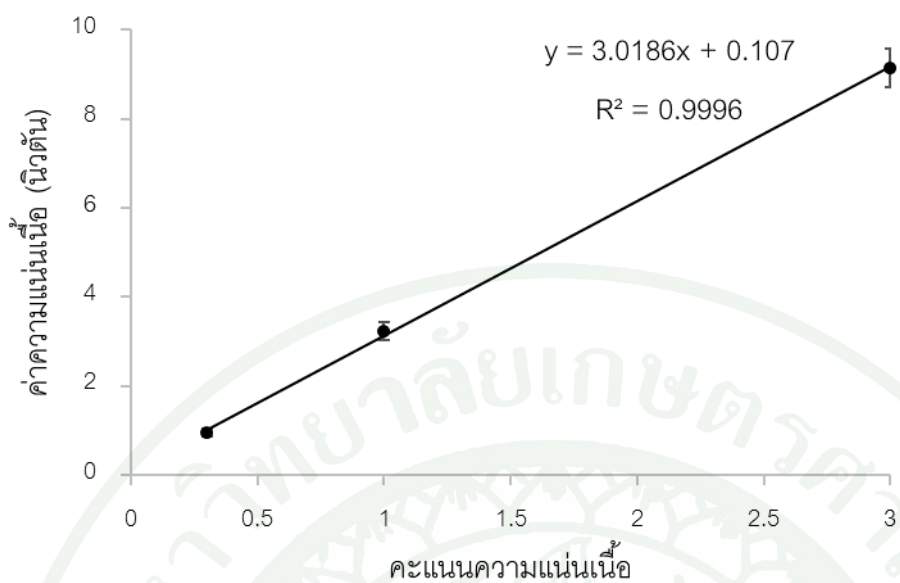
เตรียมวุ้นความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ 0.3, 0.5 และ 1.0% เพื่อใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิงในการทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ (Quantitative Descriptive Analysis; QDA) โดยต้มน้ำให้มีอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แล้วใส่น้ำหวานแดง 9 เปอร์เซ็นต์ คนให้เข้ากัน หลังจากนั้นใส่ผงวุ้นตามความเข้มข้นที่เตรียมไว้ คนจนผงวุ้นละลายหมดและรอให้สารละลายวุ้นเดือด นำมาเทใส่ภาชนะ ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็น

3. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนดของวุ้น

เพื่อพิสูจน์ว่าคะแนนความแน่นเนื้อของตัวอย่างวุ้นอ้างอิงที่กำหนดให้ผู้ทดสอบในการประเมินความแน่นเนื้อของมะม่วงด้วยการทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ คือ 0.3, 1.0 และ 3.0 คะแนน มีความสอดคล้องกับความแน่นเนื้อของตัวอย่างวุ้นที่ความเข้มข้น 0.3, 0.5 และ 1.0% (โดยน้ำหนัก) จริง จึงได้นำวุ้นที่ความเข้มข้นทั้ง 3 ระดับนี้ มาวัดค่าความแน่นเนื้อ แล้วสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อที่วัดจากเครื่องวัดเนื้อสัมผัส และคะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนดของวุ้น โดยให้แกน x แสดงถึง คะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนด และแกน y แสดงถึง ค่าความแน่นเนื้อในหน่วยของนิวตันที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส แสดงดังภาพผนวก ง4 จากกราฟพบว่าค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสและคะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนดมีความสัมพันธ์กันสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงถึง 0.9996 ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้วุ้นที่ความเข้มข้นทั้ง 3 ระดับนี้ เป็นตัวอย่างอ้างอิงในการประเมินทางประสาทสัมผัสและสามารถใช้เป็นเกณฑ์เพื่อประเมินเป็นคะแนนความแน่นเนื้อของตัวอย่างมะม่วงได้

ตารางผนวกที่ ง1 ความเข้มข้น คะแนนความแน่นเนื้อ และค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างวุ้นอ้างอิง 3 ระดับ

ความเข้มข้นวุ้น (% โดยน้ำหนัก)	คะแนนความแน่นเนื้อ	ค่าความแน่นเนื้อ (นิวตัน)
0.3	0.3	0.94±0.08
0.5	1.0	3.22±0.20
1.0	3.0	9.14±0.43



ภาพผนวกที่ ๔ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส
คะแนนความแน่นเนื้อที่กำหนดของตัวอย่างกุ้งอ้างอิง

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ
(Quantitative Descriptive Analysis, QDA)

ชื่อผู้ทดสอบ..... วันที่.....

เพศ ☐ ชาย ☐ หญิง อายุ.....ปี

ผลิตภัณฑ์ มะม่วงแช่เยือกแข็ง

คำชี้แจง กรุณาทดสอบตัวอย่างที่น่าเสนอ และให้คะแนนความเข้มข้นเนื้อสัมผัสของตัวอย่าง โดยท่านจะได้รับตัวอย่างอ้างอิง (วุ้น) ที่มีความเข้มข้นระดับ 0.3, 1 และ 3 เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบกับตัวอย่าง โปรดทดสอบตัวอย่างและประเมินว่าตัวอย่างมีความเข้มข้นอยู่ที่ระดับใดโดยทำเครื่องหมายเส้นตรงและเขียนรหัสของแต่ละตัวอย่างบนเครื่องหมายเส้นตรงนั้น เพื่อแสดงตำแหน่งที่ท่านได้ให้คะแนนความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ตามที่ท่านคิดว่าเหมาะสมที่สุด โปรดทำการทดสอบตามลำดับตัวอย่างที่จัดเรียงไว้ให้จากซ้ายไปขวา

ความเข้มข้น



***หมายเหตุ** ในกรณีที่ท่านคิดว่าความเข้มข้นของตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าระดับ 1 โปรดทำเครื่องหมายเส้นตรงบนสเกลที่ขยายอัตราส่วนด้านล่าง



รหัสตัวอย่างที่ท่านชอบ (ด้านเนื้อสัมผัส) มากที่สุดคือ.....เหตุผล.....

รหัสตัวอย่างที่ท่านชอบ (ในทุกด้าน) มากที่สุดคือ.....เหตุผล.....

คำแนะนำ :

ขอบคุณค่ะ

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบ (9-point hedonic scale)

ชื่อผู้ทดสอบชิม.....วันที่.....

เพศ ☐ ชาย ☐ หญิง อายุ.....ปี

คำชี้แจง : กรุณาทดสอบตัวอย่างมะม่วงแช่เยือกแข็งตามลำดับที่นำเสนอจากซ้ายไปขวา และให้คะแนนตามความชอบของตัวอย่าง กรุณاب้วนปากระหว่างตัวอย่าง

- | | | |
|---------------------|--------------------|------------------|
| 1 = ไม่ชอบมากที่สุด | 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย | 7 = ชอบปานกลาง |
| 2 = ไม่ชอบมาก | 5 = เฉยๆ | 8 = ชอบมาก |
| 3 = ไม่ชอบปานกลาง | 6 = ชอบเล็กน้อย | 9 = ชอบมากที่สุด |

ลักษณะทางประสาทสัมผัส	รหัสตัวอย่าง					
1. ลักษณะปรากฏ						
2. สี						
3. กลิ่นรส						
4. รสชาติ						
5. เนื้อสัมผัส						
6. ความชอบโดยรวม						

คำแนะนำ :

ขอบคุณค่ะ

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวสิริรักษ์ ศิระมาด
เกิดวันที่	24 มิถุนายน 2532
สถานที่เกิด	จังหวัดสระบุรี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2553)
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	1. Siramard, S. and S. Charoenrein. 2013. Effect of acid hydrolysis time on molecular structure and viscosity of hydrolyzed pectin. Proceedings of the Congress on Science and Technology of Thailand. 951-954. 2. Siramard, S. and S. Charoenrein. 2014. Effect of ripening stage and infusion with calcium lactate and sucrose on the quality and microstructure of frozen mango. International Journal of Food Science and Technology. DOI: 10.1111/ijfs.12553 3. Siramard, S. and S. Charoenrein. 2012. Improvement of texture quality of frozen mango by calcium and sucrose. 7th Taiwan-Thailand Bilateral Conference, October 18-19, 2012, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan. (Oral presentation) 4. Siramard, S. and S. Charoenrein. 2013. Minimizing texture loss of frozen mangoes: Effect of ripening stage and infusion with calcium lactate and sucrose. The 12th IFT Annual Meeting & Food Expo, July 13-16, 2013, McCormick Place South, Chicago, Illinois, USA. (Poster presentation)

5. Siramard, S. and S. Sathivel. 2013. Effect of the combined osmotic dehydration and cryogenic freezing on blueberries. 2013 Louisiana State University Agricultural Center-Kasetsart University Visiting Scholar Program, August 23, 2013, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana. (Oral presentation)
6. Siramard, S., S. Charoenrein and S. Sathivel. 2013. Improving the quality of frozen mango and blueberry using calcium and sucrose. The 7th Young Scientist Seminar, September 19, 2013, Kasetsart University, Bangkok, Thailand. (Oral presentation)
7. Siramard, S. and S. Charoenrein. 2013. Effect of acid hydrolysis time on molecular structure and viscosity of hydrolyzed pectin. The 39th Congress on Science and Technology of Thailand, October 21-23, 2013, BITEC Bangna Convention Centre, Bangkok, Thailand. (Oral presentation)
8. Siramard, S. and S. Charoenrein. 2013. Effect of acid hydrolysis on molecular structure and viscosity of pectin. The 2nd Malaysia-Thailand Graduated Forum in Life Science, Food Science and Agriculture (MTGF) 2013, December 3-7, 2013, Universiti Putra Malaysia, Selangor, Malaysia. (Oral presentation)

ทุนการศึกษาที่ได้รับ

1. ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. 2013 Louisiana State University Agricultural Center-Kasetsart University Visiting Scholar Program, June 4 – August 29, 2013, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, USA.

ประสบการณ์งานวิจัย

ผู้ช่วยวิจัยโครงการ “การพัฒนามลไม่แช่เยือกแข็งของไทยให้ทนต่อการแช่เยือกแข็งและทำละลาย” ทุนอุดหนุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (พ.ศ. 2554-2556)