วิทยานิพนธ์

การปรับปรุงคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็งโดยวิธีออสโมดีไฮเดรชัน ด้วยน้ำตาลบางชนิด

APPLICATION OF OSMODEHYDRATION WITH DIFFERENT SUGARS TO IMPROVE QUALITY OF FROZEN RAMBUTAN

นางสาวงามจิตร โล่วิทูร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์การอาหาร	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็งโดยวิธีออสโมดีไฮเดรชันด้วยน้ำตาลบางชนิด

Application of Osmodehydration with Different Sugars to Improve Quality of Frozen Rambutan

นามผู้วิจัย นางสาวงามจิตร โล่วิทูร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(อาจารย์ศศิธร ตรงจิตภักดี, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะบูลย์ สัจจาอนันตกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 25 **เดือน** มีนาคม **พ.ศ.** 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็งโดยวิธีออสโมดีไฮเดรชันด้วยน้ำตาลบางชนิด

Application of Osmodehydration with Different Sugars to Improve Quality of Frozen Rambutan

โดย

นางสาวงามจิตร โล่วิทูร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)
พ.ศ. 2551

งามจิตร โล่วิทูร 2551: การปรับปรุงคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็งโดยวิธีออสโมดีไฮเดรชันด้วยน้ำตาลบางชนิด ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D. 98 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีออสโมซิสก่อนการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็ง โดยใช้สารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ กัน เมื่อนำเนื้อเงาะพันธุ์โรงเรียนแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ความเข้มข้นร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 30°ซ เป็นระยะเวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากชิ้นเงาะ (water loss) ที่แช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิด เกิดขึ้นได้เร็วในช่วง 1 - 2 ชั่วโมงแรก และปริมาณของแข็งที่ได้รับในชิ้นเงาะ (solid gain) ที่แช่ในสารละลายชนิดต่างกันมีอัตราการเพิ่มขึ้นคงที่ การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่สูญเสีย และปริมาณของแข็งที่ได้รับเมื่อแช่ในสารละลายทั้งหมดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) การแช่ชิ้นเงาะในสารละลายชนิดต่างกัน นาน 1 ชั่วโมง ไม่มีผลทำให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ตัวอย่างชิ้นเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปบรรจุถุงพลาสติก และแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิกแบบพ่นไอไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -40°ซ โดยใช้ตัวอย่างเงาะที่ไม่ผ่านการออสโมซิสเป็นตัวอย่างควบคุม และเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิ -18°ซ เป็นเวลา 3, 60 และ 120 วัน ผลการทดลอง พบว่า ตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิดมีปริมาณความชื้น และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (°บริกซ์) ของตัวอย่างที่แช่ในสารละลายทุกชนิดมีปริมาณเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ และความแน่นเนื้อของตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการแช่สารละลาย มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สำหรับค่าสี ($L^*a^*b^*$) ที่มีความแตกต่างกันระหว่างตัวอย่างนั้นไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสีได้อย่างชัดเจน ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า ตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสได้รับคะแนนความชอบด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับมากที่สุด เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นคุณภาพส่วนใหญ่ของแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T'_g) เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) โดยขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาลที่ใช้ เทรฮาโลสทำให้ค่า T'_g ของตัวอย่างสูงที่สุด ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถทำนายคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็งได้

งามจิตร โล่วิทูร — สงวนศรี เจริญเหรียญ — 17/ม.ค./2551

ลายมือชื่อนิสิต — ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Ngamjit Lowithun 2008: Application of Osmodehydration with Different Sugars to Improve Quality of Frozen Rambutan. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Associate Professor Sanguansri Charoenrein, Ph.D. 98 pages.

The objective of this research was to study the effect of osmotic pretreatment with different syrups on quality of frozen rambutan. The rambutan pieces (cv. Roengrien) were osmotically dehydrated in 50% sucrose, trehalose and maltitol solutions at 30°C for 0, 0.5, 1, 2, 3, 4 and 5 hours. The results showed that the rates of water loss in all osmotic samples were high at 1-2 hours of the initial period. Solid gain in rambutan pieces soaked in the different syrups increased at constant rate. The increase of water loss and solid gain were not significantly different among the syrups ($p > 0.05$). Water activity values of samples immersed in all syrups for 1 hour were not significantly reduced ($p > 0.05$). Osmodehydrofreezing process of rambutan pieces, the fruits were immersed in the different syrups for 1 hour and packed in plastic pouches before freezing in a cryogenic freezer at -40°C; an untreated sample was also used for comparison. The physical and chemical properties of frozen rambutan pieces stored at -18°C for 3, 60 and 120 days were studied. The osmotic pretreatments with all syrups reduced moisture content and drip loss of samples ($p \leq 0.05$). Total soluble solids of all osmodehydrofrozen samples were significantly higher than that of the untreated sample. However, the values of pH, total titratable acidity and firmness of all samples were not significantly different ($p > 0.05$). Color of the samples which had difference of color (L*a*b*) values could not be observed clearly among the samples. Sensory evaluation showed that the pretreatment with sucrose improved the quality of frozen rambutan in terms of taste and texture as well as overall acceptance. When storage time increased, most quality of each sample were not significantly different ($p > 0.05$). Osmotic pretreatment increased the glass transition temperature (T'_g) of the samples. Increase of this value depended on the type of osmotic syrups. The sample treated with trehalose had the highest T'_g. Anyway, these results showed that increase of the glass transition temperature could not predict the quality of frozen rambutan.

Ngamjit Lowithun — Student's signature

Thesis Advisor's signature — 17 / Mar / 2008

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. สงวนศรี เจริญเหรียญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร. ศศิธร ตรงจิตภักดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษาในด้านการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. สมจิต สุรพัฒน์ ประธานการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และ รศ.ดร.วรรณา ตุลยธัญ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน และมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะอุตสาหกรรมเกษตร ผู้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ที่ให้กำลังใจผู้วิจัยมาโดยตลอด

งามจิตร โล่วิทูร

มีนาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	45
สรุปและข้อเสนอแนะ	75
สรุป	75
ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	77
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี และกายภาพ	86
ภาคผนวก ข แบบประเมินผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส	89
ภาคผนวก ค ข้อมูลประกอบผลการทดลอง	91
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	98

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบ และคุณค่าทางโภชนาการของเงาะในส่วนที่รับประทานได้	6
2	คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล	21
3	ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w) ของอาหารภายใต้สภาวะแช่เยือกแข็ง	28
4	ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการ anneal ที่อุณหภูมิ -35°ซ ต่อค่า T'_g ของสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 65	32
5	ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w) ปริมาณความชื้น และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของลูกแพร์ที่ทำแห้งด้วยระยะเวลาต่างๆ กัน เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 36	35
6	ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของเงาะที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	50
7	ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง เมื่อใช้วิธีการ และอุณหภูมิในการละลายน้ำแข็งที่ต่างกัน	54
8	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน	57
9	ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน	57
10	ค่าสี (L*a*b*) ของเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน	59
11	ค่าเนื้อสัมผัสของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน	61
12	คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน	62
13	ค่า T'_{g1} และ T'_{g2} ของสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20 ที่สภาวะ non-anneal และ anneal ที่อุณหภูมิ -40, -38 และ -34°ซ	67
14	ค่า T'_{g1} และ T'_{g2} ของสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ความเข้มข้นร้อยละ 20 ที่สภาวะ non-anneal และ anneal	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

15 ค่า T'_g และ T'_m ของสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล 71

16 ค่า T'_{g_1} และ T'_{g_2} ของตัวอย่างเจาะที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่สภาวะ non-anneal และ anneal 74

ตารางผนวกที่

ค 1 ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากชิ้นเจาะเมื่อแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ความเข้มข้นร้อยละ 50 ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน 92

ค 2 ปริมาณของแข็งที่ได้รับในชิ้นเจาะ เมื่อแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ความเข้มข้นร้อยละ 50 ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน 93

ค 3 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างเจาะแช่เยือกแข็ง ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (°บริกซ์) 94

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะการเกิดผลึกน้ำแข็งในเนื้อเยื่อพืช เมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งต่างกัน (a) การแช่เยือกแข็งแบบช้า (b) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว	8
2	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ (A) สารละลาย (B) และอาหาร (C) ในระหว่างการแช่เยือกแข็ง	9
3	ความสัมพันธ์ระหว่างจุดเยือกแข็ง และความดันไอของน้ำเมื่อเติมตัวถูกละลาย	10
4	โครงสร้าง และส่วนประกอบของเซลล์พืช	12
5	ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำ และสารละลายภายในเซลล์ เมื่อแช่ในสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง	14
6	สูตรโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล	20
7	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ในอาหารเมื่อค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 20°ซ	23
8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของอาหารและปริมาณความชื้น (Moisture sorption isotherm) ที่อุณหภูมิ 20°ซ (1) การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ที่ช่วงความชื้นสูง (2) การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ที่ช่วงความชื้นต่ำ	24
9	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของชิ้นลูกแพร์ที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 60°บริกซ์	25
10	การเปลี่ยนแปลงของค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของชิ้นแอปเปิ้ลในระหว่างการออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาลกลูโคส (41°บริกซ์) และสารละลายซูโครส (52°บริกซ์) ที่อุณหภูมิ 30°ซ	26
11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ และอุณหภูมิของอาหาร	27
12	State diagram	29
13	DSC thermogram ของสารละลายซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 50% (w/w)	31
14	ลักษณะการเกิด relaxation (R) และ devitrification (D) ของสารละลายเทรฮาโลสเข้มข้นร้อยละ 45 เมื่อ anneal ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 120 นาที	33
15	ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากชิ้นเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

16 ปริมาณของแข็งที่ได้รับในชิ้นเจาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน 48

17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นเจาะที่ผ่าน และไม่ผ่านการออสโมซิส ในระหว่างการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 °ซ 51

18 ปริมาณความชื้นของเจาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน 53

19 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของเจาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน 55

20 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเจาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน 56

21 การเปลี่ยนแปลง Heat flow ของสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20 ที่สภาวะ non-anneal เมื่อใช้เวลาในการพัก (Holding time) ที่ -60 °ซ นาน 2, 10 และ 15 นาที 65

22 การเปลี่ยนแปลง Heat flow ของสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20 ที่สภาวะ (1) non-anneal, (2) anneal ที่ -40°ซ, (3) anneal ที่ -38°ซ และ (4) anneal ที่ -34°ซ ระยะเวลา anneal นาน 30 นาที 68

ภาพผนวกที่

ค 1 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของชิ้นเจาะ เมื่อละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่างกันโดยใช้วิธีดัดแปลงจากวิธีของ Marani *et al*. (2001) 95

ค 2 ลักษณะเจาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ หลังจากการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 8°ซ นาน 5 ชั่วโมง โดยตัวอย่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°ซ เป็นเวลา 3 (ก), 60 (ข) และ 120 (ค) วัน 96

การปรับปรุงคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็งโดยวิธีออสโมดีไฮเดรชันด้วยน้ำตาลบางชนิด

Application of Osmodehydration with Different Sugars to Improve Quality of Frozen Rambutan

คำนำ

ปัจจุบันตลาดอาหารแช่เยือกแข็งของไทยมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการยอมรับมากขึ้นในด้านของการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม การขยายตัวของตลาดผลไม้แช่เยือกแข็งยังมีน้อย เนื่องจากการแช่เยือกแข็ง และการละลายน้ำแข็ง ทำให้คุณภาพเนื้อสัมผัสของผลไม้ลดลง ความสำเร็จของการถนอมผลไม้ด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งช่วยให้ผลไม้ที่มีฤดูกาลสั้นมีจำหน่ายตลอดทั้งปี และสามารถขยายตลาดของผลไม้แช่เยือกแข็งให้เพิ่มมากขึ้น (Lazarides and Mavroudis, 1995) ในช่วงปี 2544-2548 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกผลไม้แช่เยือกแข็งประมาณ 30,000 - 40,000 ตัน คิดเป็นมูลค่าประมาณ 1,000 ล้านบาท ในขณะที่การส่งออกผลไม้สดแช่เย็น และผลไม้แปรรูปมีมูลค่าสูงถึง 40,000 ล้านบาท (กรมส่งเสริมการส่งออก, 2549)

เงาะจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย สามารถจำหน่ายได้ทั้งตลาดภายในประเทศ และต่างประเทศ แต่มีปัญหาด้านราคาผลผลิตตกต่ำ เนื่องจากเงาะเป็นผลไม้ตามฤดูกาลที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวค่อนข้างสั้นและในช่วงกลางฤดูการเก็บเกี่ยวมีผลผลิตออกมากพร้อมๆ กัน ประกอบกับเงาะสดหลังการเก็บเกี่ยวเกิดการเสื่อมเสียได้ง่าย จึงทำให้เกิดปัญหาราคาผลผลิตตกต่ำเกือบทุกปี จากปัญหาราคาผลผลิตที่ตกต่ำอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกษตรกรบางส่วนเปลี่ยนไปปลูกพืชชนิดอื่นแทน เช่น มังคุด ลองกอง และยางพารา แต่ไม่สามารถช่วยแก้ไขปัญหาราคาผลผลิตเงาะได้ เนื่องจากผลผลิตตามฤดูกาลที่ออกสู่ตลาดพร้อมกันมีผลทำให้ราคาผลผลิตเงาะตกต่ำเช่นเดิม (พีรศิษฐ์, 2549) หากยังไม่มีการแก้ไขปัญหาเงาะล้นตลาดในช่วงที่ผลผลิตออกมามากจะทำให้เกษตรกรลดการปลูกเงาะลงอีก หันไปปลูกพืชไม้ผลอื่นแทน และอาจก่อให้เกิดปัญหาผลไม้ชนิดอื่นล้นตลาดตามมาอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ การแก้ไขปัญหาการเสื่อมเสียของเงาะสดหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งมีอายุการเก็บรักษาไม่เกิน 3-4 วัน ด้วยการเก็บรักษาในสภาวะที่เหมาะสม คือ ที่อุณหภูมิ 12-13^{o}ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90-95 สามารถเก็บรักษาเงาะสดได้เพียง 2-3 สัปดาห์ (จริงแท้, 2546)

การถนอมอาหารด้วยกระบวนการแช่เยือกแข็ง สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ได้นาน 8-12 เดือน (Blond and Meste, 2004) และสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น สี กลิ่น รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการได้ดีกว่าการแปรรูปด้วยกระบวนการที่ใช้ความร้อน เพราะระดับความร้อนที่ใช้เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์มีผลทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง ในขณะที่การแช่เยือกแข็งอาศัยอุณหภูมิต่ำ ลดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เพื่อยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาต่างๆ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะคล้ายของสดภายหลังจากการละลายน้ำแข็ง อย่างไรก็ตามผลไม้ส่วนใหญ่เมื่อผ่านการแช่เยือกแข็ง และการละลายน้ำแข็ง ยังคงมีปัญหาด้านการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส กลิ่น และรสชาติ เนื่องจากผลไม้สดประกอบด้วยน้ำปริมาณมาก (ประมาณร้อยละ 80) เมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งจึงเกิดผลึกน้ำแข็งจำนวนมาก ทำให้ผนังเซลล์ และเนื้อเยื่อของผลไม้ได้รับความเสียหายส่งผลให้ผลไม้มีคุณภาพลดลง จากการทดลองเบื้องต้นได้นำเงาะมาแช่เยือกแข็ง และทำละลายน้ำแข็ง พบว่า การแช่เยือกแข็งทำให้เนื้อสัมผัสของเงาะเปลี่ยนแปลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเงาะสด คือ เนื้อสัมผัสของเงาะหลังจากละลายน้ำแข็งมีลักษณะนิ่ม จึงมีแนวความคิดที่จะปรับปรุงคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็งให้มีลักษณะดีขึ้น และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

การปรับปรุงคุณภาพเงาะแช่เยือกแข็งให้เป็นที่ยอมรับ นอกจากจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาแล้วยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตผล เนื่องจากผลิตภัณฑ์สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดในช่วงนอกฤดูกาลของผลไม้ และสามารถส่งไปผลิตภัณฑ์จำหน่ายยังตลาดต่างประเทศที่ใช้ระยะเวลานานในการขนส่ง นอกจากนี้การนำเฉพาะส่วนของเนื้อเงาะมาแช่เยือกแข็งสามารถช่วยลดพื้นที่ในการเก็บรักษา การขนส่ง และที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือสามารถนำผลิตภัณฑ์ไปรับประทานได้สะดวก ผู้บริโภคไม่ต้องเสียเวลาแกะเปลือก และคว้านเมล็ดออก ผู้แปรรูปสามารถนำไปเป็นส่วนประกอบในการแปรรูปขั้นต่อไปได้อย่างสะดวก

การลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็ง (dehydrofreezing) เป็นวิธีที่ช่วยลดปริมาณผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น ทำให้ลดความเสียหายของเซลล์จากการแช่เยือกแข็ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น (Lazar, 1968; Li and Sun, 2002) ในประเทศสหรัฐอเมริกามีการใช้วิธีนี้ในทางการค้า เพื่อลดขนาดของผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง รวมถึงลดต้นทุนของบรรจุภัณฑ์ พื้นที่ในการเก็บรักษา และการขนส่ง (Huxsoll, 1982; Robbers *et al*., 1997) การลดปริมาณน้ำด้วยวิธีออสโมซิสเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งผลไม้ เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ทำให้ผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก รวมทั้งใช้พลังงานน้อยกว่าการใช้ลมร้อนเพื่อระเหยน้ำออกจากเซลล์ การใช้วิธีออสโมซิสก่อนการแช่เยือกแข็ง หรือที่เรียกว่า osmodehydrofreezing สามารถช่วย

ปรับปรุงคุณภาพสี และเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็ง เช่น ลูกแพร์ (Bolin and Huxsoll, 1993) กีวี (Robbers *et al*., 1997; Talen *et al*., 2001) และแอปเปิ้ล (Marani *et al*., 2001) นอกจากนี้ยังช่วยลดการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกในแอปปริคอท (Forni *et al*., 1997) ผลไม้แช่เยือกแข็งที่ผ่านการออสโมซิสมีคุณภาพในด้านสี เนื้อสัมผัส รสชาติ และการยอมรับดีกว่าผลไม้ที่ไม่ผ่านการลดปริมาณน้ำก่อนการแช่เยือกแข็ง (Dermesonlouoglou and Taoukis, 2006)

ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเงาะแช่เยือกแข็ง โดยใช้สารละลายออสโมซิส 3 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส (sucrose) เทรฮาโลส (trehalose) และมอลติทอล (maltitol) ซูโครสเป็นน้ำตาลที่นิยมใช้ในอาหาร และเครื่องดื่มโดยทั่วไป เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย และมีราคาถูก นอกจากนี้นิยมนำมาใช้ในการออสโมซิสผลไม้ก่อนการอบแห้ง หรือการแช่เยือกแข็งเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Raoult-Wack *et al*, 1995) เทรฮาโลสเป็นน้ำตาลประเภทไดแซคคาไรด์เช่นเดียวกับซูโครส แต่ให้ความหวาน และพลังงานน้อยกว่า โดยมีระดับความหวานร้อยละ 45 ของน้ำตาลซูโครส และให้พลังงาน 3.62 กิโลแคลอรี/กรัม เทรฮาโลสสามารถช่วยรักษาสี และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น หรือแช่เยือกแข็ง รวมทั้งปรับปรุงกลิ่นรสของผลไม้ และผักแช่เยือกแข็ง (Richards and Dexter, 2001) สำหรับมอลติทอล เป็นสารให้ความหวานประเภทโพลีออล หรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ ที่นิยมใช้แทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์ลูกกวาด ขนมหวาน และอาหารสำหรับผู้ป่วยเบาหวาน เนื่องจากมีระดับความหวานร้อยละ 85-95 ซึ่งใกล้เคียงกับซูโครส แต่ให้พลังงานน้อยกว่า (2.8-3.2 กิโลแคลอรี/กรัม) (Kato and Moskowitz, 2001)

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เงาะแช่เยือกแข็งโดยใช้วิธีการออสโมซิสในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล เพื่อลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็ง เปรียบเทียบคุณภาพทางเคมี กายภาพ และการทดสอบทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ผ่านการออสโมซิสกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการลดปริมาณน้ำบางส่วนของเนื้อเงาะด้วยวิธีออสโมซิสในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล

2. เพื่อศึกษาผลของการลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็งเนื้อเงาะด้วยวิธีออสโมซิสในสารละลายชนิดต่างกัน ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเนื้อเงาะที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายชนิดต่างกัน กับคุณภาพทางเคมี และกายภาพของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็ง

การตรวจเอกสาร

1. เงาะ (Rambutan)

เงาะ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Nephelium lappaceum* L. จัดอยู่ในวงศ์ *Spaindaceae* เงาะเป็นผลไม้เขตร้อนประเภท non climacteric (ไม่เกิดการสุกหลังการเก็บเกี่ยวจากต้น) มีอายุหลังการเก็บเกี่ยวสั้นเช่นเดียวกับผลไม้เขตร้อนหลายชนิด โดยมีอายุการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวประมาณ 3-4 วัน และมีลักษณะการเสื่อมเสีย คือ เปลือกจะแห้งเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและดำ เนื้อผลเละและมีน้ำไหลเยิ้ม การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 12-13°ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90- 95 สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ประมาณ 2-3 สัปดาห์ (จริงแท้, 2546)

เงาะจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย สามารถจำหน่ายได้ทั้งตลาดภายในประเทศ และต่างประเทศ สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2548) รายงานว่า ปริมาณผลผลิตเงาะในปี 2548 มีประมาณ 522,000 ตัน โดยส่งออกเป็นเงาะสด 1,992 ตัน คิดเป็นมูลค่าประมาณ 30 ล้านบาท และเงาะบรรจุภาชนะอัดลม 7,184 ตัน มีมูลค่าประมาณ 200 ล้านบาท สำหรับแหล่งพื้นที่เพาะปลูกเงาะที่สำคัญของประเทศไทยอยู่ในบริเวณทางภาคตะวันออก และภาคใต้ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความชื้นสูงเหมาะต่อการเจริญเติบโต พันธุ์เงาะที่ปลูกในประเทศไทยมีหลายพันธุ์ เช่น พันธุ์โรงเรียน พันธุ์สีชมพู พันธุ์น้ำตาลกรวด และพันธุ์สีทอง เป็นต้น เงาะพันธุ์โรงเรียนเป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกเป็นการค้า เนื่องจากมีคุณภาพดี เป็นที่ต้องการของตลาด ลักษณะผลเงาะมีผิวสีแดง โคนขนมีสีแดง ปลายขนมีสีเขียว เนื้อหนาแห้ง และล่อนออกจากเมล็ดได้ง่าย มีรสชาติหวาน และอมเปรี้ยวเล็กน้อย (กรมวิชาการเกษตร, 2550) ส่วนของเนื้อเงาะประกอบด้วยน้ำประมาณร้อยละ 80 (ตารางที่ 1) นอกนั้นเป็นส่วนประกอบของน้ำตาล ใยอาหาร วิตามิน และแร่ธาตุต่างๆ

ผลไม้ตามฤดูกาลมักประสบปัญหาด้านราคาผลผลิตตกต่ำ เนื่องจากผลไม้ตามฤดูกาลมีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวค่อนข้างสั้น พื้นที่ทางภาคตะวันออกของประเทศไทย สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตเงาะได้ประมาณปลายเดือนเมษายน - มิถุนายน ส่วนทางภาคใต้สามารถเก็บเกี่ยวได้ประมาณเดือนกรกฎาคม - กันยายน แต่ในช่วงกลางฤดูกาลเก็บเกี่ยวผลผลิตที่ออกมามากพร้อมๆ กัน ประกอบกับอายุการเก็บรักษาที่สั้น จึงทำให้เงาะมีปัญหาราคาผลผลิตตกต่ำเกือบทุกปี โดยราคารับซื้อจากสวนต่ำสุดประมาณ 4-5 บาท/กิโลกรัม (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2548) จากปัญหาราคาผลผลิตเงาะตกต่ำต่อเนื่องมาหลายปี ส่งผลให้ในปี 2549 ทางภาคตะวันออกของประเทศไทย (จันทบุรี ระยอง และตราด) มีพื้นที่ให้ผลผลิต 245,967 ไร่ ลดลงจากปี 2548 จำนวน 8,699 ไร่ หรือประมาณร้อยละ 3.5

เนื่องจากเกษตรกรเปลี่ยนไปปลูกมังคุด ลองกอง และยางพาราแทน และคาดว่าเงาะจะมีปริมาณผลผลิตลดลงจากปี 2548 ประมาณ 85,000 ตัน แต่ผลผลิตตามฤดูกาลที่ออกสู่ตลาดพร้อมกันยังมีผลทำให้ปัญหาราคาเงาะยังคงตกต่ำเหมือนเดิม (พีรศิษฐ์, 2549) การนำเงาะมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เงาะบรรจุกระป๋อง เงาะอบแห้ง และเงาะกวน เป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาด้านราคาผลผลิตที่ตกต่ำ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิต และเป็นการเพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ให้กับผู้บริโภค (องค์การตลาดเพื่อเกษตรกร, 2550)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบ และคุณค่าทางโภชนาการของเงาะในส่วนที่รับประทานได้

องค์ประกอบ	ปริมาณต่อ 100 กรัม		
	เงาะ [1]	เงาะโรงเรียน [2]	หน่วย
พลังงาน	-	76	กิโลแคลอรี
น้ำ	82.1	81.0	กรัม
โปรตีน	0.9	1.0	กรัม
ไขมัน	0.3	0.3	กรัม
เถ้า	0.3	0.3	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	-	17.4	กรัม
กลูโคส	2.8	-	กรัม
ฟรุกโตส	3.0	-	กรัม
ซูโครส	9.9	-	กรัม
ใยอาหาร	2.8	1.6	กรัม
กรดมาลิค	0.05	-	กรัม
กรดซิตริก	0.31	-	กรัม
ไนอะซิน	0.5	1.3	มิลลิกรัม
แคลเซียม	15	29	มิลลิกรัม
เหล็ก	0.1- 2.5	0.3	มิลลิกรัม
วิตามินซี	70	2	มิลลิกรัม
ไทอามีน	0.01	น้อยมาก	มิลลิกรัม
ไรโบฟลาวิน	0.07	0.13	มิลลิกรัม
โพแทสเซียม	140	-	มิลลิกรัม
โซเดียม	2	-	มิลลิกรัม
แมกนีเซียม	10	-	มิลลิกรัม

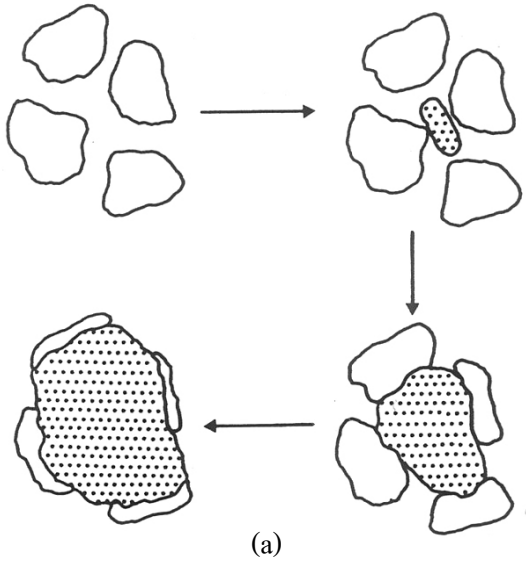
ที่มา : [1] Zee (1998); [2] กรมอนามัย (2544)

2. การแช่เยือกแข็ง (Freezing)

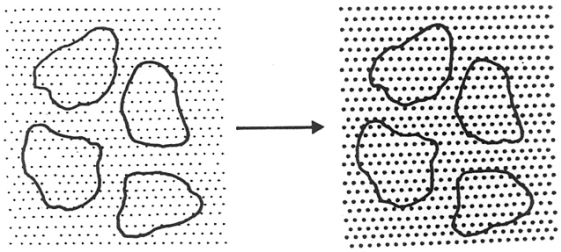
กระบวนการแช่เยือกแข็ง เป็นวิธีการถนอมอาหารด้วยอุณหภูมิต่ำ โดยลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง และทำให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (water activity) ของอาหารลดลง ถึงแม้ว่ากระบวนการแช่เยือกแข็งจะไม่ทำลายเชื้อจุลินทรีย์เหมือนกับการให้ความร้อนแบบสเตอริไลส์ หรือการพาสเจอร์ไรซ์ แต่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และปฏิกิริยาต่างๆ ได้ (Arthey and Ashurst, 1996) การแช่เยือกแข็งทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารได้นาน 6 เดือน ถึง 2 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร และอุณหภูมิในการเก็บรักษา เช่น ผลไม้และผักเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°ซ (0°ฟ) สามารถเก็บได้นาน 8-12 เดือน (Blond and Meste, 2004)

2.1 หลักการแช่เยือกแข็ง

ในการแช่เยือกแข็ง การเกิดผลึกน้ำแข็งประกอบด้วย ขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation) และการโตของผลึกน้ำแข็ง (crystal growth) ขนาดของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง (freezing rate) โดยอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง สามารถคำนวณได้จากผลต่างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อระยะเวลาในการแช่เยือกแข็ง การแช่เยือกแข็งแบบช้า (อัตราเร็วน้อยกว่า 1°ซ/ นาที) ทำให้ผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณภายนอกเซลล์ และเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ทำให้ผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอและผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็ก (Fennema, 1976; Fellows, 1988) ตามภาพที่ 1 โดยทั่วไปการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้า เนื่องจากเซลล์ได้รับความเสียหายจากผลึกน้ำแข็งน้อยลง โดยเฉพาะเนื้อเยื่อของพืชที่ไวต่อขนาดผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น (Rahman, 1999) เมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งจากวิธีการแช่เยือกแข็งแบบต่างๆ การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก (cryogenic) มีอัตราการแช่เยือกแข็งเร็วกว่าการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า (air-blast) และแบบแผ่น (plate) อย่างมาก แต่มีอัตราเร็วกว่าในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับการแช่เยือกแข็งแบบฟลูอิไดซ์เบด (fluidized-bed) และการแช่เยือกแข็งแบบจุ่มในของเหลวที่เย็นจัด (liquid-immersion freezing) ในระบบการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกไนโตรเจนเหลวถูกพ่นไปบนผลิตภัณฑ์จนอุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อยู่ที่ประมาณ -18 ถึง -30°ซ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างไปจากวิธีการแช่เยือกแข็งที่ใช้กันโดยทั่วไป (Fennema, 1976)



(a)



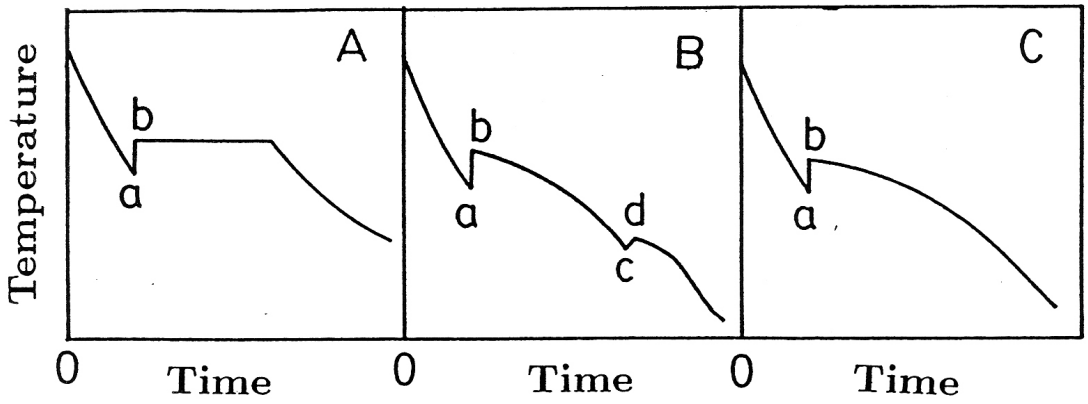
(b)

ภาพที่ 1 ลักษณะการเกิดผลึกน้ำแข็งในเนื้อเยื่อพืช เมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งต่างกัน
(a) การแช่เยือกแข็งแบบช้า (b) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

ที่มา : Fellows (1988)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารในระหว่างการแช่เยือกแข็ง ตามภาพที่ 2 (A) น้ำบริสุทธิ์เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงจุดที่เกิดนิวเคลียสผลึก (a) และความร้อนภายในถูกปลดปล่อยออกมาเร็วกว่าความร้อนที่เคลื่อนที่ออกจากระบบ ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทันทีถึงอุณหภูมิแช่เยือกแข็งเริ่มต้น (b) ในกรณีของสารละลาย (ภาพที่ 2 B) จุด a ไม่ต่ำเหมือนของน้ำบริสุทธิ์ โดยตัวถูกละลายที่เติมลงไปทำให้การเกิดนิวเคลียสแบบ heterogeneous nucleation เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเติมตัวถูกละลายจึงเป็นการเร่งกระบวนการเกิดนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็ง หลังจากการเกิดผลึกน้ำแข็งอย่างสมบูรณ์แล้ว ในกรณีของน้ำ อุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากความร้อนถูกปลดปล่อยออกมา จนถึงจุดเยือกแข็ง (freezing point) ของน้ำที่ 0°ซ สำหรับกรณีของสารละลาย จุดเยือกแข็งต่ำกว่าของน้ำ และเมื่อน้ำในสารละลายถูกแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และผลึกของ

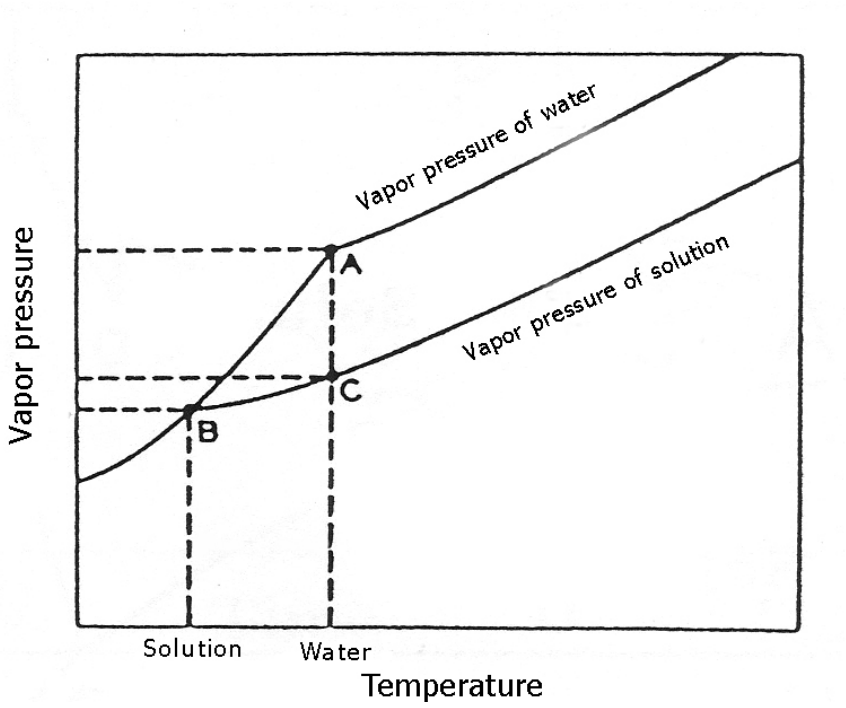
ตัวถูกละลายที่เกิดขึ้นปล่อยความร้อนแฝงออกมา ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงที่จุด c และ d (ภาพที่ 2 B) ซึ่งเป็นจุด eutectic point สำหรับสารละลายที่มีส่วนผสมหลายชนิด หรืออาหารไม่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงที่จุด eutectic point ได้ง่าย (ภาพที่ 2 C) (Rahman, 1995)



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ (A) สารละลาย (B) และอาหาร (C) ในระหว่างการแช่เยือกแข็ง

ที่มา : Rahman (1995)

การที่จุดเยือกแข็งของสารละลายต่ำกว่าของน้ำที่เป็นตัวทำละลายบริสุทธิ์ เนื่องจากตัวถูกละลายมีผลทำให้ความดันไอของสารละลายลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอ และการลดต่ำลงของจุดเยือกแข็ง (freezing point depression) ของสารละลาย ตามภาพที่ 3 ตำแหน่ง B เป็นจุดเยือกแข็งของสารละลายซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่ตำแหน่ง A ส่วนที่ตำแหน่ง C เป็นความดันไอของสารละลายที่อุณหภูมิเดียวกับจุดเยือกแข็งของน้ำ (กฤษณา, 2531; Rahman, 1995; Woodbury, 1997)



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดเยือกแข็ง และความดันไอของน้ำเมื่อเติมตัวถูกละลาย
ที่มา : Rahman (1995)

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง

คุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จึงดีกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้า (Skrede, 1996; Rahman, 1999) นอกจากนี้ ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้แก่ คุณภาพของวัตถุดิบเริ่มต้น ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบก่อนการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิในการเก็บรักษา และวิธีการละลายน้ำแข็ง

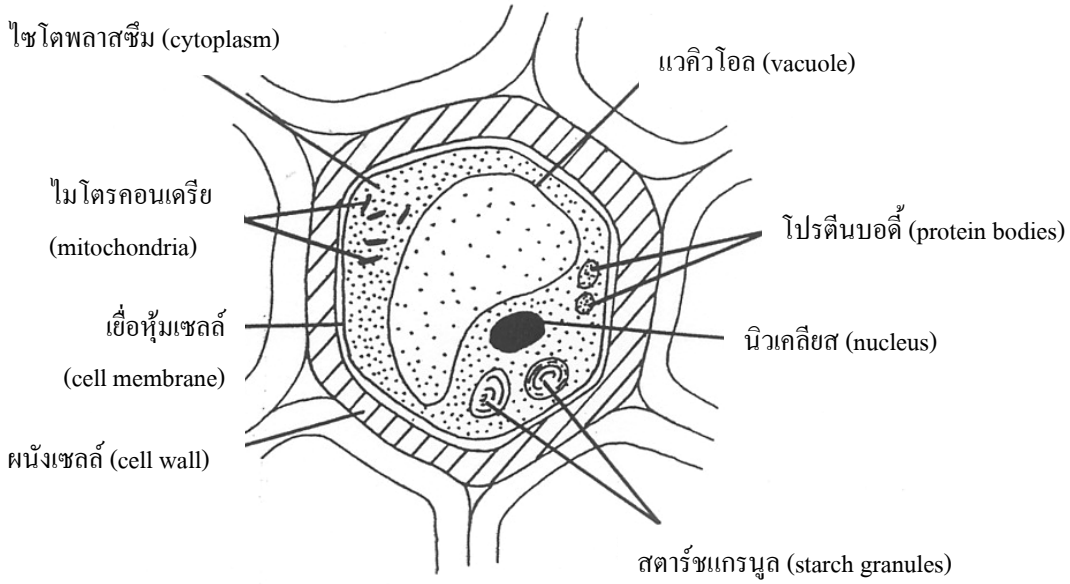
การเลือกใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพดี เช่น ผลไม้ที่มีความสดใหม่ ไม่เน่าเสีย และมีความแก่-อ่อนสม่ำเสมอ ย่อมส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีคุณภาพดี เนื่องจากขั้นตอนต่างๆ ในการแปรรูปไม่สามารถเปลี่ยนคุณภาพของวัตถุดิบที่ไม่ดีให้ดีขึ้นได้ ส่วนขั้นตอนในการเตรียมวัตถุดิบ เช่น การล้างทำความสะอาด และการตัดแต่ง เป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับการเตรียมผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากการล้าง และตัดแต่งหลังจากการละลายน้ำแข็ง ทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียคุณภาพ (Skrede, 1996) โดยทั่วไปอาหารแช่เยือกแข็งนิยมเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°ซ เนื่องจากที่อุณหภูมินี้สามารถ

ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และเพียงพอต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ในทางการค้า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา และระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นมีผลต่อการเกิดผลึกซ้ำ (recrystallization) ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อของเซลล์ และผลิตภัณฑ์หลังการละลายน้ำแข็งมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (drip loss) เพิ่มขึ้น (Pham and Mawson, 1997) ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งเป็นดัชนีประเมินความเสียหายที่เซลล์ได้รับจากการแช่เยือกแข็ง (Skrede, 1996) การเกิดผลึกซ้ำสามารถควบคุมได้โดยเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิคงที่ และระยะเวลาสั้น (Fennema, 1976) ในระหว่างการละลายน้ำแข็ง อาหารได้รับความเสียหายจากปฏิกิริยาทางเคมี ทางกายภาพ และทางจุลินทรีย์ เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาต่างๆ ที่ถูกยับยั้งจากการแช่เยือกแข็งสามารถเกิดขึ้นได้ สำหรับผลไม้แช่เยือกแข็งไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงในการละลายน้ำแข็ง ควรวางผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิห้อง ตู้แช่เย็น หรือในน้ำ จนกระทั่งน้ำแข็งละลายเกือบหมด และควรรับประทานผลไม้แช่เยือกแข็งหลังการละลายน้ำแข็งทันที เนื่องจากสี และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้น (Fennema, 1976)

3. ผลของการแช่เยือกแข็งที่มีต่อคุณภาพของผลไม้

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

ผลไม้สดประกอบด้วยน้ำประมาณร้อยละ 80 หรือมากกว่า และเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากภายในแวคิวโอล (vacuole) ของเซลล์พืช (ภาพที่ 4) เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ของเนื้อสัตว์ ผลไม้มีปริมาณน้ำมากกว่า และมีโครงสร้างของผนังเซลล์ที่ยืดหยุ่นน้อยกว่าเนื้อสัตว์ รวมทั้งมีเยื่อหุ้มเซลล์ที่ไวต่อการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ แม้ว่าการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถลดการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ได้แต่เนื้อเยื่อของเซลล์พืชยังคงได้รับความเสียหายเนื่องจากปริมาณน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมาก นอกจากนี้การขยายปริมาตรของน้ำแข็งก็มีส่วนทำให้เกิดความเสียหายกับเซลล์ เช่น ที่อุณหภูมิ 0°ซ น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นร้อยละ 9 และที่ -20°ซ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 13 (Li and Sun, 2002)



ภาพที่ 4 โครงสร้าง และส่วนประกอบของเซลล์พืช
ที่มา : Edwards (1995)

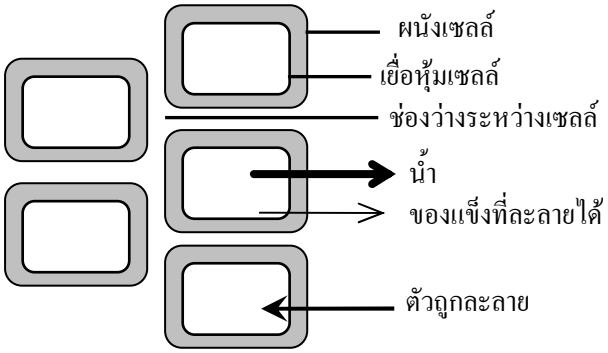
จากลักษณะโครงสร้างของเซลล์พืช ผลไม้ส่วนใหญ่มีโครงสร้างของผนังเซลล์ที่บาง และมีความดันภายในเซลล์ (turgor pressure) ที่ให้ความแน่นเนื้อกับเนื้อสัมผัสของผลไม้ การสูญเสียความแน่นเนื้อของผลไม้จากการแช่เยือกแข็ง สามารถแบ่งออกได้เป็นขั้นตอนที่ผลึกน้ำแข็งทำให้เยื่อหุ้มเซลล์แตกทำให้เซลล์สูญเสียความดันภายในเซลล์ และการโตของผลึกน้ำแข็งที่ทำให้เกิดความเสียหายกับผนังเซลล์ (Edwards, 1995) การที่เซลล์ได้รับความเสียหายจากการแช่เยือกแข็งนอกจากมีผลทำให้ผลไม้สูญเสียความแน่นเนื้อแล้วยังมีผลทำให้ผลไม้เกิดการสูญเสียกลิ่นรส และสี จากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Fito *et al*., 2001) การลดความเสียหายของเซลล์จากการแช่เยือกแข็งสามารถทำได้โดยลดปริมาณผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นให้น้อยลง (Lazar, 1968)

4. การปรับปรุงคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็ง

Dehydrofreezing เป็นการลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็ง ประกอบด้วยขั้นตอนของการลดปริมาณน้ำ และการแช่เยือกแข็ง การลดปริมาณน้ำในผลไม้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็ง โดยอาศัยการลดปริมาณน้ำก่อนการแช่เยือกแข็ง ทำให้ปริมาณผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นลดลง ส่งผลให้เซลล์ได้รับความเสียหายจากการแช่เยือกแข็งน้อยลง (Lazar, 1968; Li and Sun, 2002) การใช้ dehydrofreezing ไม่ทำให้ผลไม้สูญเสียคุณภาพเมื่อน้ำหนัก

และปริมาตรของตัวอย่างลดลงน้อยกว่า หรือเท่ากับร้อยละ 50 และมีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 60-70 (Lazar, 1968) วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ในทางการค้าของประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อลดขนาดของผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง ทำให้ลดต้นทุนของบรรจุภัณฑ์ พื้นที่ในการเก็บรักษา และการขนส่ง (Huxsoll, 1982; Robbers *et al*., 1997) สำหรับเทคนิคที่ใช้ลดปริมาณน้ำบางส่วนในผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง ได้แก่ การใช้วิธีออสโมซิส การใช้ลมเพื่อระเหยน้ำออกจากเซลล์ การใช้วิธีออสโมซิสร่วมกับการใช้ลม และการใช้คลื่นไมโครเวฟ

การใช้วิธีออสโมซิสเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดปริมาณน้ำบางส่วนในผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ทำให้ผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก รวมทั้งใช้พลังงานน้อยกว่าการใช้ลมร้อนเพื่อระเหยน้ำออกจากเซลล์ หลักการของวิธีออสโมซิส คือโมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่จากบริเวณที่น้ำมีความเข้มข้นมาก ไปบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าโดยผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (ภาพที่ 5) ดังนั้นการใช้วิธีออสโมซิสโดยการแช่ผลไม้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง (hypertonic solutions) ได้แก่ สารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ทำให้โมเลกุลของน้ำภายในชิ้นผลไม้ที่มีปริมาณมากกว่าสารละลายแพร่ออกจากเซลล์ ส่งผลให้น้ำภายในชิ้นผลไม้มีปริมาณลดลง ในขณะเดียวกัน ตัวถูกละลายที่มีปริมาณมากในสารละลายก็สามารถแพร่จากสารละลายเข้าไปภายในเซลล์ของผลไม้ (Fito *et al*., 2001) ปริมาณน้ำตาล หรือปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่เพิ่มเข้าไปภายในชิ้นผลไม้มีผลต่อกลิ่น และรสชาติของผลิตภัณฑ์ (Torreggiani and Bertolo, 2001) น้ำตาลซูโครส หรือน้ำตาลชนิดอื่นสามารถช่วยในการรักษากลิ่น ลดการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ และให้ความหวานกับผลไม้ (Fennema, 1976) สำหรับปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการออสโมซิส ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา และชนิดของสารละลายที่ใช้ในการออสโมซิส รวมทั้งอัตราส่วนของผลไม้ต่อสารละลาย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อปริมาณน้ำที่สูญเสีย (water loss) และปริมาณของแข็งที่ได้รับ (solid gain) ภายในชิ้นผลไม้



ภาพที่ 5 ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำ และสารละลายภายในเซลล์ เมื่อแช่ในสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง

ที่มา : ดัดแปลงจาก Lazarides (2001)

การลดปริมาณน้ำบางส่วนในผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็งโดยวิธีออสโมซิส หรือการแช่ผลไม้ในสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง สามารถรักษาสี และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการใช้ลมร้อน Bolin and Huxsoll (1993) ศึกษาการลดปริมาณน้ำบางส่วนในลูกแพร์ก่อนการแช่เยือกแข็ง โดยปอกเปลือกลูกแพร์ หั่นเป็นสี่ส่วน และแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิกความเข้มข้นร้อยละ 1 เพื่อช่วยยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล ก่อนแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 60°บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 60°ซ และกวนสารละลายอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นนำชิ้นผลไม้ออกจากสารละลาย ทำให้เย็น บรรจุในถุงพลาสติกโพลีเอทธิลีน (polyethylene) และแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -15°ซ พบว่า ระยะเวลาการแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายเป็นเวลา 6.4 ชั่วโมง ทำให้น้ำหนักของตัวอย่างลดลงร้อยละ 50 หลังการละลายน้ำแข็ง ลูกแพร์ที่ผ่านการแช่ในสารละลายมีค่าเนื้อสัมผัสที่วัดได้ (แรงกดสูงสุด) มากกว่าตัวอย่างที่ใช้ลมร้อน (60°ซ) และสีของลูกแพร์ที่ใช้ลมร้อนเปลี่ยนเป็นสีออกชมพู (a* เป็นบวก) ซึ่งสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสีได้ ผลิตภัณฑ์ลูกแพร์แช่เยือกแข็งมีปริมาตรลดลงร้อยละ 38-48

Robbers *et al*. (1997) ศึกษาผลของการลดปริมาณน้ำของชิ้นกีวีก่อนการแช่เยือกแข็ง โดยใช้วิธีการลดความชื้นชิ้นกีวี (รูปทรงลูกบาศก์ยาวด้านละ 13 มม.) ด้วยลมอุณหภูมิ 30°ซ ความเร็วลม 5 $\pm$ 0.1 ม./วินาที วิธีการแช่ในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 60 และ 72°บริกซ์ เติมกรดแอสคอร์บิกร้อยละ 1 และกรดซิตริกร้อยละ 0.2 และใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน ปรับให้ตัวอย่างมีความชื้นร้อยละ 40-60 ก่อนการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่าที่อุณหภูมิ -40 $\pm$ 3°ซ ความเร็วลม 6.5 $\pm$ 0.1

ม./วินาที วิธีการลดความชื้นด้วยลมร่วมกับการแช่ในสารละลาย ทำให้ลดระยะเวลาในการลดปริมาณความชื้น เนื้อสัมผัสของผลไม้หลังการแช่เยือกแข็งมีความแน่นเนื้อลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลไม้สด โดยตัวอย่างที่ใช้ลมและแช่ในสารละลายสามารถรักษาความแน่นเนื้อของผลไม้ได้ดีที่สุด นอกจากนี้กรดแอสคอร์บิก และกรดซิตริก สามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาล และลดการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกในระหว่างการออสโมซิส แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ลมเพื่อลดความชื้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์

การศึกษาของ Forni *et al*. (1997) พบว่า การลดปริมาณน้ำบางส่วนในแอปริคอทแช่เยือกแข็ง โดยปรับให้เป็นอาหารที่มีความชื้นระดับปานกลาง (intermediate moisture food) ด้วยการแช่แอปริคอท (รูปทรงลูกบาศก์ยาวด้านละ 10 มม.) ในสารละลายต่างชนิดกัน ได้แก่ ซูโครส มอลโตส และซอร์บิทอล ความเข้มข้นร้อยละ 65 เติมกรดแอสคอร์บิกร้อยละ 1 และโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 0.1 นาน 45 และ 120 นาที ที่ระดับความดันบรรยากาศ เทียบกับการแช่สารละลายภายใต้สภาวะสุญญากาศ 700 มม.ปรอท ที่อุณหภูมิ 25°ซ นาน 15 นาที โดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 65°ซ เพื่อปรับให้ตัวอย่างมีความชื้นระดับปานกลางโดยมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ เท่ากับ 0.86 จากนั้นนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°ซ ความเร็วลม 4 ม./วินาที เก็บรักษาที่ -20°ซ ในถุงพลาสติก เป็นเวลา 8 เดือน พบว่าการออสโมซิสภายใต้สภาวะสุญญากาศ ชนิดของน้ำตาลไม่มีผลต่อปริมาณน้ำที่สูญเสีย และปริมาณของแข็งที่ได้รับ ในขณะที่การแช่ผลไม้ที่ระดับความดันบรรยากาศในสารละลายซอร์บิทอล ทำให้ปริมาณน้ำที่สูญเสีย และปริมาณของแข็งที่ได้รับมีมากที่สุด ส่วนสารละลายมอลโตส มีผลทำให้อัตราส่วนของปริมาณของแข็งทั้งหมดระหว่างก่อน และหลังการแช่มีค่าน้อยที่สุด ตัวอย่างหลังการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างกัน ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ 45 นาที และภายใต้สภาวะสุญญากาศ มีการแลกเปลี่ยนระหว่างของแข็งและของเหลวภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ และสภาวะสุญญากาศนี้มีค่าความสมดุลของน้ำตาล ปริมาณกรดแอสคอร์บิก และปริมาณกรดทั้งหมดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่สำหรับตัวอย่างที่ใช้เวลาแช่ 120 นาที มีปริมาณน้ำตาล และกรดแอสคอร์บิกเพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างที่ใช้เวลาแช่ 45 นาที อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T'_g) ของแอปริคอทที่แช่ในสารละลายมอลโตส มีค่าสูงที่สุด คือ -48°ซ รองลงมาเป็นตัวอย่างที่แช่ในสารละลายซูโครส และซอร์บิทอล มีค่าเท่ากับ -52 และ -60°ซ ตามลำดับ มอลโตสมีประสิทธิภาพในการป้องกันการสลายตัวของกรดแอสคอร์บิก และการรักษาสีของแอปริคอทแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าน้ำตาลซูโครส และซอร์บิทอล ซึ่งประสิทธิภาพของมอลโตสในการป้องกันสลายตัวของกรดแอสคอร์บิก มีความสัมพันธ์กับค่า T'_g ของตัวอย่าง

ในการปรับปรุงคุณภาพผลไม้กีวีแช่เยือกแข็ง Talens *et al.*(2001) พบว่า การแช่ชิ้นกีวี (เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. หนา 1 ซม.) ในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 35, 45, 55 และ 65°บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 30°ซ ในสภาวะบรรยากาศ ทำให้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (drip loss) ลดลง และสีของกีวีใกล้เคียงกับของสดเมื่อใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เนื้อสัมผัสของกีวีหลังการละลายน้ำแข็งมีค่าเนื้อสัมผัสมากที่สุดในตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลายความเข้มข้น 45°บริกซ์ Marani *et al*. (2001) พบว่า การแช่ชิ้นกีวี และแอปเปิ้ลในสารละลายน้ำตาลฟรุกโตส ซูโครส และกลูโคส ตัวอย่างมีอัตราการสูญเสียน้ำออกเร็วกว่าการแช่ในสารละลายน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (high molecular weight sugars) และตัวอย่างมีปริมาณของแข็งที่ได้รับมากขึ้นเมื่อใช้น้ำตาลที่มีขนาดโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งลดลงเมื่อระยะเวลาในการออสโมซิสเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างกีวีที่แช่ในสารละลายซูโครส และฟรุกโตสมีปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งน้อยกว่าตัวอย่างอื่น หลังการแช่ในสารละลายเนื้อสัมผัสของกีวีที่วัดด้วยเครื่องมือมีค่าลดลง และตัวอย่างที่แช่ในสารละลายกลูโคสมีความนิ่มมากกว่าตัวอย่างอื่น อย่างไรก็ตาม หลังการแช่เยือกแข็งและละลายน้ำแข็ง ตัวอย่างกีวีมีค่าเนื้อสัมผัสลดลง และไม่มีความแตกต่างระหว่างตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการออสโมซิส ในขณะที่ชิ้นแอปเปิ้ลที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ (ยกเว้น ฟรุกโตส) มีค่าเนื้อสัมผัสดีกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส โดยระยะเวลาการแช่ที่นานขึ้นมีผลทำให้ค่าเนื้อสัมผัสลดลง

นอกจากนี้การลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีออสโมซิสสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของผักแช่เยือกแข็งชนิดต่างๆ Giannakourou and Taoukis (2003) ศึกษาการลวกเมล็ดถั่วลันเตาที่อุณหภูมิ 90°ซ นาน 2 นาที ก่อนแช่ในสารละลายโอลิโกฟรุกโตส มอลติทอล และโอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลส ความเข้มข้นร้อยละ 56.5 ในอัตราส่วน 1:5 พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 35°ซ นาน 4 ชั่วโมง และ 5°ซ นาน 12 ชั่วโมง ในการออสโมซิส ทำให้อัตราส่วนของปริมาณน้ำที่สูญเสียต่อปริมาณของแข็งที่ได้รับของทั้งสองสภาวะแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดสมดุลจากการใช้อุณหภูมิ และเวลาร่วมกันในการออสโมซิส ทั้งนี้การใช้มอลติทอลซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย ทำให้ตัวอย่างมีปริมาณน้ำที่สูญเสีย และปริมาณของแข็งที่ได้รับมากที่สุด ผลการศึกษาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T'_g) แสดงให้เห็นว่า เมล็ดถั่วลันเตาที่แช่ในสารละลายโอลิโกฟรุกโตส มีค่า T'_g สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า T'_g ของสารละลายที่ใช้ (สารละลายโอลิโกฟรุกโตส มอลติทอล และโอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลส มีค่า T'_g ประมาณ -26.8, -35.0 และ -32.6°ซ ตามลำดับ) ตัวอย่างที่ใช้สารละลายโอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลสมีความคงตัวของสีมากกว่าตัวอย่างที่ใช้โอลิโกฟรุกโตส อย่างไรก็ตาม การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (-18 และ -24°ซ) ตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายทั้ง 3 ชนิด สามารถรักษาสีของผลิตภัณฑ์ได้

ใกล้เคียงกันและแตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ผลการทดลองด้านคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของเมล็ดถั่วลันเตาไม่สามารถอธิบายจากค่าที่วัดได้ เนื่องจากตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายทั้งหมดมีค่าความแข็ง (hardness) และค่าการรวมตัวของอาหาร (cohesiveness) มากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย แต่ค่าพลังงานในการเคี้ยว (chewiness) และค่าความยืดหยุ่น (elasticity) ของทุกตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$) เมื่อตรวจสอบปริมาณกรดแอสคอร์บิก พบว่า อัตราการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกของตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแต่ละชนิดมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย เมล็ดถั่วลันเตาที่ผ่านการออสโมซิสก่อนการแช่เยือกแข็งสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสี และอัตราการสูญเสียกรดแอสคอร์บิก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา อุณหภูมิที่ต่ำกว่า -18°ซ มีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นลดลง

Dermesonlouoglou and Taoukis (2006) ศึกษาผลของการออสโมซิสต่อคุณภาพของผักและผลไม้แช่เยือกแข็ง (แตงกวา มะเขือเทศ สตรอเบอรี และแตงโม) โดยแช่ชิ้นผัก และผลไม้ในสารละลายมอลโตเด็กซ์ตริน และโอลิโกฟรุกโตส ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 56.5 มีการเติมโซเดียม-คลอไรด์ร้อยละ 3.5 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.5 อัตราส่วนผลไม้ต่อสารละลายเท่ากับ 1:5 ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°ซ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°ซ เป็นเวลา 3, 6 และ 12 เดือน พบว่าเนื้อสัมผัสของผัก และผลไม้ที่แช่ด้วยสารละลายมีค่าความแน่นเนื้อมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส และระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลทำให้ความแน่นเนื้อของทุกตัวอย่างลดลง การออสโมซิสสามารถปรับปรุงคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของผักและผลไม้แช่เยือกแข็งในด้านสี เนื้อสัมผัส รสชาติ และการยอมรับ เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิสได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และรสชาติลดลง

ส่วน Dermesonlouoglou *et al*. (2007) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของมะเขือเทศแช่เยือกแข็ง โดยนำชิ้นมะเขือเทศแช่ในสารละลายกลูโคส มอลโตเด็กซ์ตริน โอลิโกฟรุกโตส และโอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลส ที่ความเข้มข้นร้อยละ 56.5 เติมโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3.5 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.5 ใช้อัตราส่วนของมะเขือเทศต่อสารละลายเท่ากับ 1:5 และแช่ที่อุณหภูมิ 35 $\pm$ 1°ซ หลังจากนั้นนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°ซ เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เตรียมโดยลวกในน้ำอุณหภูมิ 80°ซ นาน 8 วินาที และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิสก่อนการแช่เยือกแข็ง มะเขือเทศที่ผ่านการแช่ในสารละลายชนิดต่างกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีปริมาณน้ำที่สูญเสียแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ตัวอย่างที่แช่ในสารละลายกลูโคสซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่ามีปริมาณของแข็งละลายได้ที่ได้รับมากกว่าตัวอย่างที่แช่สารละลายชนิดอื่น มะเขือเทศแช่เยือกแข็ง

ที่ผ่านการแช่ในสารละลายทุกชนิดมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ประมาณ 0.97 ส่วนตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่มีค่าประมาณ 0.99 สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายลดลงจาก 4.0 ถึง 3.5 โดยตัวอย่างที่แช่สารละลายโอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลส มีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงมากที่สุด การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 และ -20°ซ นาน 12 เดือน ไม่มีผลต่อค่าวอเตอร์แอกติวิตี้และค่าความเป็นกรด-ด่าง ในระหว่างการเก็บรักษาอัตราการสูญเสียสีของมะเขือเทศแช่เยือกแข็งที่ผ่านการออสโมซิสมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส แต่การแช่ในสารละลายทุกชนิดทำให้มะเขือเทศมีค่าสีแดง (a-value) เพิ่มขึ้นก่อนการแช่เยือกแข็ง จึงทำให้ยังมีค่าสีแดงมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส การลวกมีผลทำให้มะเขือเทศมีค่าสีแดงลดลง มีการสูญเสียวิตามินซี และมีค่าเนื้อสัมผัสลดลง การแช่มะเขือเทศในสารละลายทุกชนิดช่วยลดการสูญเสียวิตามินซี และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°ซ สามารถช่วยลดการสูญเสียวิตามินซีได้มากกว่าที่อุณหภูมิ -12°ซ ระยะเวลาการเก็บรักษามีผลทำให้ค่าเนื้อสัมผัสของตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายเปลี่ยนแปลงมาก อย่างไรก็ตาม ที่ระยะเวลาการเก็บ 12 เดือน ตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลายยังคงมีค่าเนื้อสัมผัสมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่ โดยสารละลายมอลโตเด็กซ์ตรินสามารถปรับปรุงเนื้อสัมผัสของมะเขือเทศได้ดีทั้งที่อุณหภูมิ -12 และ -20°ซ เมื่อทดสอบคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายมอลโตเด็กซ์ตริน และโอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลสได้รับคะแนนความชอบในด้านสี เนื้อสัมผัส และรสชาติมากกว่าตัวอย่างอื่น

5. สูตรโครงสร้างทางเคมี คุณสมบัติ และการใช้ประโยชน์ของน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล

5.1 สูตรโครงสร้างทางเคมี และคุณสมบัติของน้ำตาล

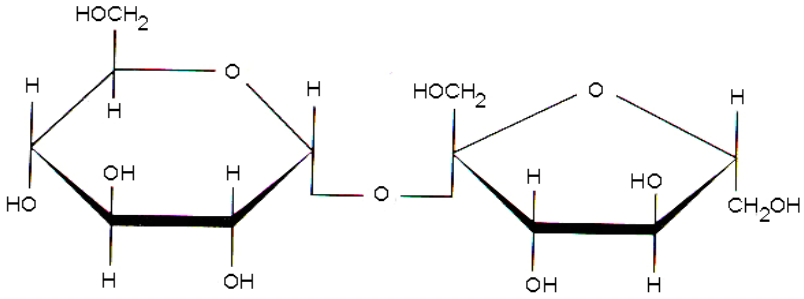
น้ำตาลซูโครส (α-D-glucopyranosyl-1,2-β-D-fructofuranoside) เทรฮาโลส (α-D-glucopyranosyl-1,1-α-D-glucopyranoside) และมอลติทอล (α-D-glucopyranosyl-1,4-D-glucitol) เป็นไดแซคคาไรด์ (disaccharide) ประเภท non reducing sugar มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียง หรือเท่ากัน (322, 322 และ 324 ตามลำดับ) โดยมอลติทอลจัดเป็นสารให้ความหวานประเภทโพลีออล (polyol) หรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ (sugar alcohol) น้ำตาลทั้ง 3 ชนิด มีสูตรโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 6

น้ำตาลซูโครสประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส และฟรุกโตส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α- (1⟶2) มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $C_{12}H_{22}O_{11}$ น้ำตาลซูโครสไม่คงตัวในสารละลายที่เป็นกรด

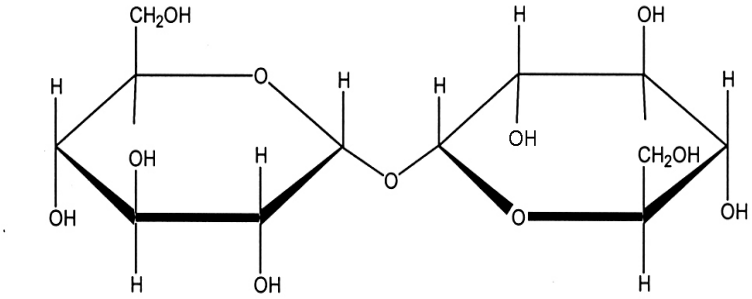
ถูกไฮโดรไลส์จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้เป็น กูลโคส และฟรุกโตส ซึ่งเป็นน้ำตาลอินเวอร์ต (invert sugar) การให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึง 210°ซ ทำให้ซูโครสเกิดการสลายตัวได้เป็นสีน้ำตาล (caramel) (กฤษณา, 2531) น้ำตาลชนิดนี้พบมากในอ้อย และบีท

เทรฮาโลส ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกูลโคส 2 โมเลกุล เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-(1⟶1) มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $C_{12}H_{22}O_{11}$ ในธรรมชาติเทรฮาโลสทำหน้าที่ช่วยรักษาสภาพของเนื้อเยื่อเซลล์จากสภาพแห่เยือกแข็ง หรือการได้รับอุณหภูมิสูง สามารถพบเทรฮาโลสได้ในแมลง กุ้ง และพบมากในเห็ด นอกจากนี้พบเทรฮาโลสในอาหารบางชนิด เช่น น้ำผึ้ง ไวน์ เชอร์รี่ ขนมปัง และมิริน (mirin) (Richards and Dexter, 2001) ปัจจุบันสามารถผลิตเทรฮาโลสจากสตาร์ชโดยวิธีการใช้เอนไซม์ที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท Hayashibara ในประเทศญี่ปุ่น (Richards and Dexter, 2001; Cargill, 2006) แม้ว่าวิธีการผลิตเทรฮาโลสถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่ยังไม่สามารถผลิตเทรฮาโลสให้มีราคาถูกเพียงพอต่อความต้องการใช้ประโยชน์ทั้งในอุตสาหกรรมการผลิตยา เครื่องสำอาง และอาหารได้ เทรฮาโลสมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว คุณสมบัติโดยทั่วไป คือ สามารถละลายได้ดีในน้ำ มีความคงตัวต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH 3.5-10) ดูดความชื้นได้ต่ำ และมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสูง (117°ซ) ระดับความหวานของเทรฮาโลส ประมาณร้อยละ 45 ของน้ำตาลซูโครส ให้พลังงานประมาณ 3.62 กิโลแคลอรี/กรัม และไม่ทำให้เกิดลักษณะอาการท้องเดิน (Richards and Dexter, 2001)

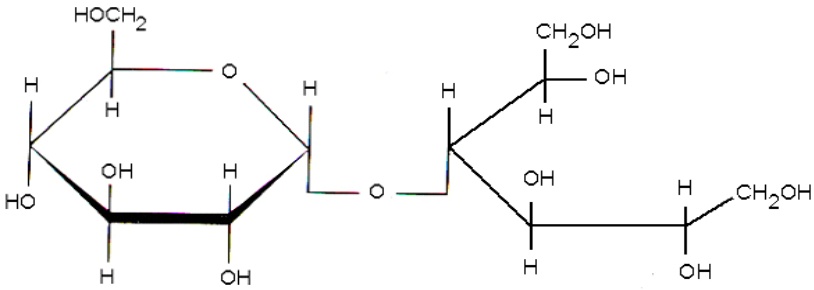
มอลติทอลเป็นสารให้ความหวานที่ผลิตได้จากปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) ในน้ำตาลมอลโตส (maltose) โครงสร้างทางเคมีของมอลติทอลประกอบด้วยโมเลกุลของ กูลโคส และซอร์บิทอล เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-(1⟶4) มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $C_{12}H_{24}O_{11}$ คุณสมบัติโดยทั่วไปของมอลติทอล ได้แก่ มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง (180°ซ) จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อได้รับความร้อน มีความคงตัวที่สภาวะเป็นกรด และด่าง (pH 2-10) (Ecogreen, 2006) มีความหวานใกล้เคียงกับน้ำตาลซูโครส (ร้อยละ 85-95) และให้พลังงานประมาณ 2.8-3.2 กิโลแคลอรี/กรัม (Kato and Moskowitz, 2001) การรับประทานมอลติทอลในปริมาณมากอาจทำให้เกิดอาการท้องเดินได้ โดยปริมาณที่แนะนำคือไม่ควรเกิน 30-50 กรัม/วัน (Schiweck and Ziesenitz, 1996)



ซูโครส



เทรฮาโลส



มอลติทอล

ภาพที่ 6 สูตรโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล

คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล เปรียบเทียบในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล

	ซูโครส [(1)]	เทรฮาโลส [(2)]	มอลติทอล [(1)]
จุดหลอมเหลว (^{o}ซ)	190	210.5	150
อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (^{o}ซ)	52	117	47
ความคงตัวต่อความร้อน (^{o}ซ)	< 150	120 (90 นาที)	> 160
ความสามารถในการละลาย (% w/w)	67 (25^{o}ซ)	68.9 (20^{o}ซ)	60 (25^{o}ซ)
การดูดความชื้น (Hygroscopicity)	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ

ที่มา : [(1)] Eridex (2006)

[(2)] Higashiyama (2002)

5.2 การใช้น้ำตาลในผลิตภัณฑ์อาหาร

น้ำตาลซูโครสถูกกำหนดให้เป็นมาตรฐานของรสหวาน นิยมใช้เพื่อให้ความหวานกับอาหารและเครื่องดื่มหลากหลายชนิด เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ง่าย และมีราคาถูก นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในการออสโมซิสผลไม้ก่อนการอบแห้ง หรือการแช่เยือกแข็งเพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านสีและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (Raoult-Wack *et al*, 1995) เช่น ในลูกแพร์ (Bolin and Huxsoll, 1993) และกีวี (Robbers *et al.*, 1997; Talens *et al*.,2001)

การใช้ประโยชน์ของเทรฮาโลสเพื่อปรับปรุงคุณภาพในด้านต่างๆ ของผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ใช้รักษาสี และเนื้อสัมผัสของอาหารแช่เย็น และอาหารแช่เยือกแข็ง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของเทรฮาโลสสามารถแทนโมเลกุลของน้ำซึ่งเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของโปรตีนได้ จึงทำให้เทรฮาโลสสามารถรักษาโครงสร้างโมเลกุลของโปรตีนหลังจากการทำแห้ง หรือการแช่เยือกแข็ง นอกจากนี้ยังมีการนำเทรฮาโลสมาใช้ในการปรับปรุงกลิ่นรสของผัก และผลไม้แช่เยือกแข็ง รวมทั้งใช้ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี ลูกกวาด และผลิตภัณฑ์จากนม (Richards and Dexter,

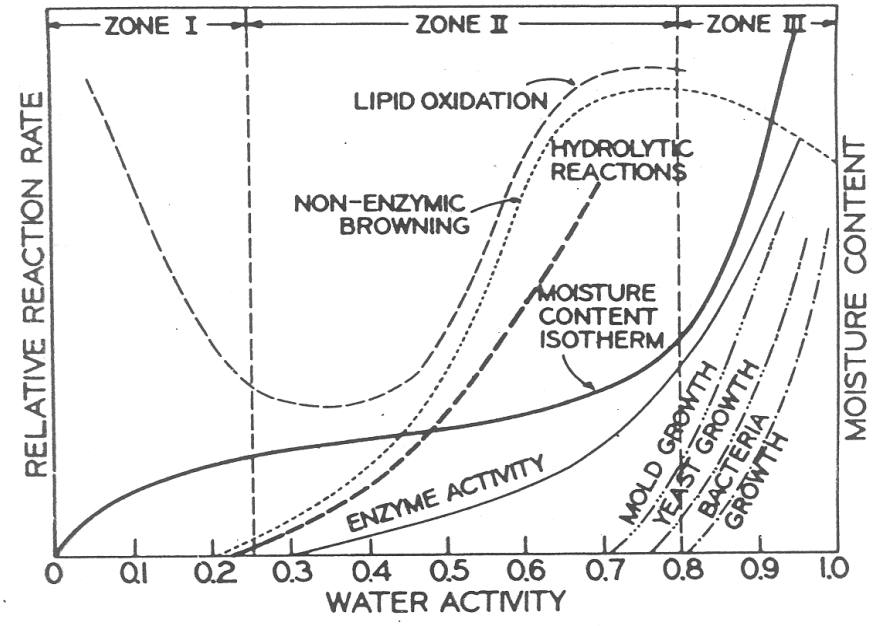
2001) เทรฮาโลสเป็นน้ำตาลที่ได้รับความสนใจในการนำไปใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลายชนิด เนื่องจากมีรสชาติที่หวานน้อยกว่าซูโครส ให้พลังงานต่ำ และมีคุณสมบัติเด่นในด้านการปรับปรุงคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็ง หรือที่เรียกว่า cryoprotectant Osako *et al.* (2005) พบว่า การเติมเทรฮาโลสปริมาณร้อยละ 5.0 และ 7.5 ในผลิตภัณฑ์ซูริมิทำให้ลดการเสียสภาพของโปรตีน และช่วยรักษาความสามารถในการขึ้นรูปของเจลได้ดีเช่นเดียวกับการใช้น้ำตาลซูโครส กลูโคส และซอร์บิทอล ส่วนงานวิจัยของ Zhou *et al*. (2006) รายงานว่า เทรฮาโลสมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสียสภาพของโปรตีนของซูริมิได้มาก เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำตาลซูโครส และซอร์บิทอล (อัตราส่วน 1:1) ที่ใช้ผลิตซูริมิในทางการค้า การใช้สารละลายเทรฮาโลสผสมกับโอลิโกฟรุกโตส เพื่อแช่เมล็ดถั่วลันเตาก่อนการแช่เยือกแข็ง Giannakourou and Taoukis (2003) พบว่า สามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสี และอัตราการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกได้ นอกจากนี้การแช่มะเขือเทศในสารละลายเทรฮาโลสผสมกับโอลิโกฟรุกโตสเพื่อลดปริมาณน้ำก่อนการแช่เยือกแข็ง สามารถช่วยในการปรับปรุงคุณภาพด้านสี เนื้อสัมผัส และรสชาติของมะเขือเทศแช่เยือกแข็ง (Dermesonlouoglou *et al*., 2007)

มอลติทอลเป็นสารให้ความหวานชนิดหนึ่ง นิยมนำมาใช้แทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์อาหารสำหรับผู้ป่วยเบาหวาน เนื่องจากมอลติทอลถูกย่อย และดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ช้ากว่าน้ำตาลซูโครส และกลูโคส นอกจากนี้ยังใช้แทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ประเภทลูกกวาด เบเกอรี และชอกโกแลต (Kato and Moskowitz, 2001) Ronda *et al*. (2005) ศึกษาการใช้น้ำตาลแอลกอฮอล์หลายชนิดเพื่อทำหน้าที่เป็น bulking agent (สารให้ปริมาณในผลิตภัณฑ์) ทดแทนน้ำตาลซูโครสในขนมเค้ก ผลการทดลอง พบว่า ตัวอย่างที่ใช้มอลติทอล และไซลิทอลมีค่าเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ใช้น้ำตาลซูโครส และได้รับคะแนนการยอมรับดีกว่าการใช้น้ำตาลชนิดอื่นแทน จากคุณสมบัติของมอลติทอลที่มีรสหวานใกล้เคียงกับน้ำตาลซูโครส ให้พลังงานต่ำซึ่งเหมาะสำหรับผู้ป่วยเบาหวาน และไม่ทำให้ฟันผุ Giannakourou and Taoukis (2003) ได้เลือกใช้มอลติทอลเป็นหนึ่งในสารละลายเพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของเมล็ดถั่วลันเตาแช่เยือกแข็ง มอลติทอลสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสี และอัตราการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกของเมล็ดถั่วลันเตาได้เช่นเดียวกับการใช้สารละลายโอลิโกฟรุกโตส และโอลิโกฟรุกโตสผสมเทรฮาโลส

6. ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (Water activity; a_w) กับความคงตัวของอาหาร

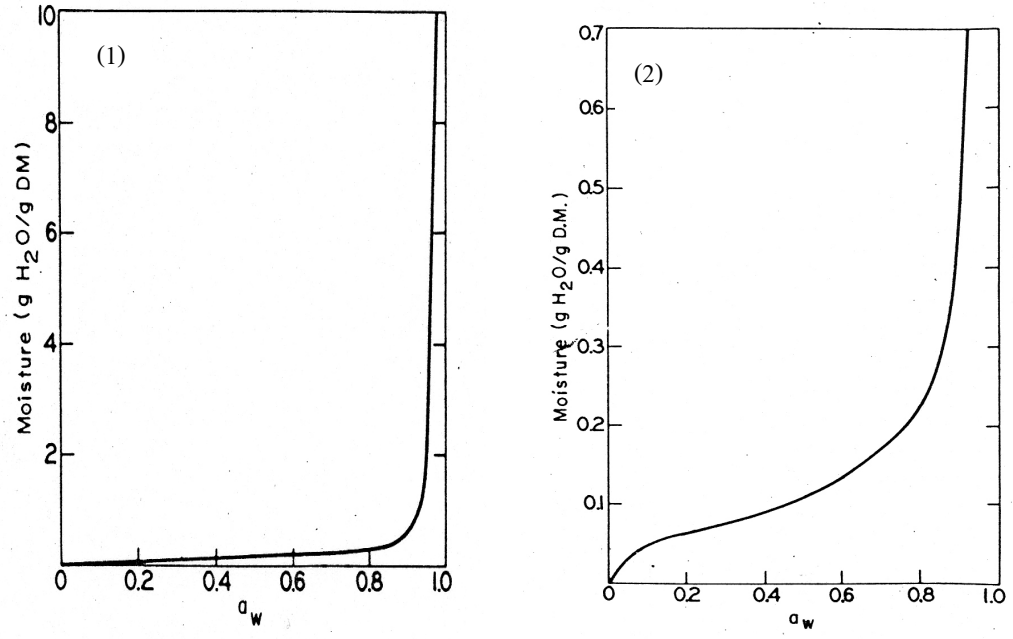
ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในอาหาร ได้แก่ ปฏิกิริยาทางเคมี การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และการทำงานของเอนไซม์ ตามภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลง และความคงตัวของอาหารมีความสัมพันธ์กับค่าวอเตอร์แอคติวิตี้มากกว่าปริมาณความชื้น (Fennema, 1981) ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของอาหารมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความดันไอของน้ำในอาหาร (p) ต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ (p_o) ที่อุณหภูมิเดียวกัน มีค่าตั้งแต่ 0 – 1 และมีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล (ERH; Equilibrium relative humidity) ดังสมการ

$$a_w = p / p_o = ERH (\%) / 100$$



ภาพที่ 7 อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ในอาหารเมื่อค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 20°ซ
ที่มา: Fennema (1975)

ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของอาหารมีความสัมพันธ์กัน ดังภาพที่ 8 ในช่วงที่อาหารมีปริมาณความชื้นสูง ภาพที่ 8 (1) การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เพียงเล็กน้อย ในขณะที่ช่วงปริมาณความชื้นต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 50) ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ ภาพที่ 8 (2) (Fennema, 1975; Belitz and Grosch, 1999)

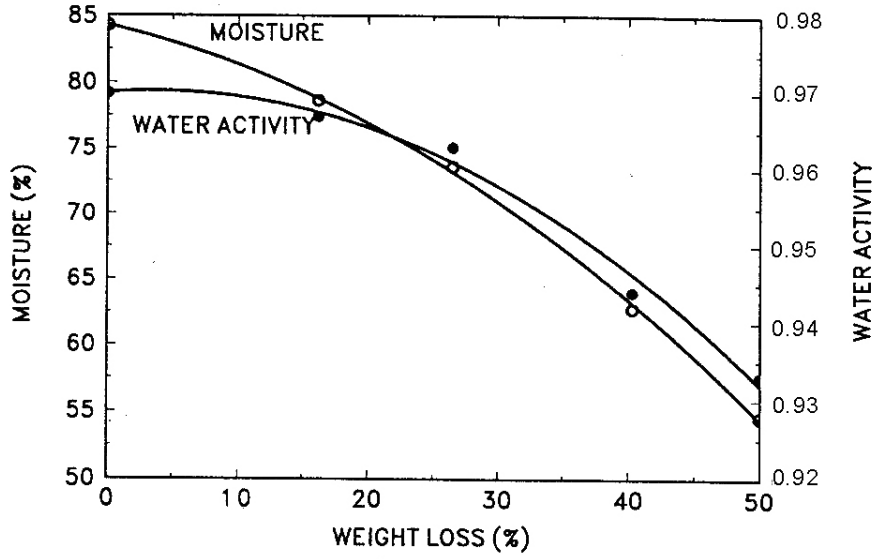


ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของอาหารและปริมาณความชื้น (Moisture sorption isotherm) ที่อุณหภูมิ 20°ซ (1) การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ที่ช่วงความชื้นสูง (2) การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ที่ช่วงความชื้นต่ำ

ที่มา : Fennema (1975)

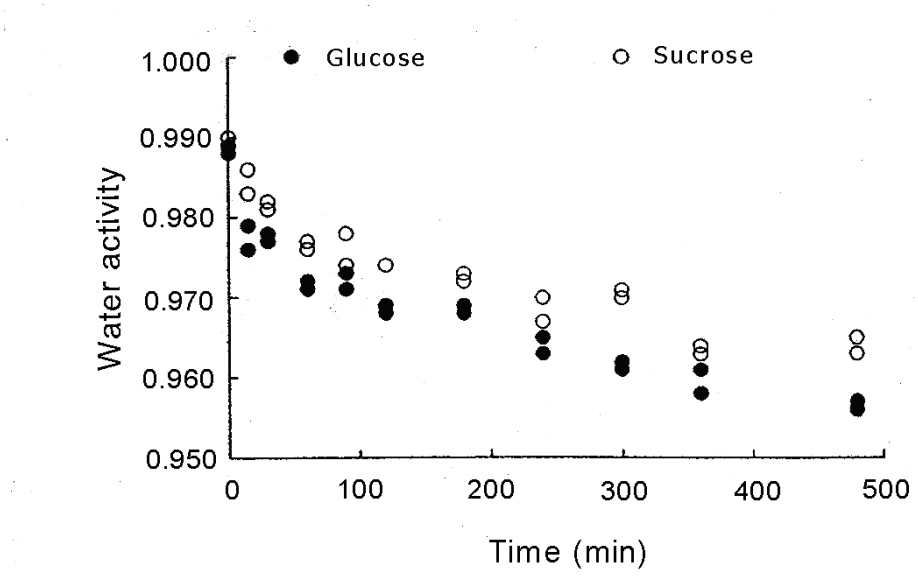
Bolin and Huxsoll (1993) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ และปริมาณความชื้นของผลไม้ที่ผ่านการออสโมซิส พบว่า ลูกแพร์ที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 60°บริกซ์ มีปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ลดลง จากภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความชื้นที่ลดลงในช่วงแรก จากร้อยละ 85 เป็นร้อยละ 80 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าวอเตอร์-แอคติวิตี้เพียงเล็กน้อย โดยมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ประมาณ 0.97 แต่เมื่อปริมาณความชื้นลดลงเพิ่มขึ้น ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้มีแนวโน้มลดลงมากขึ้น โดยเส้นกราฟมีความชันเพิ่มขึ้น ส่วน Monsalve *et al.* (1993) พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของชิ้นแอปเปิ้ลที่ผ่านการแช่ในสารละลาย

น้ำตาลกลูโคสมีแนวโน้มลดลงมากกว่าน้ำตาลซูโคส (ภาพที่ 10) โดยตัวอย่างแอปเปิ้ลที่แช่ในสารละลายกลูโคส และซูโครสมีปริมาณน้ำที่สูญเสียใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณของแข็งที่ได้รับเมื่อแช่ในสารละลายกลูโคสมีมากกว่าการแช่ในสารละลายซูโครส



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของชิ้นลูกแพร์ที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 60°บริกซ์

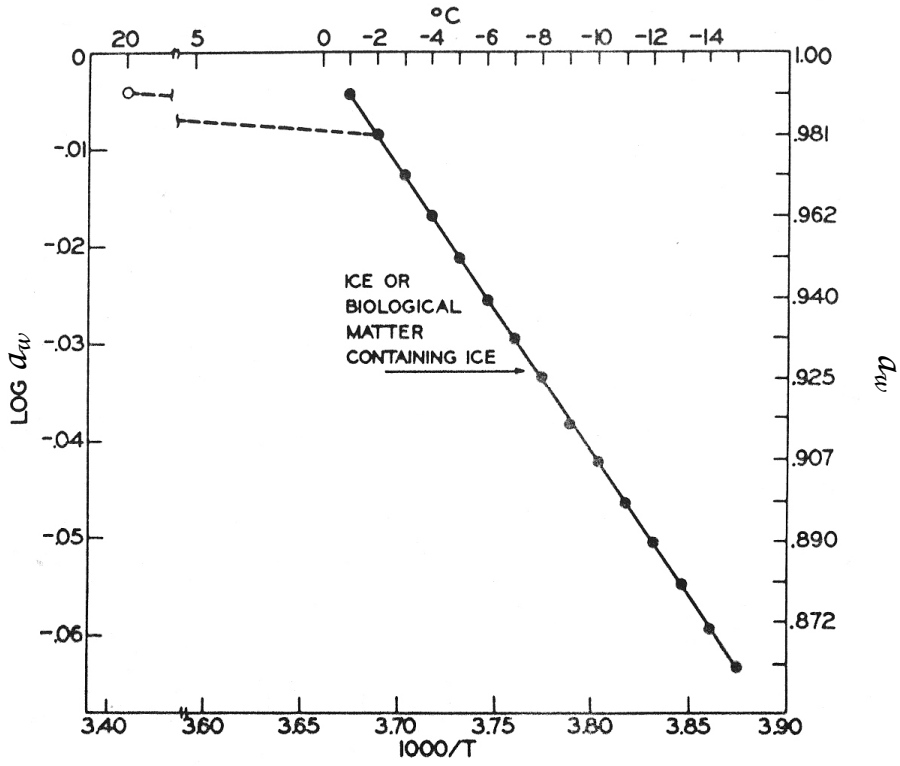
ที่มา : Bolin and Huxsoll (1993)



ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของชิ้นแอปเปิ้ลในระหว่างการออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาลกลูโคส (41°บริกซ์) และสารละลายซูโครส (52°บริกซ์) ที่อุณหภูมิ 30°ซ

ที่มา : Monsalve *et al*. (1993)

การแช่เยือกแข็งทำให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของอาหารลดต่ำลง เนื่องจากน้ำเปลี่ยนสถานะกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง ทำให้ความดันไอของน้ำแข็งในอาหารลดต่ำลง อาหารที่มีความชื้นสูงเมื่อนำมาแช่เยือกแข็งนั้น การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของอาหารลดลงจาก 0.99 ที่อุณหภูมิ 20°ซ เป็น 0.98 ที่ -2°ซ และลดลงเท่ากับ 0.86 ที่ -15°ซ ตามภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของอาหารขึ้นอยู่กับช่วงของอุณหภูมิ ที่ช่วงอุณหภูมิปกติ หรืออุณหภูมิเหนือสภาวะแช่เยือกแข็ง อาหารมีการเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ประมาณ 0.00002 ถึง 0.002 เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1°ซ ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิแช่เยือกแข็ง ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของอาหารลดลงประมาณ 0.008 ต่อ 1°ซ หรือมีค่าที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าสภาวะที่อุณหภูมิปกติ 4 - 400 เท่า (Fennema, 1981)



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ และอุณหภูมิของอาหาร
ที่มา : Fennema (1981)

นอกจากนี้ ที่สภาวะแช่เยือกแข็ง ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของอาหารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่ไม่ขึ้นอยู่กับชนิด หรือปริมาณของตัวถูกละลายในอาหาร ซึ่งต่างจากสภาวะที่อุณหภูมิปกติ ค่าวอเตอร์-แอคติวิตี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และองค์ประกอบของอาหาร (Fennema, 1981) ดังนั้นอาหารแช่เยือกแข็งต่างชนิดกันมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w) ของอาหารภายใต้สภาวะแช่เยือกแข็ง

อุณหภูมิ (°ซ)	p_{ice} (kPa)	p_{sw} (kPa)	a_w (p_{ice} / p_{sw})
0	0.6104	0.6104	1.00
-5	0.4016	0.4216	0.953
-10	0.2599	0.2865	0.907
-15	0.1654	0.1914	0.864
-20	0.1034	0.1254	0.82
-25	0.0635	0.0806	0.79
-30	0.0381	0.0509	0.75
-40	0.0129	0.0189	0.68
-50	0.0039	0.0064	0.62

หมายเหตุ p_{ice} = ความดันไอของน้ำแข็ง (vapor pressure above ice), p_{sw} = ความดันไอของน้ำเย็นยิ่งยวดบริสุทธิ์ (vapor pressure of pure supercooled water)

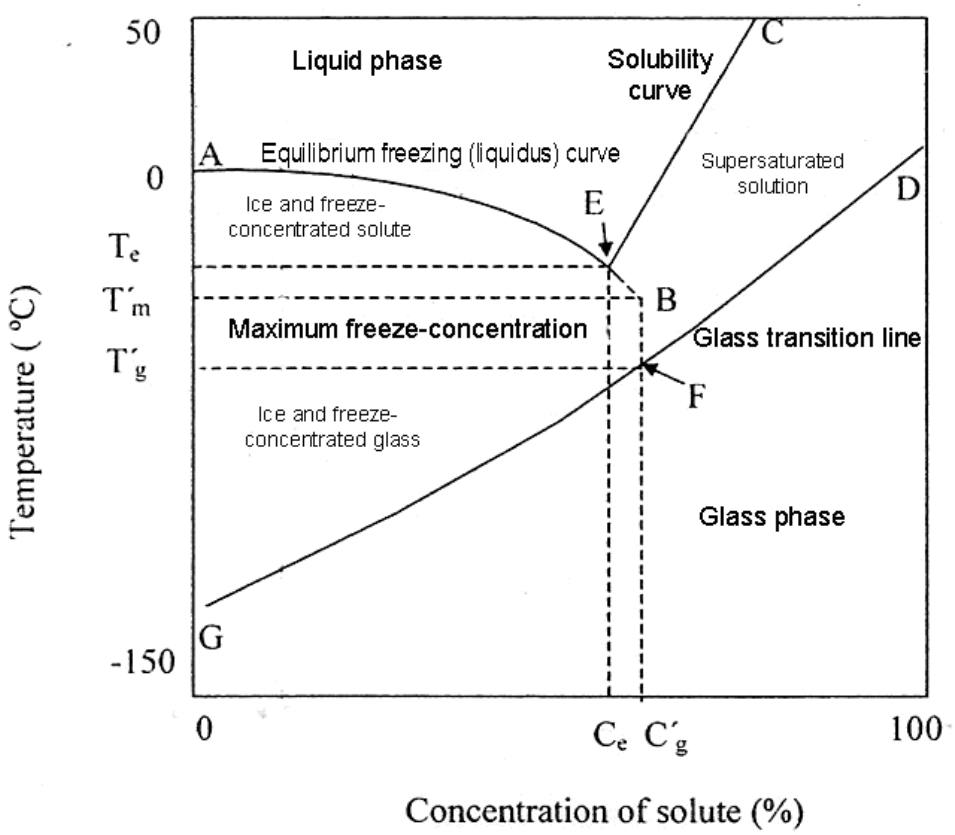
ที่มา : Fennema (1975)

เมื่อเปรียบเทียบค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ที่สภาวะอุณหภูมิต่างกัน พบว่า ในสภาวะแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -15°ซ อาหารมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เท่ากับ 0.86 (ตารางที่ 3) แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เกิดขึ้นได้ช้า และไม่มีการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ในขณะที่อาหารซึ่งมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เท่ากันแต่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิ 20°ซ กลับมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นสามารถใช้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาต่างๆ หรือความคงตัวของอาหารได้ดีต่อเมื่ออุณหภูมิของสภาวะอยู่สูงกว่าอุณหภูมิแช่เยือกแข็ง (Fennema, 1981)

7. อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของอาหารแช่เยือกแข็ง

7.1 หลักการ และการตรวจสอบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน

ในระหว่างการแช่เยือกแข็งอาหารเมื่อน้ำกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง ตัวถูกละลายในระบบมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบมีอุณหภูมิลดต่ำลง ดังภาพที่ 12 เส้นกราฟ AB แสดงถึงอุณหภูมิการแช่เยือกแข็ง (freezing curve) โดยเส้นกราฟนี้ตัดกับเส้นกราฟการละลาย (solubility curve) คือ CE ที่จุด E (eutectic point) ปริมาณน้ำที่จุด E นี้อยู่ในรูปที่ไม่ถูกแช่เยือกแข็ง (unfreezable water) และเมื่อลดอุณหภูมิลงต่ำกว่าเส้นกราฟ DFG ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ทำให้อาหารเปลี่ยนจากสภาพรับเบอรี (rubbery) ไปเป็นสภาพกลาส (glass) (Chane *et al*., 2004)

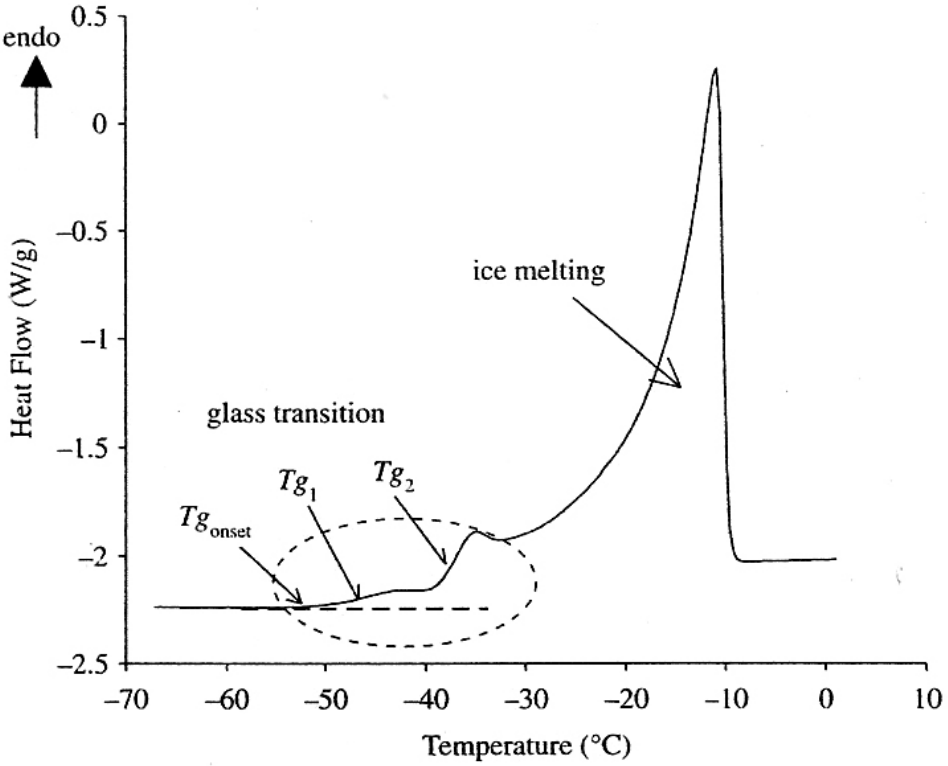


ภาพที่ 12 State diagram

ที่มา : ดัดแปลงจาก Chanes *et al*. (2004) และ Goff and Sahagian (1996)

อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature; T_g) เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสารที่อยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous materials) ระหว่างสภาพรับเบอรีและสภาพกลาส สำหรับในระบบที่เป็นสารละลายค่า T'_g เป็นอุณหภูมิที่เกิดกลาสทรานซิชัน เมื่อสารละลายถูกแช่เยือกแข็งจนเกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุดและทำให้ตัวถูกละลายในระบบมีความเข้มข้นมากที่สุด (maximally freeze-concentrated solutions) Roos *et al*. (1996) อธิบายว่า ในระหว่างการให้ความร้อนแก่สารที่อยู่ในสภาวะแช่เยือกแข็งและตัวถูกละลายในระบบมีความเข้มข้นมากที่สุด มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเป็น 2 ช่วง ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ T'_g และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ T'_m ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการละลายของน้ำแข็ง โดยอุณหภูมิทั้งสองอาจมีผลต่ออายุการเก็บรักษา และคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า T'_g (Rahman, 1999)

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอรีเมทรี (Differential scanning calorimetry) หรือที่เรียกกันว่า DSC เป็นวิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในการตรวจสอบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน โดยตรวจสอบจากการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (heat capacity) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง สำหรับเทคนิคอื่นๆ ที่สามารถใช้ในการตรวจสอบ ได้แก่ Mechanical thermal analysis (DMA/DMTA), Mechanical spectroscopy, Nuclear magnetic resonance (NMR) และ Electron spin resonance (ESR) (Roos *et al*., 1996) การวิเคราะห์ค่า T'_g ของตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC นั้นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกราฟแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ การเปลี่ยนแปลงจากสภาพกลาสเป็นรับเบอรี การเกิดเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเริ่มต้นของการละลายน้ำแข็ง (onset of ice melting) และการเปลี่ยนแปลงของการละลายของน้ำแข็งที่มีในระบบ (Inoue and Suzuki, 2006) ในงานวิจัยที่มีผู้ศึกษาก่อนหน้านี้ ได้รายงานอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่วิเคราะห์จากตำแหน่งที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 13) ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงช่วงแรก (onset of the first transition; $T_{g_{onset}}$) หรืออุณหภูมิกึ่งกลางของการเปลี่ยนแปลงช่วงแรก (midpoint of temperature; $T_{g\ 1}$) หรืออุณหภูมิกึ่งกลางของการเปลี่ยนแปลงช่วงที่สอง (midpoint of the second step; $T_{g\ 2}$) (Blond and Meste, 2004)



ภาพที่ 13 DSC thermogram ของสารละลายซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 50% (w/w)
ที่มา : Blond and Meste (2004)

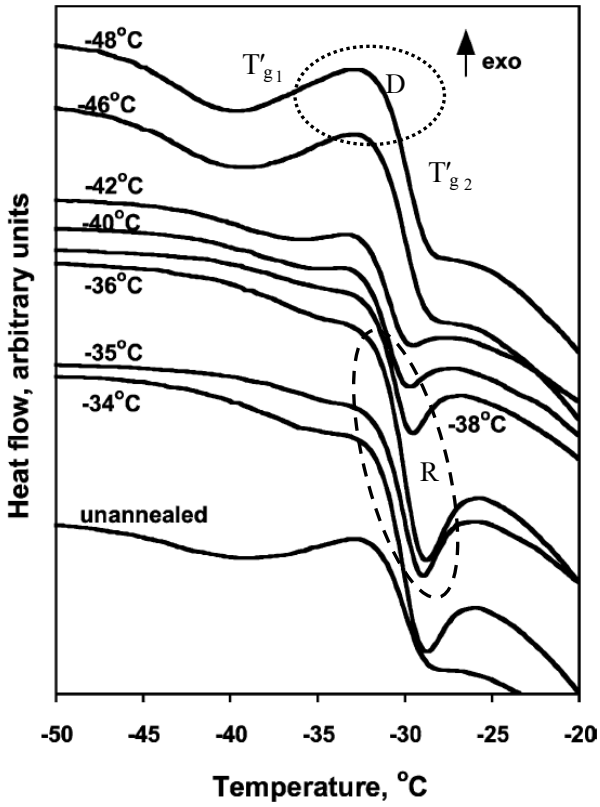
สำหรับสภาวะที่ใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิกลาสทรานซิชันนั้น Roos and Karel (1991a) รายงานว่า การ anneal (การหยุดที่อุณหภูมิสูงกว่า T'_g แต่ต่ำกว่า T'_m เป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งมากขึ้น) ทำให้ค่า T'_g และ T'_m ของสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นร้อยละ 20-60 มีค่าประมาณ -46 และ -34°ซ ตามลำดับ ส่วน Izzard *et al*. (1991) พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการ anneal สารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 65 ที่อุณหภูมิ -35°ซ เป็นเวลา 15 นาที ทำให้ค่า T'_g เพิ่มขึ้นประมาณ 30°ซ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะ non-anneal (ตารางที่ 4) การ anneal ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T'_m เล็กน้อยมีผลทำให้ค่า T'_g เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการ anneal เนื่องจากในระหว่างการ anneal น้ำเคลื่อนที่ออกจากส่วนของตัวถูกละลายที่มีความเข้มข้นจึงทำให้ส่วนของผลึกน้ำแข็งเกิดเพิ่มขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากขนาดพื้นที่ใต้กราฟในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นของการละลายน้ำแข็งขยายใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการ anneal (Roos, 1995) Rahman (2004) แนะนำว่าสภาวะที่เหมาะสมในการ anneal ทำให้สามารถวัดค่าอุณหภูมิจริงของ T'_g ได้เมื่อ anneal ที่อุณหภูมิ T'_m - 1

ตารางที่ 4 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการ anneal ที่อุณหภูมิ -35°ซ ต่อค่า T'_g ของสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 65

ค่า	เวลาในการ anneal (นาที)						
	0	0.1	1	2	4	15	33
T'_g (°ซ)	-73.1	-71.7	-71.3	-65.0	-52.5	-43.7	-42.1

ที่มา : Izzard *et al*. (1991)

ในการตรวจสอบอุณหภูมิการเกิดกลาสทรานซิชัน Pyne *et al*. (2003) พบว่า การเกิดกลาสทรานซิชัน แบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ T'_{g_1} (lower glass transition) เกิดที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ และ T'_{g_2} (higher glass transition) เกิดที่ช่วงอุณหภูมิสูง โดยค่า T'_{g_1} และ T'_{g_2} ของสารละลายเทรฮาโลสเข้มข้นร้อยละ 45 ที่สภาวะ non-anneal มีค่าประมาณ -45 และ -31°ซ ตามลำดับ การ anneal ที่อุณหภูมิ -36°ซ มีผลทำให้ค่า T'_{g_1} เพิ่มขึ้นเป็น -39°ซ ส่วนค่า T'_{g_2} มีค่าเท่ากับ -32°ซ ซึ่งใกล้เคียงกับที่สภาวะ non-anneal และทำให้เกิดลักษณะของ relaxation ที่บริเวณ T'_{g_2} มากที่สุด (ภาพที่ 14) รวมทั้งไม่เกิดลักษณะ devitrification ระหว่าง T'_{g_1} และ T'_{g_2} เนื่องจากในระหว่างการ anneal การเกิดผลึกน้ำแข็งมีมากขึ้น ทำให้ส่วนของน้ำที่ไม่ถูกแช่เยือกแข็งลดลง จึงทำให้การเกิด devitrification ซึ่งเกิดจากการที่มีน้ำแข็งเกิดขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนครั้งสุดท้ายไม่ปรากฏให้เห็น ลักษณะการเกิด devitrificaiton อาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการให้ความร้อน เนื่องจากความหนืดในช่วงที่อยู่เหนืออุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลง และเมื่อความหนืดของส่วนที่ไม่ถูกแช่เยือกแข็งลดลงอย่างเพียงพอโมเลกุลสามารถเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้น้ำที่ติดอยู่ในส่วนนี้เกิดเป็นผลึกน้ำแข็งได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้สภาวะ anneal ที่เหมาะสม จะไม่ทำให้เกิดน้ำแข็งในขณะที่ให้ความร้อน (Roos and Karel, 1991b) จากการ anneal นี้เป็นข้อพิสูจน์ให้เห็นว่าค่า T'_{g_1} เป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และ T'_{g_2} เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการละลายของน้ำแข็ง (T'_m)



ภาพที่ 14 ลักษณะการเกิด relaxation (R) และ devitrification (D) ของสารละลายเทรฮาโลสเข้มข้นร้อยละ 45 เมื่อ anneal ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 120 นาที

ที่มา : ดัดแปลงจาก Pyne *et al*. (2003)

ในขณะที่ Chang *et al.* (2006) ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับช่วงอุณหภูมิที่เกิดกลาสทรานซิชันต่างจากของ Pyne *et al*. (2003) ผลการศึกษาของ Chang *et al.* (2006) พบว่า ในสภาวะ non-anneal การลดอุณหภูมิตัวอย่างสารละลายซูโครสที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 อย่างรวดเร็วด้วยไนโตรเจนเหลวมีผลทำให้ T'_{g_1} มีค่าต่ำกว่าการลดอุณหภูมิอย่างช้า (อัตราเร็ว 1°ซ/นาที) การลดอุณหภูมิแบบรวดเร็วและแบบช้ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า T'_{g_2} เช่นเดียวกัน คือทำให้ T'_{g_2} มีค่าเท่ากับ -35 และ -33°ซ ตามลำดับ เนื่องจากการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วทำให้น้ำซึ่งเป็นพลาสติไซเซอร์ถูกจับอยู่ในส่วนของน้ำที่ไม่ถูกแช่เยือกแข็ง (unfrozen water) ได้มากกว่าการลดอุณหภูมิอย่างช้า ปริมาณพลาสติไซเซอร์ที่มากขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดต่ำลง การ anneal ที่อุณหภูมิระหว่างจุดสุดท้ายของการเปลี่ยนแปลงที่ T'_{g_1} และจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่ T'_{g_2} คือ -48.5, -46.5, -44.5, -42.5 และ -40.5°ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ค่า T'_{g_1} เพิ่มขึ้นและการเปลี่ยนแปลงของความจุความร้อน (heat capacity) ที่ T'_{g_1} ลดลงเมื่อ anneal ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลง ค่าความจุความร้อนที่ T'_{g_2} ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อ anneal ในการ anneal ตัวอย่างที่อุณหภูมิ -40.5°ซ มีผลทำให้ค่า T'_{g_1}

ไม่ปรากฏทั้งในตัวอย่างที่ลดอุณหภูมิแบบรวดเร็ว และแบบช้า และเมื่อเพิ่มระยะเวลา anneal ทำให้พื้นที่ใต้กราฟที่ T'_{g2} ที่วัดแบบ non-reversing heat flow เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ความเข้มข้นที่มากที่สุดของตัวถูกละลายที่สภาวะแช่เยือกแข็ง (C'_g) ที่ T'_{g2} มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 82.13 และ 82.42 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผู้อื่นศึกษาก่อนหน้านี้ซึ่งมีค่า C'_g ของซูโครสเท่ากับร้อยละ 82.5 ในขณะที่ T'_{g1} ให้ค่า C'_g ประมาณร้อยละ 76 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ T'_{g2} จากเหตุผลดังกล่าว Chang *et al.* (2006) จึงได้สรุปว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิสูง (T'_{g2})

จากที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่า ยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนในการวัดค่า T'_g กล่าวคือ ในกลุ่มของ Pyne *et al*. (2003) ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าค่า T'_{g1} เป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และ T'_{g2} เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการละลายของน้ำแข็ง (T'_m) ส่วน Chang *et al.* (2006) ได้ให้เหตุผลยืนยันว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิสูง (T'_{g2})

7.2 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันกับความคงตัวของอาหาร

การศึกษาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันในอาหารมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการทำนายความคงตัวของอาหาร หรืออธิบายการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในอาหารประเภทที่มีความชื้นต่ำ และอาหารแช่เยือกแข็ง (Roos, 1995) การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันทำให้ลดอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาพกลาสไปเป็นรับเบอรี มีผลทำให้ความคงตัวของอาหารลดลง การเปลี่ยนแปลงเกิดมากขึ้นเมื่อความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่เก็บรักษาและอุณหภูมิกลาสทรานซิชันมากขึ้น (Roos, 1995; Rahman, 2006)

Ling *et al*. (2005) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความคงตัวของสีลูกแพร์ที่ทำแห้งด้วยลมอุณหภูมิ 40°ซ กับอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำแห้งชิ้นลูกแพร์ทำให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้มีค่าลดลง (ตารางที่ 5) อุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิการเก็บรักษา (25°ซ) และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (ΔT) มีค่าน้อยลง โดยค่า ΔT ที่น้อยลงมีผลทำให้สีของผลิตภัณฑ์มีความคงตัวมากขึ้นแม้ว่าอุณหภูมิที่เก็บรักษาตัวอย่างจะอยู่ในสภาพรับเบอรี ตัวอย่างที่มีความชื้นร้อยละ 4.3-11 (a_w = 0.5) มีความคงตัวของสีมากกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นสูง (ความชื้นร้อยละ 18.5 และ 35) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) และปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non enzymatic browning reaction)

ตารางที่ 5 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w) ปริมาณความชื้น และอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของลูกแพร์ที่ทำแห้งด้วยระยะเวลาต่างๆ กัน เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 36

ระยะเวลาทำแห้ง(ชั่วโมง)	a_w	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน(°ซ)	ΔT (°ซ)
0	N/D	87.7	N/D	N/D
27	0.885	35.0	< -45.0 *	> 70.0 *
33	0.602	18.5	-40.5	65.5
54	0.419	11.0	-23.2	48.2
64	0.388	10.0	-20.7	45.7
140	0.290	5.5	-7.1	32.1
166	0.236	4.3	-1.4	26.4

หมายเหตุ ΔT หมายถึง ความแตกต่างของอุณหภูมิที่เก็บรักษา และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน N/D หมายถึง ไม่ได้วิเคราะห์, * เป็นค่าจากการประมาณ

ที่มา : Ling *et al*. (2005)

Lim *et al*. (2006) รายงานว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และอุณหภูมิในการเก็บรักษามีผลต่อคุณภาพด้านสี และปริมาณวิตามินซี ในเมล็ดถั่วลันเตาแช่เยือกแข็ง เมล็ดถั่วลันเตาชนิดอ่อนและแก่ มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T'_g) เท่ากับ -26 และ -20 °ซ ตามลำดับ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -5°ซ เป็นเวลา 16 สัปดาห์ ทำให้เมล็ดถั่วลันเตาทั้งสองชนิดมีค่าสีเขียว (- a*) ลดลงร้อยละ 20 เนื่องจากการสูญเสียคลอโรฟิลล์ และที่อุณหภูมิ -12°ซ เฉพาะเมล็ดถั่วลันเตาชนิดอ่อนที่มีค่าสีเขียวลดลงร้อยละ 5 เมล็ดถั่วลันเตาทั้งสองชนิดมีความคงตัวของสีเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิใกล้หรือต่ำกว่า T'_g (-20, -25 และ -30°ซ) นอกจากนี้ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิใกล้ หรือต่ำกว่า T'_g ทำให้ลดการสูญเสียวิตามินซีในเมล็ดถั่วลันเตา อย่างไรก็ตาม Contreras *et al*. (2007) พบว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชันไม่มีความสัมพันธ์กับค่าเนื้อสัมผัสของสตอเบอรีอบแห้ง ตัวอย่างสตอเบอรีที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 55°บริกซ์ ก่อนการทำแห้งด้วยลม และการทำแห้งด้วยลมและไมโครเวฟ มีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่ต่ำกว่า (-1.0 และ -1.6°ซ ตามลำดับ) ตัวอย่างที่ทำแห้งโดยไม่ผ่านการออสโมซิส (3.1 และ 6.3°ซ ตามลำดับ) แต่ตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสก่อนการทำแห้งทั้งสองแบบ ทำให้สตอเบอรีมีค่าเนื้อสัมผัส (หลังจากการทำแห้ง และคืนรูป) ซึ่งวัดจากแรงกดสูงสุดมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส

นิยามคำศัพท์ที่เกี่ยวข้อง

Glass transition temperature of maximally freeze-concentrated solution (T'_g) เป็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันในระบบที่เป็นสารละลาย โดยสารละลายถูกแช่เยือกแข็งจนเกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุด และตัวถูกละลายในระบบมีความเข้มข้นมากที่สุด (maximally freeze-concentrated solution)

Anneal เป็นการหยุดที่อุณหภูมิสูงกว่า T'_g แต่ต่ำกว่า T'_m เป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งในระบบมากขึ้น โดยให้ความร้อนแก่สารละลายที่ถูกแช่เยือกแข็งจนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่า T'_g แต่ต่ำกว่า T'_m และหยุดพักเพื่อที่จะทำให้สารละลายในระบบเกิดผลึกน้ำแข็งมากขึ้นก่อนจะให้ความร้อนอีกครั้งเพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน การ anneal นี้ทำให้สามารถวิเคราะห์อุณหภูมิที่แท้จริงในการเกิดกลาสทรานซิชันได้

Vitrification เป็นกระบวนการที่ทำให้สารเปลี่ยนไปอยู่ในสภาพกลาส โดยไม่เกิดการตกผลึกของตัวทำละลาย หรือตัวถูกละลาย

Devitrification เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตรงกันข้ามกับ vitrification คือทำให้ตัวอย่างสูญเสียสภาพกลาส

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 เงาะพันธุ์โรงเรียน ซึ่งปลูกทางภาคใต้ ซื้อจากตลาดไท ในช่วงเดือนกรกฎาคม ถึงกันยายน

1.2 ซูโครส (Food grade, Mitr Phol, Thailand)

1.3 เทรฮาโลส (Food grade, TREHA, Hayashibara, Japan)

1.4 มอลติทอล (Food grade, MALTISOL MS65, Siam Sorbitiol Co.,Ltd., Thailand)

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

2.1 เครื่องกวนสารละลายที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ (High Torgue Stirrer; R50D, Germany)

2.2 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิได้ (Water Bath; WB22, Memmert, Germany)

2.3 เครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิกแบบพ่นไอไนโตรเจนเหลว (Minibatch 1000L, Bangkok Industrial Gas Co.,Ltd)

2.4 สายเทอร์โมคอปเปิล และเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (PRESICA 2002)

2.5 ถุงพลาสติกชนิด NY/LLDPE (Nylon/Linear low density polyethylene) ความหนา 70 ไมครอน ขนาด 100 x150 มม.

2.6 เครื่องปิดผนึกถุงพลาสติก

2.7 กระดาษซับ

2.8 อุปกรณ์เครื่องครัว (มีด มีดคว้าน ภาชนะสเตนเลส ฯลฯ)

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ

3.1 ตู้แช่เยือกแข็ง (Chest Freezer; SF-C1495, Sanyo)

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

3.3 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot Air Oven; ULE500, Memmert, Germany)

3.4 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer; TA-XT.plus, Stable Micro Systems, UK)

3.5 เครื่องวัดสี (Spectrocolorimeter; CM-3500d, Minolta, Japan)

3.6 เครื่องวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Hand Refractometer, Type N, Atago, Japan)

3.7 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter, pH-Vision 6071, JENCO Electronics, Ltd.)

3.8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอรีเมทรี (Differential Scanning Calorimetry; DSC Pyris 1, Perkin Elmer, USA) และภาชนะอะลูมิเนียมที่ใช้เตรียมตัวอย่าง (Volatile aluminum pans No. 02190062, Perkin Elmer, USA)

3.9 เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (TH-2/ RTD-33, Novasina, Switzerland)

3.10 เครื่องปั่น (Commercial Blender, Waring, USA)

3.11 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (AP210-0, OHAUS, Switzerland)

3.12 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (BP 3100S, Sartorius, Germany)

3.13 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

4. สารเคมีที่ใช้

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

4.2 โพแทสเซียมไฮโดรเจนพาทาเลท (Potassium hydrogen phthalate, Analytical grade, Fisher Scientific, UK)

4.3 ฟีนอฟทาลีน (Phenolphthalein, Ajax Finechem, Australia)

วิธีการ

1. ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีออสโมซิส ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างกัน ต่อปริมาณน้ำที่สูญเสีย และปริมาณของแข็งที่ได้รับในชิ้นเงาะ

1.1 คัดเลือกผลเงาะที่เปลือกมีสีแดง และขนาดผลมีความยาว 4-4.5 เซนติเมตร ล้างด้วยน้ำสะอาด ปอกเปลือก คว้านเมล็ดออก และตัดแบ่งครึ่งตามยาว โดยเลือกชิ้นเงาะที่มีน้ำหนักประมาณ 6-7 กรัม

1.2 ลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีออสโมซิส โดยแช่ชิ้นเงาะในสารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ ซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 30 ± 1^{o}ซ และใช้เวลาในการออสโมซิส 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง อัตราส่วนเนื้อผลไม้ต่อสารละลายเท่ากับ 1:3 โดย

น้ำหนัก กวนน้ำเชื่อมตลอดเวลาด้วยใบพัดกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที หลังการออสโมซิส นำชิ้นเงาะออกจากน้ำเชื่อม และซับสารละลายส่วนเกินบริเวณผิวของชิ้นเงาะออกด้วยกระดาษซับ

1.3 วิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water loss; WL) และปริมาณของแข็งที่ได้รับ (Solid gain; SG) ในชิ้นเงาะ หลังจากแช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิด เป็นระยะเวลา t คำนวณตามสมการของ Panagiotou *et al*. (1999) โดยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างได้จากการอบที่อุณหภูมิ 105 ± 5^{o}ซ จนน้ำหนักคงที่ ใช้เวลา 16 ชั่วโมง

$$WL = \frac{(M_o - m_o) - (M - m)}{m_o}$$

$$SG = \frac{(m - m_o)}{m_o}$$

เมื่อ M_o : น้ำหนักเริ่มของเงาะก่อนแช่ในสารละลายน้ำตาล
M : น้ำหนักของเงาะที่ถูกแช่ในสารละลายน้ำตาลนาน t ชั่วโมง
m_o : น้ำหนักแห้งของเงาะก่อนการแช่ในสารละลายน้ำตาล
m : น้ำหนักแห้งของเงาะที่ถูกแช่สารละลายน้ำตาลนาน t ชั่วโมง

2. ศึกษาผลของสารละลายที่ใช้ต่อค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของเนื้อเงาะที่ผ่าน และไม่ผ่านการออสโมซิส

วัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย ตามวิธี AOAC (1995) ที่อุณหภูมิ 25^{o}ซ โดยเตรียมตัวอย่างตามวิธีในภาคผนวก ก

3. ศึกษาผลของสารละลายที่ใช้ในการออสโมซิส ต่อคุณภาพทางเคมี และกายภาพของเนื้อเงาะแช่เยือกแข็ง

3.1 เตรียมตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ผ่านการออสโมซิส โดยแช่ชิ้นเงาะในสารละลายซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และใช้ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิสเป็นตัวอย่างควบคุม บรรจุชิ้นเงาะในถุงพลาสติกชนิด NY/LLDPE ความหนา

70 ไมครอน ขนาด 100 x150 มม. บรรจุถุงละ 8 ชิ้น และปิดผนึก ทำการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิกแบบพ่นไอไนโตรเจนเหลว ที่อุณหภูมิ -40°ซ จนกระทั่งอุณหภูมิของตัวอย่างลดลงถึง -25°ซ โดยบันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างในขณะที่แช่เยือกแข็งทุกๆ 1 นาที เก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิ -18 $\pm$ 3°ซ

3.2 วิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและกายภาพของเงาะแช่เยือกแข็ง หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 $\pm$ 3°ซ เป็นเวลา 3, 60 และ 120 วัน

3.2.1 การละลายน้ำแข็งก่อนการตรวจสอบคุณภาพ โดยนำตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งวางในตู้ควบคุมอุณหภูมิต่ำ (Low temperature incubator) ที่ 8 $\pm$ 1°ซ นาน 5 ชั่วโมง

3.2.2 ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC (1995) รายละเอียดในภาคผนวก ก

3.2.3 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (Drip loss; DL)

(ก) ศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการตรวจวัดปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง

ในการทดลองเบื้องต้น ตรวจวัดปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งตามวิธีของ AOAC (1995) โดยชั่งน้ำหนักของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งทั้งถุงหลังน้ำแข็งละลายหมดที่อุณหภูมิห้อง (26°ซ) และที่ 8 $\pm$ 1°ซ จากนั้นเปิดถุงและเทชิ้นเงาะลงบนตะแกรง (No.8) ทิ้งไว้ 2 นาที ชั่งน้ำหนักชิ้นเงาะ และน้ำหนักถุง เปรียบเทียบกับวิธีที่ดัดแปลงจาก Marani *et al.* (2001) โดยนำชิ้นเงาะวางบนกระดาษซับ และทิ้งไว้ให้น้ำแข็งละลาย ชั่งน้ำหนักกระดาษซับตั้งแต่น้ำแข็งละลายหมด และทุกๆ 30 นาที ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งได้จากการชั่งน้ำหนักกระดาษซับจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ วัดค่า 3 ซ้ำ ทั้งสองวิธีนี้คำนวณเป็นร้อยละของปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งต่อน้ำหนักตัวอย่างก่อนละลายน้ำแข็ง

(ข) ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง ตามวิธีที่เลือกจากข้อ 3.2.3 (ก)

จากการทดลองในข้อ 3.2.3 (ก) พบว่า วิธีการที่ดัดแปลงจาก Marani *et al.* (2001) เป็นวิธีที่เหมาะสม เนื่องจากค่าเฉลี่ยที่ได้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดเมื่อใช้อุณหภูมิในการละลายน้ำแข็งที่ 8°ซ ดังนั้นในการศึกษาปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งได้ใช้

อุณหภูมิในการละลายน้ำแข็งที่ 8°ซ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง วัดค่า 3 ซ้ำ และหาค่าเฉลี่ย คำนวณปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งต่อน้ำหนักแห้ง ตามสมการของ Marani *et al*. (2001)

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

เมื่อ W_o : น้ำหนักของกระดาษซับก่อนละลายน้ำแข็ง

W_t : น้ำหนักของกระดาษซับหลังละลายน้ำแข็ง

W_s : น้ำหนักของตัวอย่างก่อนการละลายน้ำแข็ง

TS : ปริมาณของแข็งในตัวอย่าง

3.2.4 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (°บริกซ์) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

นำชิ้นเงาะที่ละลายน้ำแข็ง มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ และกรองด้วยผ้าขาวบาง นำส่วนของเหลวที่ได้วัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ด้วยเครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Hand refractrometer) และวัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) หาค่าเฉลี่ยจากการวัดค่า 2 ซ้ำ

3.2.5 ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (Total titratable acidity) ตามวิธี AOAC (1995) เตรียมตัวอย่าง และไทเทรตตามรายละเอียดในภาคผนวก ก รายงานผลเป็นร้อยละของกรดซิตริก

3.2.6 การวัดสี

วัดค่าสีของตัวอย่างเงาะที่ละลายน้ำแข็ง ด้วยเครื่องวัดสีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ในระบบ CIE L*a*b* โดยวางตัวอย่างชิ้นเงาะบนแผ่นพลาสติก วัดค่า 8 ซ้ำ และหาค่าเฉลี่ย

3.2.7 การตรวจวัดเนื้อสัมผัส

ตรวจวัดเนื้อสัมผัสของตัวอย่างเงาะที่ละลายน้ำแข็งแล้ว ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) โดยใช้หัววัดทรงกระบอกขนาด 6 มม. (P/6) วัดความแน่นเนื้อของตัวอย่างจากการวัดค่าแรงกดสูงสุด (maximum force) ที่กดลงผิวของตัวอย่างลึกลงไปร้อยละ 50 วัดค่า 12 ซ้ำ และหาค่าเฉลี่ย

3.3 ทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส ตัวอย่างเจาะแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3, 60 และ 120 วัน ประเมินผลจากคะแนนความชอบต่อผลิตภัณฑ์ แบบ 9-points hedonic scale ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับ โดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 25 คน เตรียมตัวอย่างโดยทำการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิ $8 \pm 1^{\circ}$ซ นาน 5 ชั่วโมง

4. ศึกษาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature of maximally freeze-concentrated solution ; T'_g) ของสารละลายน้ำตาล และตัวอย่างเจาะที่ผ่าน และไม่ผ่านการออสโมซิส

4.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่า T'_g ของสารละลายน้ำตาล

ใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20 (น้ำหนัก/ปริมาตร) เป็นตัวอย่างตรวจสอบสภาวะที่เหมาะสมในเบื้องต้น เตรียมสารละลายโดยละลายน้ำตาลด้วยน้ำกลั่น และการให้ความร้อนเล็กน้อย นำสารละลายที่เตรียมชั่งน้ำหนัก 10-13 มิลลิกรัม ใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียมที่ใช้เตรียมตัวอย่างสำหรับ DSC และปิดผนึก นำตัวอย่างไปตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC วิเคราะห์ค่า T'_g ในตำแหน่งอุณหภูมิกึ่งกลางของการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ให้ความร้อนช่วงสุดท้าย

4.1.1 ศึกษาระยะเวลาพัก (Holding time) ที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ -60°ซ

ลดอุณหภูมิจาก 25 ถึง -60°ซ ด้วยอัตราเร็ว 25°ซ/นาที พักที่อุณหภูมิ -60°ซ นาน 2, 10 และ 15 นาที และให้ความร้อนจาก -60 ถึง 10°ซ อัตราเร็ว 5°ซ/ นาที เป็นสภาวะ non-anneal

4.1.2 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการ anneal

ลดอุณหภูมิจาก 25 ถึง -60°ซ ด้วยอัตราเร็ว 25°ซ/นาที พักที่อุณหภูมิ -60°ซ นาน 15 นาที (จากข้อ 4.1.1) จากนั้นให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ใช้ anneal (-40, -38 และ -34°ซ) ด้วยอัตราเร็ว 10°ซ/นาที โดย anneal ที่อุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนแปลงที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ ($T_{end\,1}$) และอุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่ช่วงอุณหภูมิสูง ($T_{onset\,2}$) ที่ได้จากการวิเคราะห์ที่สภาวะ non-anneal นาน 30 นาที และลดอุณหภูมิลงถึง -60°ซ อีกครั้ง ด้วยอัตราเร็ว 10°ซ/นาที พักที่ -60°ซ นาน 15 นาที ก่อนให้ความร้อนจาก -60 ถึง 10°ซ อัตราเร็ว 5°ซ/นาที

4.2 วิเคราะห์ค่า T'_g ของสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ที่สภาวะ non-anneal และ anneal

เตรียมสารละลายน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด ความเข้มข้นร้อยละ 20 (น้ำหนัก/ปริมาตร) เช่นเดียวกับวิธีข้อ 3.1 และวัดค่า T'_g โดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสม จากการทดลองในข้อ 4.1

4.3 วิเคราะห์ค่า T'_g ของตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิด และไม่แช่ในสารละลาย ที่สภาวะ non-anneal และ anneal

เตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการตรวจสอบ โดยนำตัวอย่างเงาะมาปั่นด้วยเครื่องปั่น ความเร็วรอบ 18,000 รอบต่อนาที นาน 2 นาที และนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที นำส่วนใสที่ได้ไปวัดค่า T'_g โดยชั่งน้ำหนักของเหลวที่ได้ 10-13 มิลลิกรัม ใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียมที่ใช้เตรียมตัวอย่าง และปิดผนึก วิเคราะห์ค่า T'_g ของสารละลายที่ได้จากตัวอย่างเงาะโดยเลือกใช้สภาวะเช่นเดียวกับที่ตรวจสอบสารละลายน้ำตาลในข้อ 4.1

5. การประเมินผลทางสถิติ

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

6. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการและอาคารแปรรูป ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. ระยะเวลาที่ใช้

ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2549 ถึง กรกฎาคม 2550

8. แหล่งทุนสนับสนุน

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้โครงการการพัฒนาคุณภาพผลไม้แช่เยือกแข็งด้วยหลักการลดผลึกน้ำแข็ง (SRU รหัส FT 48-1)

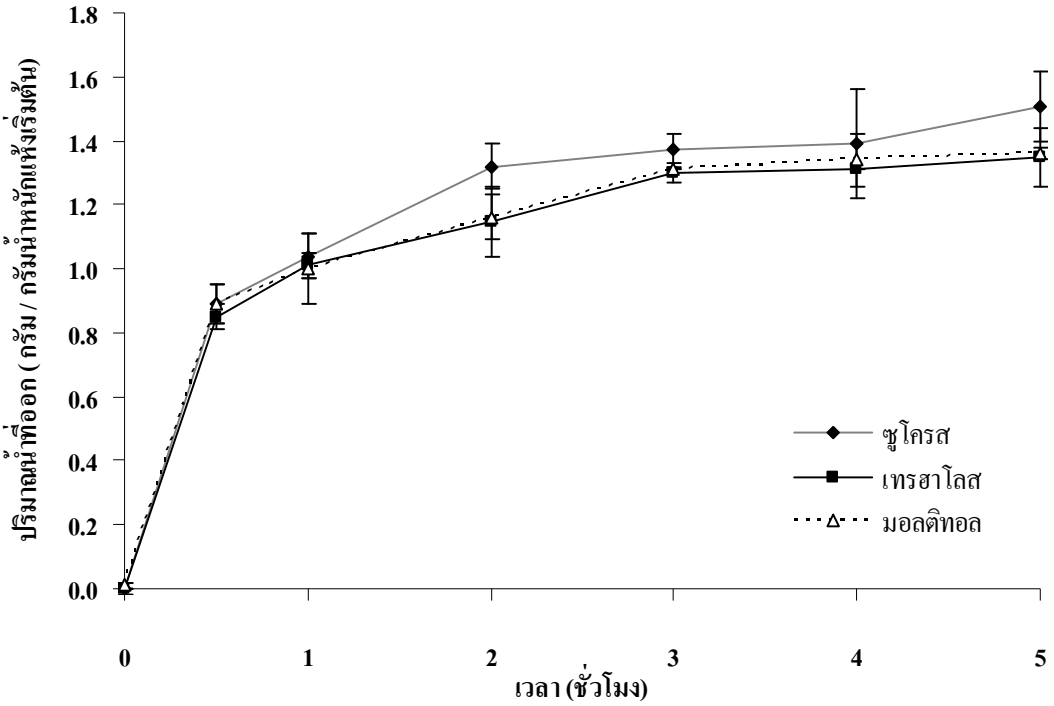
ผลและวิจารณ์

1. ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water loss) และปริมาณของแข็งที่ได้รับ (Solid gain) ในชิ้นเงาะ

การลดปริมาณน้ำบางส่วนในชิ้นเงาะด้วยวิธีออสโมซิส โดยใช้สารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอลที่มีระดับความเข้มข้นเท่ากัน และอัตราส่วนของเนื้อผลไม้ต่อสารละลายเท่ากับ 1:3 เพื่อศึกษาผลของชนิดน้ำตาลต่อคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็ง การทดลองนี้ได้เลือกระดับความเข้มข้นร้อยละ 50 เนื่องจาก ระดับความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการออสโมซิสผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็งเพื่อช่วยป้องกันการเกิดสีน้ำตาล โดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณร้อยละ 30-60 (Skrede, 1996) และระดับความเข้มข้นนี้เพียงพอต่อการลดปริมาณน้ำในชิ้นเงาะที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 80 สำหรับอัตราส่วนของผลไม้ต่อสารละลายที่ใช้ในการออสโมซิส พิจารณาจากปริมาณสารละลายที่เพียงพอต่อการแช่ตัวอย่าง และสามารถกวนสารละลายในขณะที่แช่ชิ้นเงาะได้

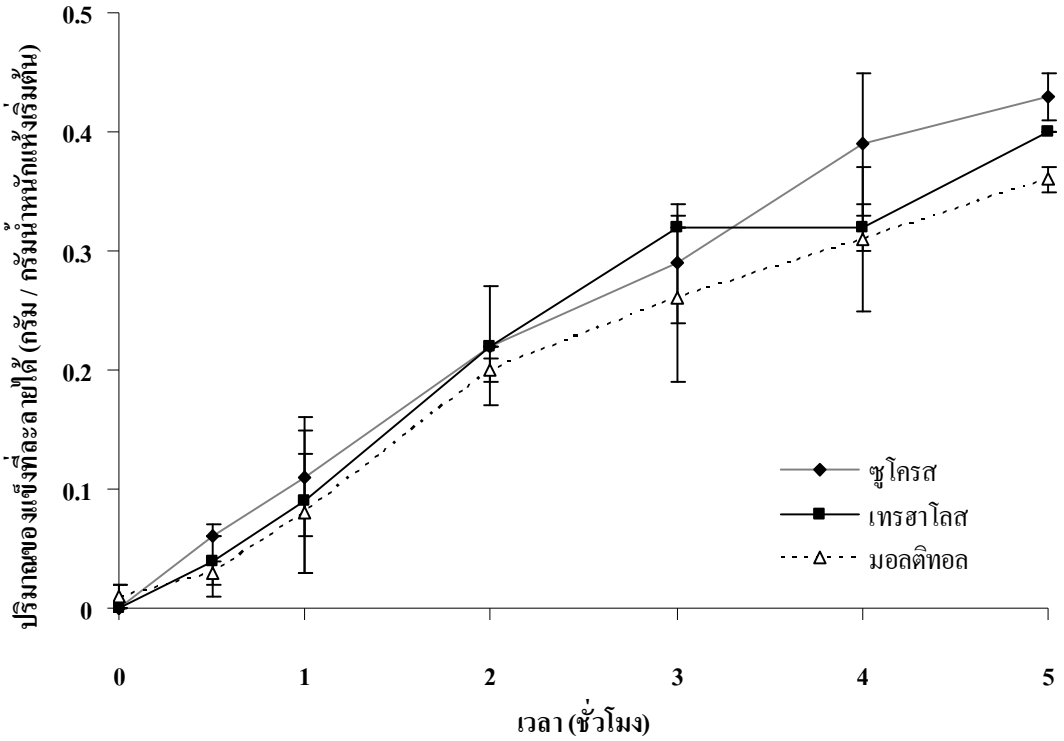
จากการแช่ตัวอย่างชิ้นเงาะในสารละลายชนิดต่างกัน พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิด มีปริมาณน้ำที่สูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการออสโมซิสเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 15) การเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชิ้นเงาะเกิดขึ้นเร็วในช่วง 1-2 ชั่วโมงแรกของการออสโมซิส เนื่องจากความแตกต่างของความดันออสโมซิสในช่วงแรกมีมากจึงทำให้น้ำในชิ้นเงาะเคลื่อนที่ออกมายังสารละลายน้ำตาลได้มาก และเมื่อเวลาในการออสโมซิสเพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่แช่สารละลายทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณน้ำที่สูญเสียจากชิ้นเงาะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ มีการแบ่งปริมาณน้ำที่สูญเสียในระหว่างการออสโมซิสเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วง 2 ชั่วโมงแรกของการออสโมซิส อัตราของปริมาณน้ำที่สูญเสียเกิดขึ้นเร็ว และในช่วง 2 ถึง 6 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่สูญเสียมีอัตราลดลง (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Marani *et al*. (2001) พบว่า ปริมาณน้ำที่สูญเสียมีอัตราที่คล้ายกัน คือผลไม้กีวี และแอปเปิ้ลที่แช่ในสารละลายฟรุกโตส ซูโครส และกลูโคส มีอัตราของน้ำที่ออกจากชิ้นผลไม้เกิดขึ้นได้เร็วในช่วงแรกของการออสโมซิส หลังจากนั้นปริมาณน้ำที่สูญเสียมีปริมาณเพิ่มขึ้นไปอย่างช้าๆ ส่วนน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีปริมาณน้ำที่สูญเสียช้ากว่าแต่ปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากแนวโน้มของปริมาณน้ำที่สูญเสียในระหว่างการออสโมซิส เมื่อเปรียบเทียบในลักษณะของปริมาณความชื้น Giannakou and Taoukis (2003) รายงานว่า เมล็ดถั่วลันเตาที่แช่ในสารละลายโอลิโกฟรุกโตส มอลติทอล และโอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลส มีปริมาณความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการออสโมซิส และเมื่อระยะเวลาในการออสโมซิสเพิ่มขึ้นปริมาณความชื้นมีแนวโน้มคงที่ เมล็ดถั่วลันเตาที่แช่ในสารละลายมอลติทอลซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35°ซ มีปริมาณน้ำที่สูญเสียมากที่สุด เท่ากับ 1.01 กรัม/

กรัมน้ำหนักแห้งเริ่มต้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่สูญเสียในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ตัวอย่างเงาะที่แช่ในสารละลายซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ใช้เวลาเพียง 1 ชั่วโมง (ตารางผนวกที่ ค1) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่สูญเสียจากมะเขือเทศที่ใช้เวลาในการแช่นาน 1 ชั่วโมงเท่ากัน มะเขือเทศที่ผ่านการแช่ในสารละลายชนิดต่างๆ กัน ได้แก่ กลูโคส มอลโตเด็กซ์ตริน โอลิโกฟรุกโตส และโอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลส มีปริมาณน้ำที่สูญเสียประมาณ 8 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งเริ่มต้น (Dermesonlouoglou *et al*., 2007) ซึ่งมากกว่าปริมาณน้ำที่สูญเสียจากชิ้นเงาะ ความแตกต่างของระยะเวลาในการออสโมซิส และปริมาณน้ำที่สูญเสียจากตัวอย่างต่างชนิดกัน เนื่องมาจากตัวอย่างต่างชนิดกันมีลักษณะรูปร่าง และโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ สภาวะที่ใช้ในการออสโมซิส เช่น อัตราส่วนของผลไม้ต่อสารละลาย ชนิดของสารละลายและอุณหภูมิที่ใช้ก็มีความแตกต่างกัน จากการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่สูญเสียจากชิ้นเงาะระหว่างชนิดของสารละลาย พบว่า เมื่อระยะเวลาการออสโมซิสเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่สูญเสียของตัวอย่างเงาะที่แช่สารละลายทั้ง 3 ชนิด เพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เนื่องจากน้ำตาลที่ใช้มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน จึงทำให้แรงดันออสโมซิสเกิดขึ้นใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 15 ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากชิ้นเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน

ในระหว่างการออสโมซิส นอกจากตัวอย่างสูญเสียน้ำออกจากเซลล์แล้วตัวถูกละลายในสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นมากสามารถแพร่เข้าสู่เซลล์ของผลไม้ ทำให้ชิ้นเงาะได้รับปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น จากภาพที่ 16 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของแข็งที่ชิ้นเงาะได้รับมีแนวโน้มของอัตราการเพิ่มขึ้นคงที่ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของสารละลายที่ใช้ในการออสโมซิส พบว่าในแต่ละช่วงเวลาของการออสโมซิส ปริมาณของแข็งที่ชิ้นเงาะได้รับเมื่อแช่ในสารละลายแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางผนวกที่ ค2) จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของแข็งที่ได้รับในผลไม้ชนิดอื่น พบว่า ปริมาณของแข็งที่ได้รับในกีวีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และคงที่ในระหว่างการออสโมซิสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยตัวอย่างที่แช่ในสารละลายกลูโคสมีปริมาณของแข็งที่ได้รับเพิ่มขึ้นมากกว่าน้ำตาลฟรุกโตส ซูโครส และน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Marani *et al*., 2001) ส่วนปริมาณของแข็งที่ได้รับในเมล็ดถั่วลันเตามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและคงที่ เมื่อใช้เวลาในการแช่สารละลายนาน 7 ชั่วโมง (Giannakou and Taoukis, 2003) ดังนั้น ถ้าใช้ระยะเวลาในการออสโมซิสชิ้นเงาะนานขึ้น การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ได้รับอาจได้ผลคงที่ แต่ในการทดลองนี้ไม่ได้ใช้ระยะเวลาจนถึงจุดคงที่ เพราะการแช่ตัวอย่างชิ้นเงาะในสารละลายนานเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติ เช่น ทำให้ตัวอย่างมีรสชาติหวานเกินไป เมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งที่ได้รับในตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสนาน 1 ชั่วโมง ชิ้นเงาะมีปริมาณของแข็งที่ได้รับ (0.08 – 0.11 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งเริ่มต้น) น้อยกว่าเมล็ดถั่วลันเตา (0.78-1.17 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งเริ่มต้น) (Giannakou and Taoukis, 2003) และมะเขือเทศ (1.29-1.86 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งเริ่มต้น) (Dermesonlouoglou *et al*., 2007) ที่ผ่านการออสโมซิสด้วยระยะเวลาการแช่เท่ากัน ความแตกต่างของปริมาณของแข็งที่ได้รับในตัวอย่างที่ต่างชนิดกันขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่นเดียวกับความแตกต่างของปริมาณน้ำที่สูญเสีย



ภาพที่ 16 ปริมาณของแข็งที่ได้รับในชิ้นเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน

ตามหลักของการออสโมซิส อัตราของน้ำที่ออกมีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้ามกับน้ำหนักโมเลกุลของน้ำตาล เมื่อใช้สารละลายที่ความเข้มข้นเดียวกัน น้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง อัตราของน้ำที่ออกจากผลไม้ไปยังสารละลายช้ากว่าการใช้สารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากสารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีความดันไอ (vapor pressure) ต่ำกว่า (Rahman and Perera, 1999) จึงทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ออกจากผลไม้ได้ง่าย Giannakou and Taoukis (2003) พบว่า เมล็ดถั่วลันเตาที่แช่ด้วยสารละลายมอลติทอล เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีปริมาณน้ำที่สูญเสีย และปริมาณของแข็งที่ได้รับมากที่สุด เมื่อเทียบกับเมล็ดถั่วลันเตาที่แช่ในสารละลายโอลิโกฟรุกโตส และโอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลสซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ในงานวิจัยนี้ยืนยันให้เห็นว่า การใช้สารละลายน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน ได้แก่ ซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล (น้ำหนักโมเลกุล 342, 342 และ 344 ตามลำดับ) ทำให้ปริมาณน้ำที่สูญเสีย และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ที่ได้รับในชิ้นเงาะที่แช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน

การใช้ระยะเวลาในการออสโมซิสนานขึ้น นอกจากทำให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียเพิ่มขึ้นแล้วยังทำให้ปริมาณของแข็งที่ได้รับในตัวอย่างเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ตัวอย่างมีรสชาติหวานเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดลองทางประสาทสัมผัสในเบื้องต้น พบว่า รสชาติของตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายทั้ง 3 ชนิด เป็นระยะเวลานานมากกว่า 1 ชั่วโมงมีรสหวานมากเกินไป ในการทดลองต่อไปจึงได้เลือกระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการออสโมซิสชิ้นเงาะก่อนการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากการใช้ระยะเวลาในการออสโมซิสที่นานขึ้น มีผลทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในสารละลายสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ชิ้นเงาะเพิ่มมากขึ้น และทำให้คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไปโดยเฉพาะความหวาน และอาจไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้

2. ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้

การใช้วิธีออสโมซิสโดยการแช่ผลไม้ในสารละลาย เมื่อน้ำเคลื่อนที่ออกจากชิ้นผลไม้ทำให้ปริมาณความชื้นของตัวอย่างลดลง แต่ผลจากการวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของชิ้นเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิด มีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้แตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลายอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ตามตารางที่ 6 แสดงว่า ชนิดของสารละลาย และระยะเวลาที่ใช้ออสโมซิส ซึ่งทำให้ชิ้นเงาะสูญเสียน้ำบางส่วน มีผลทำให้ปริมาณความชื้นลดลงจากประมาณร้อยละ 80 เป็น 72 แต่ไม่มีผลต่อค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ เมื่อพิจารณาช่วงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น พบว่า การเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่ตัวอย่างมีความชื้นสูง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เกิดขึ้นได้น้อยกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 50) (Fennema, 1975; Belitz and Grosch, 1999) การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้นั้น Bolin and Huxsoll (1993) พบว่า ลูกแพร์ที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 60°บริกซ์ ปริมาณความชื้นที่ลดลงในช่วงแรกจากปริมาณความชื้นร้อยละ 85 เป็นร้อยละ 80 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เพียงเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.97 และเมื่อปริมาณความชื้นลดต่ำลง ทำให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ลดลงมากขึ้นนอกจากนี้ งานวิจัยของ Dermesonlouoglou *et al*. (2007) พบว่า มะเขือเทศแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่ในสารละลายชนิดต่างๆ กัน (โอลิโกฟรุกโตส โอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลส กลูโคส และมอลโตเด็กซ์ตริน) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของตัวอย่างลดลงจาก 0.99 เป็น 0.97

นอกจากปริมาณความชื้นในตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงแล้ว การเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ มีผลไม่มากเพียงพอที่จะทำให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของตัวอย่างลดลง โดย

ตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน จากประมาณ 20 เป็น 26°บริกซ์ เมื่อพิจารณาค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของตัวอย่างเงาะจากปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ พบว่า มีลักษณะแบบเดียวกับสารละลายซูโครสที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 16.7 เป็น 28.6 หรือมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น แต่มีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้แตกต่างกันเพียง 0.029 โดยลดลงจาก 0.998 เป็น 0.969 (Anonymous, 2006) ทั้งนี้ความเข้มข้นของสารละลายซูโครสที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของสารละลายซูโครสลดลงได้มากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ไม่ได้วัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็ง เนื่องจากการแช่เยือกแข็ง ทำให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของตัวอย่างเงาะทั้งที่ผ่าน และไม่ผ่านการออสโมซิสลดลงและมีค่าเท่ากัน เพราะอาหารแช่เยือกแข็งต่างชนิดกันมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้เท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน (Fennema, 1975)

ตารางที่ 6 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของเงาะที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ค่า	ไม่แช่น้ำตาล	ซูโครส	เทรฮาโลส	มอลติทอล
วอเตอร์แอคติวิตี้[ns]	0.966 ± 0.005	0.966 ± 0.004	0.963 ± 0.007	0.963 ± 0.003

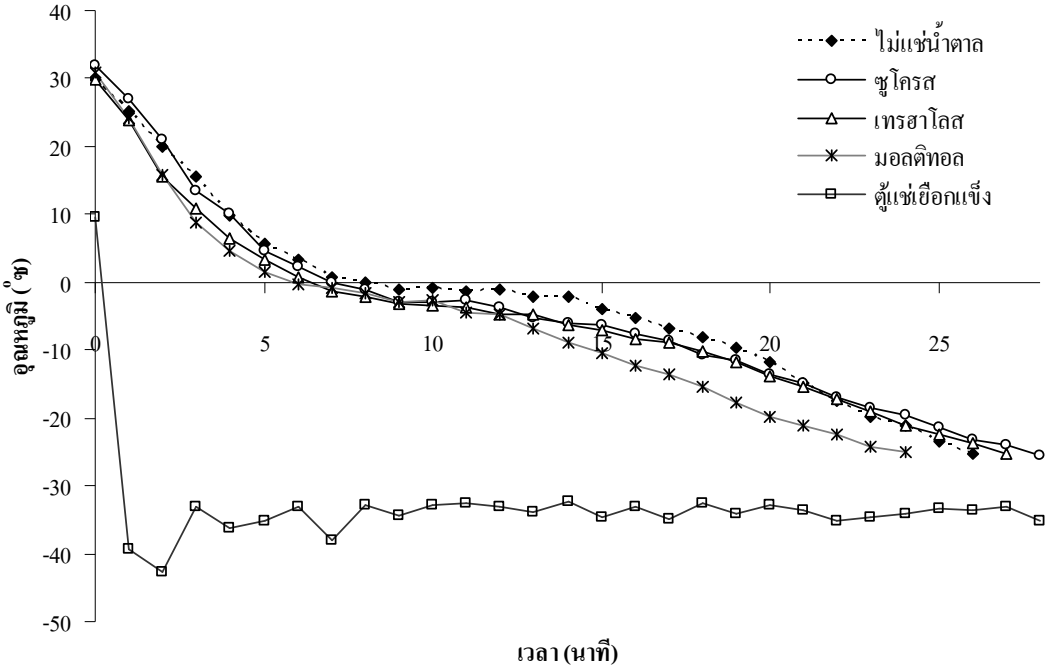
หมายเหตุ [ns] หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการแช่เยือกแข็ง

โดยทั่วไปการแช่เยือกแข็งในระบบไครโอจินิก อาหารถูกแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่ต่ำกว่า -60°ซ โดยอาหารสัมผัสกับไนโตรเจนเหลว หรือคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ทำให้อุณหภูมิของอาหารลดลงอย่างรวดเร็ว (Rahman, 1999) ตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง บรรจุในถุงพลาสติก และปิดผนึก ถูกแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิกแบบพ่นไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -40°ซ การเลือกใช้อุณหภูมิแช่เยือกแข็งที่ไม่ต่ำมากถึง -60°ซ เนื่องจาก ในทางปฏิบัติ การแช่เยือกแข็งผลไม้ส่วนใหญ่ใช้ลมเย็นที่อุณหภูมิ -40°ซ ซึ่งมีอัตราการ

แช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และปรับปรุงคุณภาพของผลไม้โดยใช้วิธีการออสโมซิสก่อนการแช่เยือกแข็ง (Robbers *et al*., 1997; Forni *et al*., 1997; Dermesonlouoglou and Taoukis, 2006) ดังนั้นอุณหภูมิแช่เยือกแข็งที่ -40°ซ จึงน่าจะเพียงพอต่อการแช่เยือกแข็งตัวอย่างผลไม้

ผลจากการวัดอุณหภูมิของตัวอย่างในระหว่างการแช่เยือกแข็งทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิประมาณ -25°ซ พบว่า ตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°ซ ตามภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงในช่วงเริ่มต้น อุณหภูมิของตัวอย่างเงาะที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่สารละลายค่อยๆ ลดลง และลดลงต่ำกว่า 0°ซ ซึ่งเป็นจุดเยือกแข็งของน้ำ โดยตัวอย่างที่ผ่านการแช่น้ำตาลแต่ละชนิดมีอุณหภูมิจุดเยือกแข็งต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลายน้ำตาล การที่ตัวอย่างที่ผ่านการแช่น้ำตาลมีอุณหภูมิจุดเยือกแข็งต่ำลง เนื่องจากการออสโมซิสทำให้ลดปริมาณน้ำ และเพิ่มปริมาณตัวถูกละลายในตัวอย่าง ซึ่งเป็นเหตุผลในลักษณะเดียวกับการเติมตัวถูกละลาย เช่นน้ำตาลลงในน้ำ มีผลทำให้จุดเยือกแข็งของสารละลายลดต่ำลง เนื่องจากตัวถูกละลายมีผลทำให้ความดันไอของสารละลายลดต่ำลงโดยจุดเยือกแข็งของสารละลายลดลงตามความดันไอ (Rahman, 1995; Woodbury, 1997)



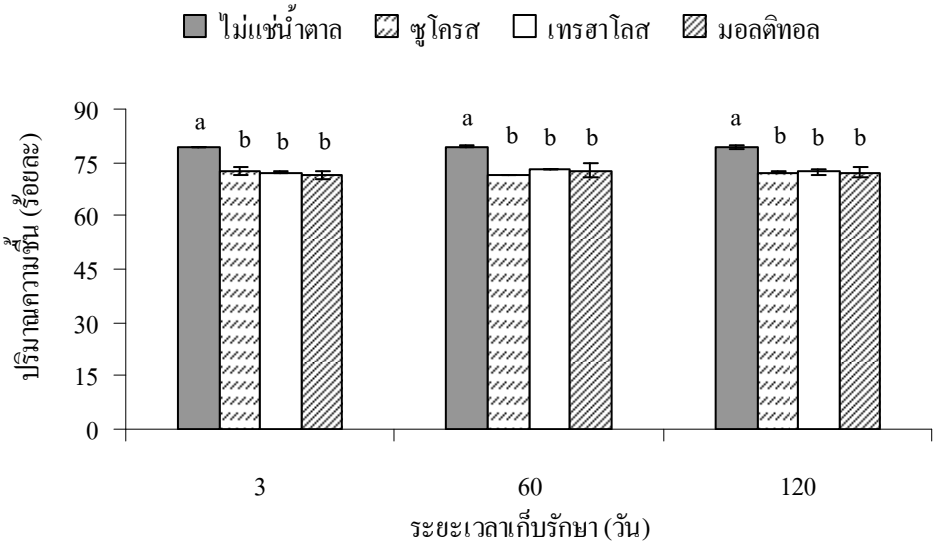
ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นเงาะที่ผ่าน และไม่ผ่านการออสโมซิส ในระหว่างการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 °ซ

จากผลการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการแช่เยือกแข็ง โดยลดอุณหภูมิลงจนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิถึง -25°ซ เมื่อคำนวณอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งที่ช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง -20°ซ พบว่า การแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°ซ ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกทุกตัวอย่างมีอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (มากกว่า 1 °ซ/นาที) โดยตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายมอลติทอลมีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูงที่สุด เท่ากับ 2.26°ซ/นาที ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครส เทรฮาโลส และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย มีอัตราการแช่เยือกแข็งใกล้เคียงกัน คือ 1.87, 1.85 และ 1.96°ซ/นาที ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง ตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายมอลติทอลใช้เวลาในการแช่เยือกแข็ง 24 นาที ซึ่งน้อยกว่าตัวอย่างอื่นเพียง 2-4 นาที แสดงว่า การแช่ตัวอย่างในสารละลายมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งเพียงเล็กน้อย

4. คุณภาพทางเคมี และกายภาพของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็ง

4.1 ปริมาณความชื้น

จากผลการตรวจสอบคุณภาพของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ผ่านการออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°ซ หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°ซ เป็นเวลา 3, 60 และ 120 วัน เปรียบเทียบกับตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่านการออสโมซิส พบว่า ปริมาณความชื้นของเงาะแช่เยือกแข็งที่ผ่านการออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาลต่างชนิดกัน มีปริมาณน้อยกว่าตัวอย่างเงาะที่ไม่ผ่านการออสโมซิสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ภาพที่ 18 และตารางผนวกที่ ค3) ทั้งนี้ชนิดของน้ำตาลไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นที่ลดลง ตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสมีปริมาณความชื้นลดลงจากประมาณร้อยละ 80 เป็น 72 นอกจากนี้ยังพบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นในแต่ละตัวอย่าง ($p > 0.05$) การลดปริมาณน้ำในผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็งทำให้ลดปริมาณผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เซลล์ของผลไม้ได้รับความเสียหายจากปริมาณผลึกน้ำแข็งน้อยลง (Lazar, 1968; Li and Sun, 2002)



ภาพที่ 18 ปริมาณความชื้นของเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน

หมายเหตุ a-b ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละระยะเวลาการเก็บรักษา ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (Drip loss)

4.2.1 วิธีการที่เหมาะสมในการวัดปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง

การศึกษาปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งด้วยวิธีการที่ต่างกัน 2 วิธี ได้แก่ วิธีการตาม AOAC (1995) โดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังจากการละลายน้ำแข็งและวางบนตะแกรงนาน 2 นาที เปรียบเทียบกับน้ำหนักของตัวอย่างก่อนการละลายน้ำแข็ง และวิธีการที่ดัดแปลงจาก Marani *et al*. (2001) โดยวางตัวอย่างบนกระดาษซับ ทิ้งไว้ให้น้ำแข็งละลาย และชั่งน้ำหนักของกระดาษซับระหว่างการละลายน้ำแข็งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ทั้งสองวิธีใช้อุณหภูมิในการละลายน้ำแข็งที่ 8 และ 26°ซ ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งคำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างก่อนการละลายน้ำแข็ง สำหรับวิธีการที่เหมาะสมในการวัดปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งเลือกจากวิธีที่ให้ค่าเฉลี่ยที่วัดได้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) น้อยกว่าวิธีอื่น

ตารางที่ 7 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง เมื่อใช้วิธีการ และอุณหภูมิในการละลายน้ำแข็งที่ต่างกัน

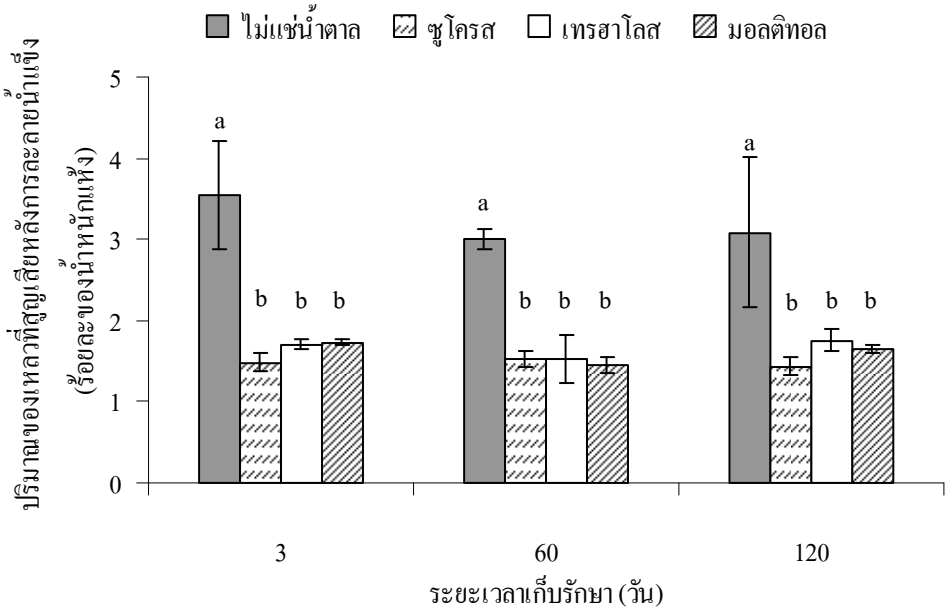
วิธีการ	การละลายน้ำแข็ง		ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (ร้อยละ)
	อุณหภูมิ (^{o}ซ)	ระยะเวลาละลายน้ำแข็ง (นาที)	
วางบนตะแกรง	8	330	19.54 $\pm$ 4.40
	26	120	18.10 $\pm$ 2.18
วางบนกระดาษซับ	8	480	39.38 $\pm$ 1.82
	26	320	41.25 $\pm$ 3.80

ผลการทดลอง พบว่า การใช้วิธีการวางตัวอย่างบนตะแกรง ทำให้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งน้อยกว่าวิธีที่วางบนกระดาษซับ (ตารางที่ 7) และอุณหภูมิในการละลายน้ำแข็งที่ 26^{o}ซ ใช้ระยะเวลาละลายน้ำแข็งน้อยกว่าที่ 8^{o}ซ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยที่ได้ พบว่า การใช้วิธีการวางตัวอย่างบนกระดาษซับ และละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 8^{o}ซ จนกระทั่งน้ำหนักของกระดาษซับคงที่ใช้เวลา 8 ชั่วโมง (ภาพผนวกที่ 1) เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวัดปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด

4.2.2 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง

ผลจากการวัดปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาเป็นเวลา 3, 60 และ 120 วัน โดยคำนวณปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งตามวิธีของ Marani *et al*. (2001) พบว่า การแช่ตัวอย่างเงาะในสารละลายทั้ง 3 ชนิด ทำให้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) ประมาณร้อยละ 50 (ภาพที่ 19 และตารางผนวกที่ ค3) ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายที่ใช้ และระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง เมื่อเปรียบเทียบหน่วยของปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งที่ใช้คำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักแห้งของตัวอย่างมีความแตกต่างจากการรายงานผลของ Marani *et al*. (2001) ที่แสดงปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสที่ระยะเวลาต่างๆ กันโดยเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิสที่ถูกกำหนด

ให้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งมีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบผลในเชิงตัวเลขระหว่างการทดลองที่ต่างกันได้ การแช่ผลไม้ในสารละลายเพื่อลดปริมาณน้ำก่อนการแช่เยือกแข็ง ทำให้ปริมาณน้ำที่ถูกแช่เยือกแข็งในผลไม้ลดลง ความเสียหายที่เกิดกับเซลล์ของผลไม้จากผลึกน้ำแข็งลดลงเช่นกัน ส่งผลให้ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งลดลง (Marani *et al*., 2001)



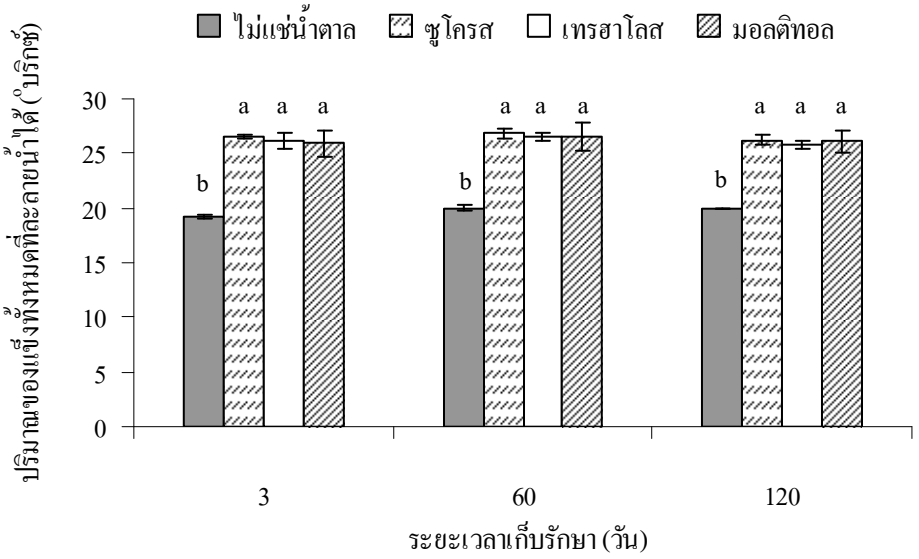
ภาพที่ 19 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน

หมายเหตุ a-b ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละระยะเวลาการเก็บรักษา ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้

การแช่ตัวอย่างเงาะในสารละลายทั้ง 3 ชนิดก่อนการแช่เยือกแข็ง ทำให้ตัวอย่างเงาะหลังการละลายน้ำแข็งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้มากกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่ามากกว่าประมาณ 6°บริกซ์ (ภาพที่ 20 และตารางผนวกที่ ค3) และชนิดของน้ำตาลไม่มีผลต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ($p > 0.05$) ปริมาณของแข็ง

ทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการที่ตัวอย่างมีปริมาณของแข็งที่ได้รับเพิ่มขึ้นในระหว่างการออสโมซิส (Forni *et al*.,1997) แรงดันออสโมซิสที่เกิดขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำตาลในสารละลายซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าภายในเซลล์สามารถแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปในเซลล์ของผลไม้ ระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของตัวอย่างที่ไม่แช่น้ำตาลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 20 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน

หมายเหตุ a-b ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละระยะเวลาการเก็บรักษาค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง และร้อยละของปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ผ่าน และไม่ผ่านการออสโมซิสมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ตามตารางที่ 8 และ 9 ตามลำดับ โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 4.8 - 5.0 และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ประมาณร้อยละ 0.2 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Forni *et al.* (1997) ที่พบว่า ชนิดของน้ำตาลที่ใช้ในการออสโมซิส (ซูโครส มอลโตส และซอร์บิทอล) ไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของแอปริคอทแช่เยือกแข็ง ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตาม ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ในแอปริคอทสดลดลงหลังจากผ่านการแช่ใน

สารละลายซูโครสมากกว่าตัวอย่างอื่น (จากร้อยละ 1.18 ลดลงเป็น 0.23) ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าตัวอย่างเงาะสดมีปริมาณกรดไม่มากเมื่อนำไปแช่ในสารละลายน้ำตาลจึงไม่เกิดการแลกเปลี่ยนของกรดในระหว่างการออสโมซิส ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ไม่แตกต่างกันระหว่างตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ผ่าน และไม่ผ่านการออสโมซิส

ตารางที่ 8 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน

ระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง			
	ไม่แช่น้ำตาล ^{NS}	ซูโครส ^{NS}	เทรฮาโลส ^{NS}	มอลติทอล ^{NS}
3 ^{ns}	4.95 $\pm$ 0.11	5.00 $\pm$ 0.27	4.92 $\pm$ 0.09	4.94 $\pm$ 0.01
60 ^{ns}	5.06 $\pm$ 0.00	5.02 $\pm$ 0.06	5.05 $\pm$ 0.12	4.93 $\pm$ 0.00
120 ^{ns}	4.87 $\pm$ 0.09	4.89 $\pm$ 0.02	4.84 $\pm$ 0.05	4.87 $\pm$ 0.07

หมายเหตุ ^{ns} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

^{NS} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 9 ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน

ระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)	ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (ร้อยละของกรดซิตริก)			
	ไม่แช่น้ำตาล ^{NS}	ซูโครส ^{NS}	เทรฮาโลส ^{NS}	มอลติทอล ^{NS}
3 ^{ns}	0.23 $\pm$ 0.00	0.23 $\pm$ 0.04	0.22 $\pm$ 0.00	0.23 $\pm$ 0.00
60 ^{ns}	0.27 $\pm$ 0.04	0.23 $\pm$ 0.04	0.23 $\pm$ 0.01	0.24 $\pm$ 0.00
120 ^{ns}	0.25 $\pm$ 0.01	0.26 $\pm$ 0.03	0.24 $\pm$ 0.01	0.22 $\pm$ 0.02

หมายเหตุ ^{ns} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

^{NS} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.4 ค่าสี (L*a*b*)

ผลการวัดสีตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ผ่าน และไม่ผ่านการออสโมซิส ด้วยเครื่องวัดสีในระบบ L*a*b* (ตารางที่ 10) พบว่า ในแต่ละช่วงของระยะเวลาการเก็บรักษา ค่า L* (ความสว่าง) และ a* (สีแดง-เขียว) ของตัวอย่างต่างชนิดกันมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ยกเว้นที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 120 วัน ค่า L* ของตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครสมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ถ้าพิจารณาจากค่าเฉลี่ย L* พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่า b* (สีเหลือง-น้ำเงิน) ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3 วัน ตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่สารละลายซูโครสมีค่า b* เป็นบวก ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างอื่นที่มีค่าเป็นลบ ($p \leq 0.05$) แสดงว่า ตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่สารละลายซูโครสมีสีออกเหลืองเล็กน้อยมากกว่าตัวอย่างอื่น อาจเป็นเพราะสารละลายซูโครสมีสีออกเหลืองอยู่แล้ว ในขณะที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นเป็น 60 วัน ตัวอย่างเงาะที่แช่ในสารละลายเทรฮาโลส และมอลติทอล มีค่า b* เปลี่ยนจากค่า b* สีน้ำเงิน (-) เป็นสีเหลือง (+) และไม่แตกต่างจากสีของตัวอย่างที่แช่สารละลายซูโครส เมื่อพิจารณาจากค่า b* ที่เปลี่ยนแปลง พบว่า มีความแตกต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 120 วัน ค่า b* ของตัวอย่างทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) หากพิจารณาสีของเนื้อเงาะจากการสังเกตด้วยสายตา และจากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า

ตัวอย่างทั้งหมดมีสีไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า การแช่ชิ้นเงาะในสารละลายน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด ไม่มีผลต่อสีของเงาะแช่เยือกแข็งอย่างชัดเจน โดยชิ้นเงาะมีสีขาวออกเหลืองเล็กน้อย

ตารางที่ 10 ค่าสี (L*a*b*) ของเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน

ค่าสี	ระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)	ไม่แช่น้ำตาล ^{NS}	ซูโครส ^{NS}	เทรฮาโลส ^{NS}	มอลติทอล ^{NS}
L*	3 ^{ns}	41.11 ± 6.89	41.22 ± 3.41	40.03 ± 5.49	39.94 ± 5.30
	60 ^{ns}	44.31 ± 0.13	43.46 ± 2.01	43.02 ± 1.30	44.02 ± 0.88
	120	44.26 ± 0.51^{a}	42.40 ± 0.24^{b}	43.93 ± 0.02^{ab}	43.88 ± 0.96^{ab}
a*	3 ^{ns}	-1.93 ± 0.51	-1.86 ± 0.23	-1.88 ± 0.44	-1.87 ± 0.35
	60 ^{ns}	-2.20 ± 0.02	-2.22 ± 0.03	-2.15 ± 0.11	-2.15 ± 0.13
	120 ^{ns}	-2.17 ± 0.18	-2.06 ± 0.12	-2.34 ± 0.06	-2.05 ± 0.03
b*	3	-0.27 ± 0.68^{b}	0.69 ± 0.53^{a}	-0.13 ± 0.35^{b}	-0.21 ± 0.52^{b}
	60	-0.83 ± 0.95^{b}	0.13 ± 0.29^{a}	0.02 ± 0.78^{ab}	0.23 ± 0.85^{a}
	120	-0.62 ± 0.90^{a}	0.40 ± 1.13^{a}	0.28 ± 0.45^{a}	0.37 ± 1.23^{a}

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

^{ns} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

^{NS} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งที่อยู่ในคุณลักษณะเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.5 เนื้อสัมผัส

ผลจากการวัดเนื้อสัมผัสของเงาะหลังการละลายน้ำแข็งด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสโดยให้แรงกดสูงสุดเป็นความแน่นเนื้อของตัวอย่าง พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน ทุกตัวอย่างมีความแน่นเนื้อแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 11) และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น เฉพาะตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส มีค่าความแน่นเนื้อลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบเนื้อสัมผัสของเงาะแช่เยือกแข็งที่วัดด้วยเครื่องมือ และผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า ตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่สารละลายซูโครสซึ่งมีแนวโน้มของค่าความแน่นเนื้อมากที่สุดในช่วงระยะเวลาการเก็บรักษา 60 วัน เป็นตัวอย่างที่ได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสมากกว่าตัวอย่างอื่น ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 12) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า น้ำตาลซูโครสสามารถปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเงาะแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าเทรฮาโลสและมอลติทอล โมเลกุลของน้ำตาลซูโครสที่เข้าไปในเซลล์ สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโพลีแซคคาไรด์ในผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรง ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของผลไม้มีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น (Hodge and Osman, 1975)

การที่เครื่องมือไม่สามารถบอกความแตกต่างของเนื้อสัมผัสระหว่างตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่สารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ได้อย่างชัดเจน อาจเนื่องมาจากลักษณะการวัดเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องเป็นลักษณะที่วัดเฉพาะแรงกดบนผิวตัวอย่างลึกลงไปครึ่งหนึ่งของความหนา ซึ่งเป็นลักษณะที่แตกต่างจากการเคี้ยว Marani *et al*. (2001) พบว่า ตัวอย่างกีวีที่ผ่านการแช่ในสารละลายชนิดต่างๆ มีเนื้อสัมผัสที่วัดด้วยเครื่องมือไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ในขณะที่แอปเปิ้ลที่ผ่านการแช่สารละลายมีค่าเนื้อสัมผัสที่วัดได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย อย่างไรก็ตาม Marani *et al.* (2001) ไม่ได้รายงานผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างกีวี และแอปเปิ้ลแช่เยือกแข็ง

ตารางที่ 11 ค่าเนื้อสัมผัสของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน

ระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)	ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)			
	ไม่แช่น้ำตาล ^{NS}	ซูโครส	เทรฮาโลส ^{NS}	มอลติทอล ^{NS}
3 ^{ns}	1.88 ± 0.41	2.44 ± 0.22 ^{A}	2.06 ± 0.11	2.14 ± 0.62
60 ^{ns}	2.19 ± 0.09	2.42 ± 0.11 ^{AB}	2.16 ± 0.18	2.11 ± 0.42
120 ^{ns}	2.08 ± 0.32	2.07 ± 0.06 ^{B}	2.10 ± 0.25	2.10 ± 0.35

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

^{ns} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

^{NS} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

5. ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน โดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 25 คน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นนิสิตคณะอุตสาหกรรมเกษตร มีอายุระหว่าง 20-35 ปี ประเมินผลคะแนนความชอบแบบ 9-points hedonic scale ต่อคุณลักษณะต่างๆ และการยอมรับ ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3 วัน คะแนนความชอบต่อลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส และรสชาติของตัวอย่างเงาะทั้งหมดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 12) ส่วนคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และการยอมรับ ตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลายซูโครสได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสมากกว่าตัวอย่างอื่น ($p \leq 0.05$) และมีคะแนนการยอมรับมากที่สุด

การเก็บรักษาตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 60 วัน พบว่า ตัวอย่างที่ผ่าน และไม่ผ่านการออสโมซิสมีคะแนนความชอบแตกต่างกันเฉพาะในด้านเนื้อสัมผัส รสชาติ และการยอมรับ โดย

ตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่สารละลายซูโครสได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส และการยอมรับมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายมอลติทอล และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลายซูโครสได้รับคะแนนความชอบด้านรสชาติมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลายเทรฮาโลส และมอลติทอล และมีคะแนนมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นเป็น 120 วัน ทุกตัวอย่างมีคะแนนการยอมรับแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แม้ว่าคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลายซูโครสมากกว่าตัวอย่างอื่น อาจเป็นเพราะผู้ทดสอบมีความชอบรสหวานที่แตกต่างกันจึงตัดสินใจการยอมรับผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ระยะเวลาการเก็บรักษาต่างกัน พบว่า คะแนนความชอบ และการยอมรับของแต่ละตัวอย่างคุณลักษณะส่วนใหญ่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 12 คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเงาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3, 60 และ 120 วัน [1/]

คุณลักษณะ	ระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)	ไม่แช่น้ำตาล^{NS}	ซูโครส^{NS}	เทรฮาโลส	มอลติทอล
ลักษณะปรากฏ	3^{ns}	6.60 ± 0.40	6.82 ± 0.31	6.70 ± 0.20^{A}	6.76 ± 0.17^{A}
	60^{ns}	6.86 ± 0.08	6.91 ± 0.10	6.94 ± 0.03^{A}	6.68 ± 0.00^{A}
	120^{ns}	7.06 ± 0.03	6.99 ± 0.26	6.96 ± 0.00^{A}	7.01 ± 0.23^{A}
สี	3^{ns}	6.76 ± 0.40	6.82 ± 0.42	6.74 ± 0.03^{C}	6.94 ± 0.37^{A}
	60^{ns}	7.02 ± 0.20	6.88 ± 0.23	6.96 ± 0.06^{B}	6.79 ± 0.33^{A}
	120^{ns}	7.20 ± 0.11	7.04 ± 0.06	7.20 ± 0.06^{A}	7.20 ± 0.17^{A}
เนื้อสัมผัส	3	5.76 ± 0.34^{b}	6.64 ± 0.45^{a}	5.91 ± 0.10^{bA}	6.04 ± 0.34^{bA}
	60	6.01 ± 0.16^{b}	6.66 ± 0.25^{a}	6.40 ± 0.06^{abA}	5.96 ± 0.08^{bA}
	120	6.02 ± 0.25^{b}	6.66 ± 0.03^{a}	5.98 ± 0.31^{bA}	6.28 ± 0.17^{abA}
กลิ่นรส	3^{ns}	6.00 ± 0.40	5.98 ± 0.42	6.04 ± 0.17^{A}	5.16 ± 0.11^{C}
	60^{ns}	6.04 ± 0.06	6.26 ± 0.37	6.38 ± 0.14^{A}	6.18 ± 0.14^{A}
	120^{ns}	6.22 ± 0.08	6.22 ± 0.42	6.20 ± 0.11^{A}	5.64 ± 0.06^{B}

ตารางที่ 12 (ต่อ)

คุณลักษณะ	ระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)	ไม่แช่น้ำตาล[NS]	ซูโครส[NS]	เทรฮาโลส[NS]	มอลติทอล[NS]
รสชาติ	3[ns]	5.96 ± 0.23	6.46 ± 0.42	6.24 ± 0.45	5.46 ± 0.40
	60	6.04 ± 0.17[b]	6.62 ± 0.06[a]	6.56 ± 0.28[a]	6.25 ± 0.10[ab]
	120	6.24 ± 0.06[b]	6.48 ± 0.51[ab]	6.96 ± 0.06[a]	6.12 ± 0.34[b]
การยอมรับ	3	6.01 ± 0.35[ab]	6.83 ± 0.30[a]	6.28 ± 0.37[ab]	5.66 ± 0.34[b]
	60	6.48 ± 0.11[b]	6.95 ± 0.13[a]	6.76 ± 0.00[ab]	6.49 ± 0.18[b]
	120[ns]	6.34 ± 0.14	6.71 ± 0.61	6.57 ± 0.27	6.14 ± 0.31

หมายเหตุ [1/] จำนวนผู้ทดสอบ 25 คน

[a-b] ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

[A-C] ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในคุณลักษณะเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

[ns] ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

[NS] ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งที่อยู่ในคุณลักษณะเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยรวม พบว่า การแช่ตัวอย่างในสารละลายทั้ง 3 ชนิดก่อนการแช่เยือกแข็งไม่มีผลต่อคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี และกลิ่นรสของตัวอย่างหลังการละลายน้ำแข็ง ตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่สารละลายซูโครสมีคะแนนความชอบด้าน เนื้อสัมผัส รสชาติ และการยอมรับมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายเทรฮาโลส และมอลติทอล และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย โดยมีคะแนนความชอบ และการยอมรับอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสในด้านสี เนื้อสัมผัส และรสชาติ กับผลจากการวัดด้วยเครื่องมือ พบว่า ตัวอย่างที่ไม่ผ่าน และผ่านการออสโมซิส มีค่าสีที่วัดจากเครื่องมือแตกต่างกันในบางค่า แต่ได้รับคะแนนความชอบด้านสีไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ($p > 0.05$)

เนื่องจากเครื่องมือสามารถวัดค่าสีได้ละเอียดกว่าการมองเห็น สำหรับด้านเนื้อสัมผัส ตัวอย่างเจาะที่ผ่านการแช่สารละลายซูโครสซึ่งมีแนวโน้มของความแน่นเนื้อมากที่สุดในช่วงระยะเวลาการเก็บรักษา 60 วัน เป็นตัวอย่างที่ได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสมากกว่าตัวอย่างอื่น ส่วนรสชาติของตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด โดยรวมได้รับคะแนนความชอบด้านรสชาติมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส โดยตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลายน้ำตาลซูโครส และเทรฮาโลส ได้รับความชอบมากกว่ามอลติทอล อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบรสชาติของตัวอย่างกับปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ พบว่า ความชอบด้านรสชาติของตัวอย่างไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ เพราะตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลายทั้ง 3 ชนิดซึ่งมีรสชาติต่างกัน มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน

6. อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของสารละลายน้ำตาล และตัวอย่างเจาะที่ไม่ผ่าน และผ่านการออสโมซิส

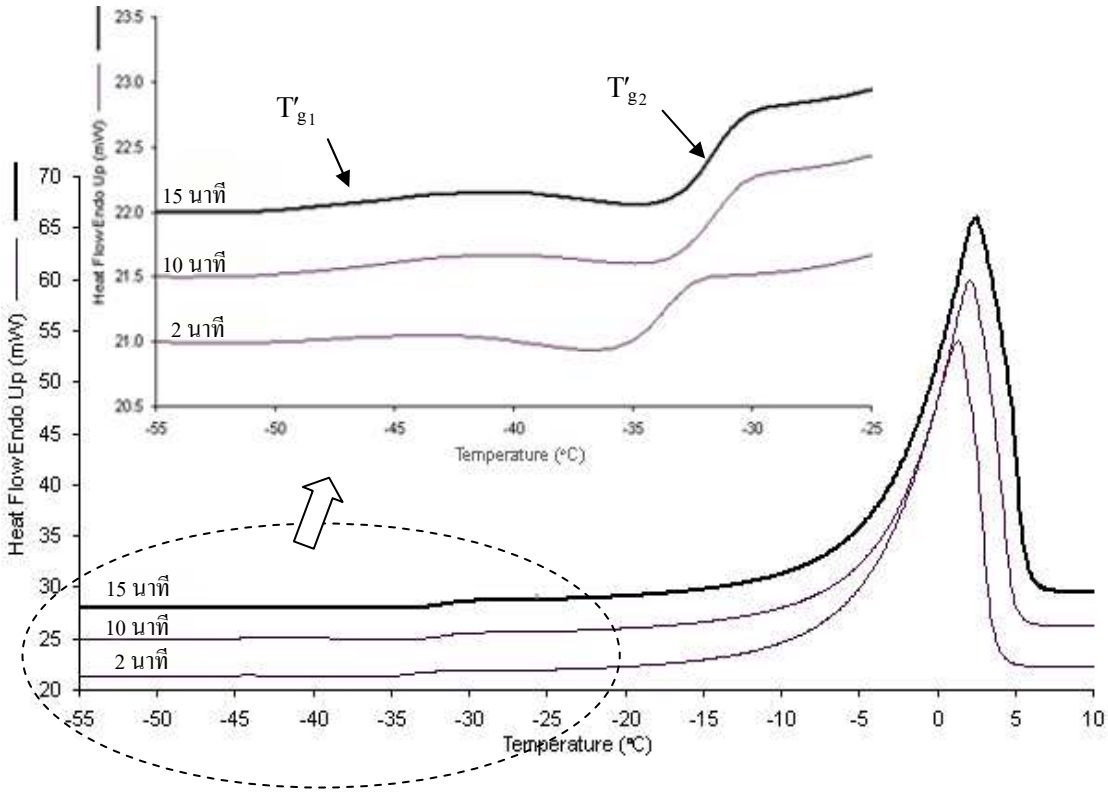
การตรวจสอบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T'_g) เพื่อใช้ในการทำนายความคงตัวของอาหาร สามารถตรวจสอบด้วยการใช้ DSC โดยการให้ความร้อนตัวอย่างที่ถูกแช่เยือกแข็งเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาพกลาสไปเป็นรับเบอรี ผลิตภัณฑ์อาหารที่เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของอาหารเกิดขึ้นน้อย อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิที่เก็บรักษาและอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน การเก็บรักษาอาหารที่อุณหภูมิสูงกว่า T'_g ทำให้โมเลกุลของส่วนที่ไม่ถูกแช่เยือกแข็งสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพได้อย่างรวดเร็ว (Rahman, 1999; Lim *et al*., 2006) ในการทดลองนี้ได้ตรวจสอบอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า T'_g และคุณภาพทางเคมีกายภาพของตัวอย่างเจาะแช่เยือกแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านการออสโมซิส

6.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่า T'_g ของสารละลายน้ำตาล

6.1.1 การหาระยะเวลาพัก (Holding time) ที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ -60°ซ

ในการทดลองเบื้องต้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่า T'_g โดยทดสอบกับสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20 ที่สภาวะ non-anneal เมื่อใช้ระยะเวลาในการพักที่อุณหภูมิ -60°ซ เป็นเวลาต่างๆ กัน พบว่า การใช้เวลาในการพักเป็นเวลา 2 นาที สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงกลาสทรานซิชันเกิดขึ้นเพียงช่วงเดียวที่อุณหภูมิ -33°ซ ในขณะที่เมื่อ

เพิ่มเวลาในการพักที่อุณหภูมิ -60°ซ จาก 2 นาที เป็น 10 และ 15 นาที พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงกลาสทรานซิชันเกิดขึ้น 2 ช่วง คือ ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ (T'_{g_1}) และอุณหภูมิสูง (T'_{g_2}) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงแรกเป็นช่วงอุณหภูมิต่ำที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนจากการใช้เวลาพัก 2 นาที ในขณะที่การเพิ่มระยะเวลาในการพักจาก 10 เป็น 15 นาที ทำให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ T'_{g_1} ชัดเจนขึ้น โดยระยะเวลาในการพักนาน 10 และ 15 นาที ทำให้ค่า T'_{g_1} ใกล้เคียงกันที่ประมาณ -44 °ซ (ภาพที่ 21) ส่วนการเปลี่ยนแปลงกลาสทรานซิชันที่ช่วงอุณหภูมิสูง เมื่อใช้เวลาในการพักทั้ง 10 และ 15 นาที มีค่า T'_{g_2} ประมาณ -31°ซ การศึกษาของ Pyne *et al.* (2003) ใช้เวลาในการพักที่ -60°ซ นาน 15 นาที ก่อนให้ความร้อน เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิการเกิดกลาสทรานซิชันของสารละลายเทรฮาโลส ในขณะที่ Rahman (2004) ใช้เวลาในการพักที่อุณหภูมิ -90°ซ เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำให้ในระบบเกิดสภาวะที่สมดุลก่อนการวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างอินทผลัม ดังนั้นการใช้เวลาในการพักตัวอย่างสารละลายน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิ -60°ซ เป็นระยะเวลาที่นานขึ้นทำให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ช่วงอุณหภูมิต่ำได้ชัดเจน อาจเป็นเพราะระบบเกิดสภาวะสมดุลก่อนการวิเคราะห์ได้มากขึ้น ในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้ระยะเวลาในการพักที่อุณหภูมิ -60 °ซ เป็นเวลา 15 นาที ในการวิเคราะห์ทั้งสภาวะแบบ non-anneal และ anneal



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลง Heat flow ของสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20 ที่สภาวะ non-anneal เมื่อใช้เวลาในการพัก (Holding time) ที่ -60 °ซ นาน 2, 10 และ 15 นาที

6.1.2 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการ Anneal

การ anneal เป็นการให้ความร้อนแก่สารละลายที่ถูกแช่เยือกแข็งจนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และหยุดพักเพื่อที่จะทำให้สารละลายในระบบเกิดผลึกน้ำแข็งมากขึ้นก่อนจะให้ความร้อนอีกครั้งเพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Roos, 1995) การ anneal นี้ทำให้สามารถวัดค่าอุณหภูมิที่แท้จริงในการเกิดกลาสทรานซิชันได้ (Rahman, 2004)

ในการทดลองนี้ได้เลือกอุณหภูมิเพื่อใช้ในการ anneal สารละลายซูโครส โดยใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ T'_{g_1} และต่ำกว่า T'_{g_2} ของสภาวะ non-anneal คือในช่วงอุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนแปลงที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ ($T_{end\,1}$) และอุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่ช่วงอุณหภูมิสูง ($T_{onset\,2}$) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง -43 และ -33°ซ โดย anneal ที่อุณหภูมิ -40, -38 และ-34°ซ ระยะเวลาที่ใช้ในการ anneal นาน 30 นาที เนื่องจาก ในงานวิจัยของ Izzard *et al*. (1991) ได้เลือกระยะเวลานี้ในการ anneal สารละลายซูโครสที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10-65 จากผลการทดลองศึกษาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมในการ anneal ตัวอย่างสารละลายซูโครส พบว่า การ anneal ที่อุณหภูมิ -34°ซ ทำให้ค่า T'_{g_1} และ T'_{g_2} ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ใช้สภาวะ non-anneal (ตารางที่ 13) ในขณะที่ค่า T'_{g_1} ของตัวอย่างที่ anneal อุณหภูมิ -38 และ -40°ซ มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 4°ซ ส่วนค่า T'_{g_2} ของทั้งสองสภาวะมีค่าใกล้เคียงกับที่สภาวะ non-anneal ดังนั้นอุณหภูมิ anneal ที่มีผลทำให้ค่า T'_{g_1} เพิ่มขึ้น คือ -38 และ -40°ซ การ anneal ด้วยสภาวะทั้งสองนี้ทำให้ค่า T'_{g_1} มีค่าใกล้เคียงกัน แต่การ anneal ที่อุณหภูมิ -40°ซ มีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงช่วง T'_{g_1} เลื่อนขึ้นจนใกล้กับการเปลี่ยนแปลงที่ T'_{g_2} มาก ทำให้วิเคราะห์ผลได้ยากกว่าการ anneal ที่ -38°ซ ซึ่งเป็นอุณหภูมิกึ่งกลางระหว่าง $T_{end\,1}$ และ $T_{onset\,2}$ ที่ได้จากการวิเคราะห์ที่สภาวะ non-anneal ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า T'_{g_1} ที่เพิ่มขึ้นเมื่อ anneal แสดงในภาพที่ 22 สภาวะ anneal ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีผลทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากในระหว่างการ anneal ส่วนของน้ำซึ่งเป็นพลาสติไซเซอร์ (พลาสติไซเซอร์มีผลทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลง) เคลื่อนที่ออกจากส่วนของตัวถูกละลายที่มีความเข้มข้นจึงมีผลทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้น (Roos, 1995)

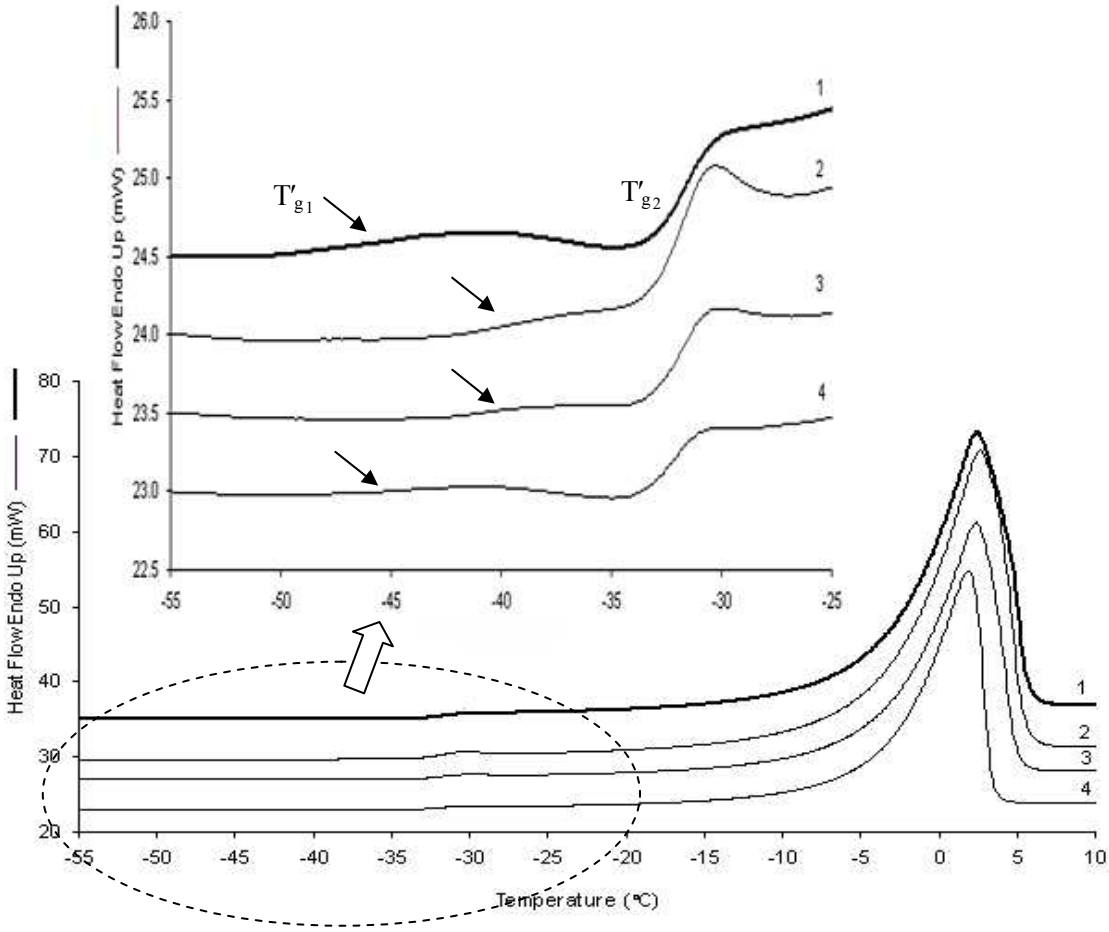
อุณหภูมิที่เหมาะสมในการ anneal ($T'_m - 1$) ทำให้ได้ค่าอุณหภูมิจริงของ T'_g (Rahman, 2004) Roos and Karel (1991a) รายงานว่า สารละลายซูโครสมีค่า T'_m เท่ากับ -34°ซ ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการ anneal คือที่อุณหภูมิ -35°ซ ($T'_m - 1$) อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการ anneal สารละลายซูโครสที่อุณหภูมิ -40 และ -38°ซ มีผลทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T'_{g_1}) เพิ่มขึ้นจากสภาวะ non-anneal และมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ -41°ซ

ซึ่งเป็นค่า T'_g (ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการเปลี่ยนแปลงกลาสทรานซิชัน) ที่มีการรายงานก่อนหน้านี้ (Roos, 1995) ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้ในการ anneal อาจเป็นเพราะ สภาวะของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ และเกรดของน้ำตาลที่ใช้มีความแตกต่างกัน สำหรับอุณหภูมิที่เลือกใช้ anneal ตัวอย่างในการทดลองต่อไป ได้เลือกที่อุณหภูมิกึ่งกลางระหว่าง $T_{end\ 1}$ และ $T_{onset\ 2}$ ที่ได้จากการวิเคราะห์ที่สภาวะ non-anneal เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการ anneal

ตารางที่ 13 ค่า $T'_{g\ 1}$ และ T'_{g_2} ของสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20 ที่สภาวะ non-anneal และ anneal ที่อุณหภูมิ -40, -38 และ -34°ซ

ค่า	non-anneal	อุณหภูมิ anneal (°ซ)		
		-40	-38	-34
$T'_{g\ 1}$ (°ซ)	-44.65	-39.79	-40.21	-44.21
T'_{g_2} (°ซ)	-31.57	-31.94	-31.70	-31.94

การใช้สภาวะ anneal ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ ทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันมีค่าสูงกว่าการใช้สภาวะ non-anneal เนื่องจากการ anneal ที่อุณหภูมิ และระยะเวลาที่เหมาะสมทำให้ระบบเกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุด และตัวถูกละลายในระบบมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่า T'_g ที่วิเคราะห์ด้วยสภาวะทั้งสองนี้ใน State diagram (ภาพที่ 12) ถ้าให้ตัวอย่างที่ใช้สภาวะ non-anneal มีค่า T'_g อยู่ที่ตำแหน่ง F แสดงว่า การ anneal ทำให้อุณหภูมิ T'_g เพิ่มขึ้นจากจุด F ไปทางจุด D และตัวถูกละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลง Heat flow ของสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20 ที่สภาวะ (1) non-anneal, (2) anneal ที่ -40°ซ, (3) anneal ที่ -38°ซ และ (4) anneal ที่ -34°ซ ระยะเวลา anneal นาน 30 นาที

จากภาพที่ 22 เมื่อพิจารณาลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่าง T'_{g_1} และ T'_{g_2} ตัวอย่างที่ใช้สภาวะ non-anneal และ anneal ที่อุณหภูมิ -34°ซ มีลักษณะของ devitrification เกิดขึ้นซึ่งเกิดจากการที่มีน้ำแข็งเกิดขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนครั้งสุดท้าย ลักษณะดังกล่าวลดลงเมื่อวิเคราะห์ด้วยสภาวะ anneal (Izzard *et al*., 1991; Pyne *et al*, 2003) ที่อุณหภูมิ -40 และ -38°ซ เนื่องจากการ anneal ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งมากที่สุด ส่วนที่ไม่ถูกแช่เยือกแข็งลดลง และตัวถูกละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้น และไม่ปรากฏลักษณะ devitrification สำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วง T'_{g_2} จะสังเกตเห็นว่า การ anneal ที่อุณหภูมิ -40 และ -38°ซ เส้นกราฟมีลักษณะของการเกิด relaxation เกิดขึ้นแตกต่างจากสภาวะอื่น โดยอุณหภูมิ anneal ที่ -40°ซ ทำให้เกิดลักษณะ relaxation มากกว่าที่อุณหภูมิ -38°ซ และมีขนาดของ

พื้นที่ใต้กราฟในช่วงของการละลายน้ำแข็งที่บริเวณ T'_{g_2} มากที่สุด (Roos, 1995) ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับผลการทดลองของ Pyne *et al*. (2003) ที่ anneal สารละลายเทรฮาโลสเข้มข้นร้อยละ 45 ที่อุณหภูมิ -36°ซ เป็นเวลา 120 นาที

6.2 ค่า T'_g ของสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ที่สภาวะ Non-anneal และ Anneal

สำหรับการวัดอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของสารละลายที่ใช้ในการออสโมซิส พบว่าที่สภาวะ non-anneal ค่า T'_{g_1} ของสารละลายน้ำตาลชนิดต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 14) โดยน้ำตาลเทรฮาโลสมีค่า T'_{g_1} สูงที่สุด รองลงมาเป็นซูโครส และมอลติทอล ตามลำดับ การ anneal สารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ที่อุณหภูมิ -38, -33 และ-39°ซ ตามลำดับ ทำให้ค่า T'_{g_1} ของสารละลายน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด สูงกว่าที่สภาวะ non-anneal ($p \leq 0.05$) แสดงว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการ anneal ของสารละลายแต่ละชนิด มีผลทำให้ผลึกน้ำแข็งเกิดมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่สภาวะ anneal น้ำตาลเทรฮาโลสยังคงมีค่า T'_{g_1} สูงที่สุด ส่วนน้ำตาลซูโครส และมอลติทอล มีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตาม การ anneal ไม่มีผลทำให้ค่า T'_{g_2} เพิ่มขึ้นจากสภาวะ non-anneal อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยสารละลายเทรฮาโลสมีค่า T'_{g_2} สูงกว่าน้ำตาลชนิดอื่นทั้งสภาวะแบบ non-anneal และ anneal

ตารางที่ 14 ค่า T'_{g_1} และ T'_{g_2} ของสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ความเข้มข้นร้อยละ 20 ที่สภาวะ non-anneal และ anneal [1/]

อุณหภูมิ	สภาวะ	สารละลายน้ำตาลความเข้มข้นร้อยละ 20		
		ซูโครส	เทรฮาโลส	มอลติทอล
T'_{g_1}(°ซ)	non-anneal	-44.65 ± 0.35 ^{bB}	-40.46 ± 0.23 ^{aB}	-47.75 ± 0.00 ^{cB}
	anneal	-40.21 ± 0.59 ^{bA}	-36.70 ± 0.47 ^{aA}	-41.30 ± 0.00 ^{bA}
T'_{g_2} (°ซ)	non-anneal	-31.57 ± 0.17 ^{bA}	-28.35 ± 0.00 ^{aA}	-32.61 ± 0.83 ^{bA}
	anneal	-31.70 ± 0.35 ^{bA}	-28.15 ± 0.53 ^{aA}	-33.83 ± 0.29 ^{cA}

หมายเหตุ [1/] อุณหภูมิที่ใช้ anneal สารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล เท่ากับ -38, -33 และ -39°ซ ตามลำดับ

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

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

เมื่อเปรียบเทียบค่า T'_{g_1} ของสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอลที่วิเคราะห์ในสภาวะ anneal กับงานวิจัยที่มีการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับค่า T'_g ที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (ตารางที่ 15) ส่วนค่า T'_{g_2} ซึ่งวิเคราะห์ที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของการเปลี่ยนแปลงจะสูงกว่าอุณหภูมิ T'_m (ตารางที่ 15) ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการละลายของน้ำแข็งประมาณ 2-4°ซ อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลที่รวบรวมโดย Slade and Levine (1996) แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T'_g) ของน้ำตาลชนิดเดียวกันมีการรายงานที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

โดยทั่วไปอุณหภูมิกลาสทรานซิชันขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของน้ำตาล (Roos, 1995) แต่เทรฮาโลสเป็นไดแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับซูโครส และใกล้เคียงกับมอลติทอล แต่มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับไดแซคคาไรด์ชนิดอื่น เนื่องจากเทรฮาโลสสามารถเกิดลักษณะไดไฮเดรต (dihydrate) (Richards and Dexter, 2001) โดยจับกับโมเลกุลของน้ำทำให้น้ำซึ่งเป็นพลาสติไซเซอร์ที่อยู่ในระบบลดลง ปริมาณพลาสติไซเซอร์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลงโดยน้ำมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเท่ากับ -135°ซ (Roos, 1995)

ตารางที่ 15 ค่า T'_g และ T'_m ของสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล

ชนิดน้ำตาล	T'_g (°ซ)		T'_m (°ซ)
	onset	midpoint	
ซูโครส	-46	-41	-34
เทรฮาโลส	-40	-35	-30
มอลติทอล	-47	-42	-37

หมายเหตุ onset และ midpoint หมายถึง ตำแหน่งที่จุดเริ่มต้น และจุดกึ่งกลางของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน

ที่มา : ดัดแปลงจาก Roos (1995)

ผลจากการตรวจสอบสารละลายน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด เป็นไปตามข้อสรุปที่ว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่ำ (T'_{g_1}) เนื่องจากการ anneal มีผลทำให้ค่า T'_{g_1} เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า T'_{g_2} ซึ่งอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเริ่มต้นการละลายของน้ำแข็ง (T'_m) (Roos, 1995; Pyne *et al*., 2003)

6.3 ค่า T'_g ของตัวอย่างเจาะที่ไม่ผ่าน และผ่านการออสโมซิส

ผลการตรวจสอบอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างเจาะที่ผ่าน และไม่ผ่านการออสโมซิส โดยใช้สารละลายส่วนที่สกัดจากตัวอย่าง พบว่า ที่สภาวะ non-anneal ตัวอย่างเจาะที่ผ่านการแช่สารละลายน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด มีค่า T'_{g_1} สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่น้ำตาลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 16) และไม่มีความแตกต่างกันระหว่างตัวอย่างที่แช่น้ำตาลชนิดต่างกัน ในขณะที่การ anneal มีผลทำให้ค่า T'_{g_1} ของตัวอย่างเจาะเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) และไม่มีผลต่อค่า T'_{g_2} หรือ T'_m เช่นเดียวกับการวิเคราะห์สารละลายน้ำตาล โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการ anneal ตัวอย่างเจาะที่ไม่ผ่านการแช่น้ำตาล คือ -43°ซ และเจาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด คือ -41°ซ การแช่ตัวอย่างเจาะในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างกัน ทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T'_{g_1}) ของตัวอย่างเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) โดยสารละลายเทรฮาโลสซึ่งมีค่า T'_g สูงที่สุด มีผลทำให้ตัวอย่างเจาะมีค่า T'_{g_1} เพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ จากอุณหภูมิ T'_g ประมาณ -48 เป็น -42°ซ ส่วนตัวอย่างเจาะที่แช่สารละลายน้ำตาลซูโครส และมอลติทอล มีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ($p > 0.05$) จากการศึกษาของ Giannakourou and Taoukis (2003) พบว่า ค่า T'_g ของเมล็ดถั่วลันเตาที่ผ่านการแช่ใน

สารละลายมีความสัมพันธ์กับค่า T'_g ของสารละลาย โดยเมล็ดถั่วลันเตามีค่า T'_g สูงที่สุด เมื่อผ่านการแช่ในสารละลายโอลิโกฟรุกโตสซึ่งมีค่า T'_g สูงกว่ามอลติทอล และโอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลส

เป็นที่ทราบกันดีว่า ความคงตัวของผลิตภัณฑ์อาหารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันทำให้ลดอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการเปลี่ยนแปลงเกิดมากขึ้นเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันมากขึ้น (Roos, 1995; Rahman, 2006) ในการทดลองได้เก็บรักษาเงาะแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18°ซ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ T'_g และ T'_m ของตัวอย่างเงาะที่ผ่านและไม่ผ่านการออสโมซิส แสดงว่า ในระหว่างการเก็บรักษาทุกตัวอย่างอยู่ในสภาพรับเบอรีแม้ว่าเทรฮาโลสสามารถช่วยเพิ่มค่า T'_g ของเงาะแช่เยือกแข็งได้มากกว่าน้ำตาลชนิดอื่น เมื่อพิจารณาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันกับคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็ง พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิด มีปริมาณความชื้น และปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งลดลง แต่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น โดยชนิดของสารละลายที่ใช้ไม่มีผลต่อปริมาณดังกล่าว ในขณะที่ค่า T'_g ของตัวอย่างเงาะที่เพิ่มขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายที่ใช้ นอกจากนี้คุณภาพของตัวอย่างในด้านสี และเนื้อสัมผัสที่วัดด้วยเครื่องมือ (ตารางที่ 10 และ 11) ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า T'_g ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งชนิดอื่น Giannakourou and Taoukis (2003) พบว่า เมล็ดถั่วลันเตาที่แช่ในสารละลายโอลิโกฟรุกโตสผสมกับเทรฮาโลสมีความคงตัวของสีมากกว่าตัวอย่างที่แช่สารละลายโอลิโกฟรุกโตสซึ่งมีค่า T'_g สูงกว่า ส่วน Contreras *et al.* (2007) พบว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชันไม่มีความสัมพันธ์กับค่าเนื้อสัมผัสของสตอเบอรีอบแห้ง โดยตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายน้ำตาลซูโครสก่อนการทำแห้งด้วยลม และการทำแห้งด้วยลมและไมโครเวฟ มีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส แต่ตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสก่อนการทำแห้งทั้งสองแบบทำให้สตอเบอรีมีค่าเนื้อสัมผัส (หลังจากการทำแห้ง และคืนรูป) ซึ่งวัดจากแรงกดสูงสุดมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส ในขณะที่ Forni *et al.* (1997) พบว่า การแช่แอปริคอทในสารละลายมอลโตสก่อนการแช่เยือกแข็ง สามารถช่วยรักษาสีได้ดีกว่าน้ำตาลซูโครส และซอร์บิทอลซึ่งมีค่า T'_g ต่ำกว่ามอลโตส และ Lim *et al.* (2006) พบว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และอุณหภูมิเก็บรักษามีผลต่อคุณภาพด้านสี และปริมาณวิตามินซีของเมล็ดถั่วลันเตาแช่เยือกแข็ง ความคงตัวของสีเพิ่มมากขึ้นเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิใกล้หรือต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกลาสทรานซิชันกับคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า ตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายเทรฮาโลสซึ่งมีค่า T'_g สูงที่สุด ได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสน้อยกว่าตัวอย่างที่แช่ในสารละลายซูโครส ทั้งนี้การเก็บรักษาเงาะที่อุณหภูมิ -18°ซ เป็นระยะเวลา 120 วัน คุณภาพทางเคมี และกายภาพของแต่ละตัวอย่างส่วนใหญ่ไม่มีความแตกต่างจากที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 60 วัน จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มค่า T'_g ของตัวอย่างเงาะด้วยการแช่ในสารละลายชนิดต่างกัน ไม่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพทางเคมี และกายภาพอย่างชัดเจน อาจเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างมาก (ประมาณ 24 – 30°ซ) Hagiwara *et al*. (2005) พบว่า อัตราการเกิดผลึกซ้ำของสารละลายน้ำตาลซูโครสลดลงเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -29 ถึง -35°ซ ซึ่งเป็นช่วงของอุณหภูมิ T'_m (-32°ซ) ของสารละลาย นอกจากนี้ Dermesonlouoglou *et al*. (2007) พบว่า การลดอุณหภูมิการเก็บรักษามะเขือเทศแช่เยือกแข็งที่ -24°ซ สามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงปริมาณวิตามินซี และเนื้อสัมผัสของมะเขือเทศแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12°ซ ดังนั้นการเก็บรักษาเงาะแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ หรือการเพิ่มอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างให้สูงขึ้นอีก อาจทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีมากขึ้น

ตารางที่ 16 ค่า T'_{g_1} และ T'_{g_2} ของตัวอย่างเงาะที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่สภาวะ non-anneal และ anneal [1/]

ค่า	สภาวะ	ไม่แช่น้ำตาล	ซูโครส	เทรฮาโลส	มอลติทอล
T'_{g_1} (°ซ)	non-anneal	-51.69 ± 0.42 ^{bB}	-49.90 ± 0.06 ^{aB}	-49.86 ± 0.00 ^{aB}	-49.90 ± 0.06 ^{aB}
	anneal	-48.63 ± 0.30 ^{cA}	- 46.73 ± 0.41 ^{bA}	-42.18 ± 0.17 ^{aA}	-47.44 ± 0.56 ^{bA}
T'_{g_2} (°ซ)	non-anneal	-36.21 ± 0.00 ^{dA}	-34.33 ± 0.18 ^{bA}	-33.33 ± 0.18 ^{aA}	-35.08 ± 0.30 ^{cA}
	anneal	-36.66 ± 0.53 ^{cA}	-34.97 ± 0.21 ^{bA}	-34.04 ± 0.00 ^{aA}	-35.61 ± 0.02 ^{bA}

หมายเหตุ [1/] อุณหภูมิที่ใช้ anneal ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย เท่ากับ -43°ซ และตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด เท่ากับ -41°ซ

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

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

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การใช้วิธีออสโมซิสเพื่อลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนการแช่เยือกแข็ง โดยแช่ชิ้นเงาะในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และ มอลติทอล ทำให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากชิ้นเงาะมีอัตราเร็วที่ใกล้เคียงกัน ปริมาณน้ำที่สูญเสียเกิดขึ้นเร็วในช่วง 1 – 2 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนปริมาณของแข็งที่ได้รับในชิ้นเงาะที่แช่ในสารละลายแต่ละชนิด มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการออสโมซิสเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มคงที่ ทั้งนี้ชนิดของน้ำตาลที่ใช้ไม่มีผลต่อปริมาณน้ำที่สูญเสีย และปริมาณของแข็งที่ได้รับในชิ้นเงาะ

2. การแช่ตัวอย่างเงาะในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างกัน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ไม่มีผลทำให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ลดลง ในขณะที่ปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลายน้ำตาลแต่ละชนิดมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม ส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้มีค่าเพิ่มขึ้นในตัวอย่างที่ผ่านการแช่สารละลาย โดยชนิดของน้ำตาลไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าว สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ของตัวอย่างที่ผ่าน และไม่ผ่านการออโมซิสมีค่าใกล้เคียงกัน

3. คุณภาพด้านสี และเนื้อสัมผัสที่วัดด้วยเครื่องมือ ตัวอย่างทั้งหมดมีค่าสี (L*a*b*) แตกต่างกันในบางค่า แต่มีค่าเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกัน คุณภาพที่วัดด้วยเครื่องมือกลับให้ผลที่แตกต่างกับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส คือ ผู้ทดสอบไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสี แต่บอกความแตกต่างของเนื้อสัมผัสระหว่างตัวอย่างได้ ระยะเวลาในการเก็บรักษาที่นานขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมี และกายภาพของตัวอย่างแต่ละชนิด

4. ตัวอย่างเงาะที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็งได้รับคะแนนความชอบด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับมากที่สุด ส่วนตัวอย่างที่แช่ในสารละลายเทรฮาโลสได้รับคะแนนการยอมรับรองลงมา แต่ตัวอย่างที่ผ่านการแช่ในสารละลายมอลติทอลได้รับคะแนนการยอมรับใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส

5. การแช่ชิ้นเงาะในสารละลายน้ำตาลทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T'_g) ของตัวอย่างเพิ่มขึ้น($p \leq 0.05$) โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายน้ำตาลที่ใช้ ตัวอย่างเงาะมีค่า T'_g เพิ่มมากที่สุดเมื่อผ่านการแช่ในสารละลายเทรฮาโลสซึ่งมีค่า T'_g สูงที่สุด ส่วนตัวอย่างที่แช่สารละลายซูโครสและมอลติทอลมีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ อุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่เพิ่มขึ้นจากการแช่ตัวอย่างในสารละลายต่างชนิด ไม่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพทางเคมี และกายภาพของเงาะแช่เยือกแข็งอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ค่า T'_g เพียงอย่างเดียวในการทำนายคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็ง

ข้อเสนอแนะ

1. การตรวจสอบคุณภาพโดยการทดสอบทางประสาทสัมผัส ควรใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน เพื่อให้มีเกณฑ์ในการตัดสินใจด้านความชอบที่ใกล้เคียงกัน และน่าเชื่อถือ

2. ในการปรับปรุงคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็งเพื่อให้มีเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น อาจใช้สารช่วยเพิ่มความแน่นเนื้อของผลไม้ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ เติมลงในสารละลายที่ใช้ในการออสโมซิส

3. การปรับปรุงคุณภาพเงาะแช่เยือกแข็งสามารถเลือกใช้น้ำตาลซูโครสเป็นสารละลายที่ใช้ในการออสโมซิส เพราะนอกจากให้ผลดีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์แล้ว น้ำตาลซูโครสสามารถหาซื้อได้ง่าย และมีราคาไม่แพง

4. งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็ง เช่น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลล์ที่ผ่านการออสโมซิสโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งจะทำให้เกิดความเข้าใจถึงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสได้ดีขึ้น และการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการผลิต เช่น การหาระดับความเข้มข้นของสารละลาย และระยะเวลาที่เหมาะสมในการออสโมซิส หรือการนำสารละลายที่ใช้ในการออสโมซิส กลับมาใช้ใหม่ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ และลดต้นทุนในการผลิต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2550. **เงาะ.** แหล่งที่มา: http://www.doa.go.th/pl_data/02_LOCAL/oard7/rambutant/main.html, 23 มกราคม 2550.

กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2548. **สถานการณ์ทั่วไปของเงาะ**. แหล่งที่มา: http://www.doae.go.th/plant/rambutan.htm, 30 พฤศจิกายน 2548.

กรมส่งเสริมการส่งออก กระทรวงพาณิชย์. 2549. **การส่งออกสินค้าสำคัญของไทย ปี 2544-2548**. แหล่งที่มา: http://www.ops2.moc.go.th/meeting/bb.xls, 1 กุมภาพันธ์ 2549.

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

กฤษณา ชุติมา. 2531. **หลักเคมีทั่วไป เล่ม 1**. พิมพ์ครั้งที่ 10. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

จริงแท้ ศิริพานิช. 2546. **สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้**. พิมพ์ครั้งที่ 5. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พีรศิษฐ์ สมแก้ว. 2549. **ไม้ผลกับผลกระทบจากสภาพอากาศ**. ทิศทางเกษตร. หนังสือพิมพ์เดลินิวส์, 13 เมษายน 2549.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2548. **เงาะและเงาะบรรจุภาชนะอัดลม: ปริมาณและมูลค่าการส่งออกรายเดือน ปี 2542-2548**. แหล่งที่มา : http://www.oae.go.th/statistic/export/1301RA.xls , 30 พฤศจิกายน 2548.

องค์การตลาดเพื่อเกษตรกร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2550. **เงาะ (Rambutan).** แหล่งที่มา: http://www.mof.or.th/fruit-ngaw.htm, 23 มกราคม 2550.

Anonymous. 2006. **Water activity of sucrose and sodium chloride solutions**. Available Source: http://www.bccdc.org/downloads/pdf/fps/ reports/Water_Activity_of_Sucrose% 20and_NaCl_Solutions.pdf, December 23, 2006.

Arthey, D. and P.R. Ashurst. 1996. **Fruit Processing**. Black Academic and Professional, London.

Association of Official Analystical Chemists (AOAC). 1995. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 16th ed. Gaithersburg, Maryland.

Barbosa-Cánovas, G.V. and H. Vega-Mercado. 1996. **Dehydration of Foods.** Chapman & Hall, New York.

Belitz, H.D. and W. Grosch. 1999. **Food Chemistry**. 2nd ed. Springer, Germany.

Blond, G. and M.L. Meste. 2004. Principle of frozen storage, pp. 25-53. *In* Y.H. Hui, P. Cornillon., I.G. Legaretta, M.H. Lim., K.D. Murrell and W.K. Nip, eds. **Handbook of Frozen Foods.** Marcel Dekker, Inc., New York.

Bolin, H.R. and C.C. Huxsoll. 1993. Partial drying cut pears to improve freeze/thaw texture. **J. Food Sci.** 58: 357-360.

Cargill. 2006. **Trehalose.** Functional benefits. Available Source: http://www.cargill sweetness.com/index.php?id=1273, December 23, 2006.

Chanes, J.W., D. Bermudez, A.V. Fragoso, H. Mujica-Paz and S.M. Alzamora. 2004. Principle of frozen storage, pp. 13-24. *In* Y.H. Hui, P. Cornillon, I.G. Legaretta, M.H. Lim, K.D. Murrell and W.K. Nip, eds. **Handbook of Frozen Foods**. Marcel Dekker,Inc., New York.

Chang, L., N. Milton, D. Rigsbee, D.S. Mishra, X. Tang, L.C. Thomas and M.J. Pikal. 2006. Using modulated DSC to investigate the origin of multiple thermal transitons in frozen 10% sucrose solutions. **Thermochim. Acta.** 444: 141-147.

Contreras, C., M.E. Martin, N. Martinez-Navarrete and A. Chiralt. 2007. Influence of osmotic pre-treatment and microwave application on properties of air dried strawberry related to structural changes. **Eur Food Res Technol**. 224: 499-504.

Dermesonlouoglou, E.K. and P.S. Taoukis. 2006. Osmodehydrofreezing of sensitive fruit and vegetable: effect on quality characteristics and shelf life. **IUFoST.** doi: 10.1051/IUFoST: 20060910.

Dermesonlouoglou, E.K., M.C. Giannakourou and P. Taoukis. 2007. Stability of dehydrofrozen tomatoes pretreated with alternative osmotic solutes. **J. Food Eng.** 78: 272-280.

Ecogreen. 2006. **Sugar Alcohols**. Available Source: www.ecogreenoleo.com/ Sugar_Alcohols.pdf, December 23, 2006.

Edwards, M. 1995. Change in cell structure, p. 213. *In* S.T. Beckett, ed. **Physico-Chemical Aspects of Food Processing.** Chapman & Hall, London.

Eridex. 2006. **Erythritol. Physical and chemical properties.** Available Source: http://www.eridex.com/html/physical.html, December 22, 2006.

Fellows, P.J. 1988. **Food Processing Technology: Principles and Practice.** Ellis Horwood Limited, New York.

Fennema, O.R. 1975. Water and ice, pp. 13-39. *In* O.R. Fennema, ed. **Principles of Food Science Part I: Food Chemistry.** Marcel Dekker, Inc., 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.

Fennema, O.R. 1981. Water activity at subfreezing temperatures. *In* L.B. Rockland and G.F. Stewart, eds. Water Activity: Influences on Food Quality. Academic Press, Inc., New York.

Fito, P., A. Chiralt, J.M. Barat, W.E.L. Spiess and D. Behsnilian. 2001. **Osmotic Dehydration and Vacuum Impregnation.** Technomic, Inc. Lancaster.

Forni, E., A. Sormani, S. Scalise and D. Torreggiani. 1997. The influence of sugar composition on the colour stability of osmodehydrofrozen intermediate moisture apricots. **Food Res. Int.** 30(2): 87-94.

Giannakourou, M.C. and P.S. Taoukis. 2003. Stability of dehydrofrozen green peas pretreated with nonconventional osmotic agents. **J. Food Sci.** 68: 2002-2010.

Goff , H.D. and M.E. Sahagian. 1996. Glass transitions in aqueous carbohydrate solutions and their relevance to frozen food stability. **Thermochim. Acta.** 280: 449-464.

Hagiwara, T., J. Mao, T. Suzuki and R. Takai. 2005. Ice recrystallization in sucrose solution stored in a temperature range of -21^{o}C to -50^{o}C. **Food Sci. Technol. Res.** 11: 407-411.

Higashiyama, T. 2002. Novel functions and applications of trehalose. **Pure Appl. Chem.** 74 : 1262-1269.

Hodge, J.E. and Elizabeth M. Osman. 1975. Carbohydrates, pp. 41-138. *In* O.R. Fennema, ed. **Principles of Food Science Part I: Food Chemistry.** Marcel Dekker, Inc., New York.

Huxsoll, C.C. 1982. Reducing the refrigeration load by partial concentration of foods prior to freezing. **Food Technol.** 5: 98-102.

Inoue, C. and T. Suzuki, 2006. Enthalpy relaxation of freeze concentration sucrose-water glass. **Cryobiology**. 52: 83-89.

Izzard, M.J., S. Ablett and P.J. Lillford. 1991. Calorimetric study of the glass transition occurring in the sucrose solution, pp. 288-300. *In* E. Dickinson, ed. **Food Polymers, Gel and Colloids.** The Royal Society of Chemistry, Science Park, Cambridge.

Kato, K. and A.H. Moskowitz. 2001. Maltitol, pp. 283-295. *In* L.O.B. Nabors, ed. **Alternative Sweeteners.** 3rd ed. Marcel Dekker, Inc., New York.

Lazar, M.E. 1968. Dehydrofreezing of fruits and vegetables, pp.347-375. *In* D.K. Tressler, W.B. Van Arsdel and M.J. Copley, eds. **The Freezing Preservation of Foods,** vol. 3. AVI, Westport.

Lazarides, H.N. 2001. Reasons and possibilities to control solids uptake during osmotic treatment of fruits and vegetables, pp. 33-42. *In* P. Fito, A. Chiralt, J.M. Barat, W.E.L. Spiess and D. Behsnilian, eds. **Osmotic Dehydration & Vacuum Impregnation: Applications in Food Industries.** Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster.

Lazarides, H.N. and N.E. Mavroudis. 1995. Freeze /thaw on mass transfer rate during osmotic dehydration. **J. Food Sci.** 60: 826-828, 857.

Li, B. and D.W. Sun. 2002. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods - A review. **J. Food Eng.** 54: 175-182.

Lim, M., H. Wu, M. Breckell and J. Brich. 2006. Influence of the glass transition and storage temperature of frozen peas on the loss of quality attributes. **Int. J. Food Sci. Technol**. 41: 507-512.

Ling, H.I., J. Brich and M. Lim. 2005. The glass transition approach to determination of drying protocols for color stability in dehydrated pear slices. **Int. J. Food Sci. Technol.** 40: 921-927.

Marani, C.M., M.E. Agnelli and R.H. Mascheroni. 2001. Quality of osmo-frozen products, pp. 187-196. **IIF-IIR Commission C2.** Bristol.

Monsalve, A., G.V. Barbosa-Canovas and R.P. Cavalieri. 1993. Mass transfer and textural changes during processing of apples by combined methods. **J. Food Sci.** 58: 1118-1124.

Osako, K., M.A. Hossain, K. Kuwahara and Y. Nozaki. 2005. Effect of trehalose on the gel-forming ability, state of water and myofibril denaturation of horse mackerel *Trachurus japonicus* surimi during frozen storage. **Fish. Sci.** 71: 367-373.

Panagiotou, N.M., V.T. Karathanos and Z.B. Maroulis. 1999. Effect of osmotic agent on osmotic dehydration of fruits. **Dry Technol.** 17: 175-189.

Pham, Q.T. and R.F. Mawson. 1997. Moisture migration and ice recrystallization in frozen foods, pp. 67-91. *In* M.C. Erickson and Y.C. Hung, eds. **Quality in Frozen Food.** Chapman&Hall, New York.

Pyne, A., R. Surana and R. Suryanarayanan. 2003. Enthalpic relaxation in frozen aqueous trehalose solutions. **Thermochim. Acta.** 405: 225-234.

Rahman, M.S. 1995. **Food Properties Handbook.** CRC Press, Inc., Boca Raton.

Rahman, M.S. 1999. Food preservation by freezing, pp. 259-284. *In* M.S. Rahman, ed. **Handbook of Food Preservation.** Marcel Dekker, Inc., New York.

Rahman, M.S. 2004. State diagram of date flesh using differential scanning calorimetry (DSC). **Int. J. Food Prop.** 7: 407-428.

Rahman, M.S. 2006. State diagram of food : Its potential use in food processing and product stability. **Trends Food Sci. Tech.** 17: 129-141.

Rahman, M.S. and C.O. Perera. 1999. Drying and food preservation, pp. 173-216. *In* M.S. Rahman, ed. **Handbook of Food Preservation.** Marcel Dekker, Inc., New York.

Raoult-Wack, A. L., G. Rios and S. Guilbert. 1995. Sucrose and osmotic dehydration, pp. 279-290. *In* M. Mathlouthi and P. Reiser, eds. **Sucrose Properties and Applications.** Blackie Academic & Profrssional, London.

Richards, A.B. and L.B. Dexter. 2001. Trehalose, pp. 423-461. *In* L.O.B. Nabors, ed. **Alternative Sweeteners.** 3rd ed. Marcel Dekker, Inc., New York.

Robbers, M., R.P. Singh and L.M. Cunha. 1997. Osmotic-convective dehydrofreezing process for drying kiwi fruit. **J. Food Sci.** 62: 1039-1042, 1047.

Ronda, F., M. Gomez , C.A. Blanco and P.A. Caballero. 2005. Effects of polyols and nondigestible oligosaccharides on the quality of sugar-free sponge cakes. **Food Chemistry.** 90: 549–555.

Roos, Y. 1995. **Phase Transitions in Foods.** Academic Press, Inc., London.

Roos, Y. and M. Karel. 1991a. Phase transitions of amorphous sucrose and frozen sucrose solutions. **J. Food Sci.** 56: 266-267.

Roos, Y. and M. Karel. 1991b. Amorphous state and delayed ice formation in sucrose solutions. **Int. J. Food Sci. Technol.** 26: 553-556.

Roos, Y.H., M. Karel and J.L. Kokini. 1996. Glass transitions in low moisture and frozen foods: Effects on shelf life and quality. **Food Technol.** 50: 95-108.

Schiweck, H. and S.C. Ziesenitz. 1996. Physiological properties of polyols in comparison with easily metabolisable saccharides. *In* T.H. Grenby, ed. **Advances in Sweeteners.** Chapman & Hall, London.

Skrede, G. 1996. Fruits, pp. 183-245. *In* L.E. Jeremiah, ed. **Freezing Effects on Food Quality.** Marcel Dekker, Inc., New York.

Slade, L. and H. Levine. 1996. Mono- and disaccharides: Selected physicochemical and functional aspects, pp. 41-157. *In* A.C. Eliasson, ed. **Carbohydrates in Food.** Marcel Dekker, Inc. New York.

Talens, P., N. Martinez-Navarrete, P. Fito and A. Chiralt. 2001. Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit. **Innovat. Food Sci. Emerg. Tech**. 3: 191-199.

Torreggiani, D. and G. Bertolo. 2001. Osmotic pre-treatments in fruit processing: Chemical, physical and structural effects. **J. Food Eng.** 49: 247-253.

Woodbury, G. 1997. **Physical Chemistry.** Brooks/Cole Publishing Company, Washington.

Zee, F.T. 1998. **Rambutan.** Available Source: http://www.hort.purdue.edu/newcrop/cropfactsheets/Rambutan.html#Scientific%20Names, September 30, 2007.

Zhou, A., S. Benjakul, K. Pan, J. Gong and X. Liu. 2006. Cryoprotective effects of trehalose and sodium lactate on tilapia (*Sarotherodon nilotica*) surimi during frozen storage. **Food Chemistry.** 96: 96–103.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี และกายภาพ

วิธีวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี และกายภาพ

1. ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (AOAC, 1995)

วัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w) ด้วยเครื่อง Thermoconstanter (Novasia, Model RTD-33) โดยนำตัวอย่างที่เตรียมใส่ในถ้วยพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม. สูง 1 ซม. บรรจุตัวอย่างครึ่งหนึ่งของความสูงของถ้วยพลาสติก และวางถ้วยตัวอย่างใน chamber ของเครื่องวัด ทิ้งไว้จนสภาพภายใน chamber มีความสมดุลที่อุณหภูมิ 25°ซ อ่านค่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (ERH; Equilibrium relative humidity) ที่แสดงบนเครื่องแล้วเปลี่ยนเป็นค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ตามสมการ

$$a_w = \text{ERH (\%)} / 100$$

2. ปริมาณความชื้น (AOAC, 1995)

ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ในภาชนะอะลูมิเนียมมีฝาปิดที่ผ่านการอบจนน้ำหนักคงที่ นำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 ± 5°ซ จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ วัดค่า 3 ซ้ำ คำนวณหาปริมาณความชื้นจากสูตร

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

3. ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (AOAC, 1995)

เตรียมตัวอย่าง โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วประมาณ 30 กรัม ปั่นผสมกับน้ำกลั่น 100 มล. ด้วยเครื่องปั่นให้ละเอียด เทใส่บีกเกอร์ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°ซ นาน 30 นาที จากนั้นทำให้เย็น และนำมาปรับปริมาตรเป็น 250 มล. ด้วยน้ำกลั่น กรองส่วนผสมที่ได้ด้วยผ้าขาวบาง

วิธีการไทเทรต โดยปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้ 25 มล. เติมน้ำกลั่น 25 มล. หยดอินดิเคเตอร์ฟีนอฟทาลีน 3 หยด ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นประมาณ 0.1 โมลาร์

จนกระทั่งถึงจุดยุติ สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู คำนวณปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้เป็นร้อยละของกรดซิตริกตามสมการ

$$\text{ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (ร้อยละ)} = \frac{(\text{ความเข้มข้นNaOH} \times \text{ปริมาณ NaOH} \times 0.064)}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100$$

ภาคผนวก ข

แบบประเมินผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

แบบประเมินผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

ตัวอย่าง เงาะแช่เยือกแข็ง วันที่_____

ชื่อผู้ชิม_____

คำแนะนำ ชิมตัวอย่าง แล้วให้คะแนนตามความชอบของท่าน โดยใช้คะแนน 1-9 และกลั้วปากด้วยน้ำระหว่างเปลี่ยนตัวอย่าง

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

รหัส	ลักษณะปรากฏ (รูปร่าง)	สี	เนื้อสัมผัส	กลิ่นรส	รสชาติ	การยอมรับ

ข้อเสนอแนะ _____

_____

_____

ภาคผนวก ค

ข้อมูลประกอบผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ค1 ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากชิ้นเจาะเมื่อแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ความเข้มข้นร้อยละ 50 ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน

ระยะเวลาออสโมซิส (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (กรัม/กรัมของน้ำหนักแห้งเริ่มต้น)		
	ซูโครส	เทรฮาโลส	มอลติทอล
0^{ns}	0.00 ± 0.02^{C}	0.00 ± 0.00^{E}	0.01 ± 0.01^{D}
0.5^{ns}	0.89 ± 0.06^{B}	0.85 ± 0.04^{D}	0.89 ± 0.06^{C}
1^{ns}	1.04 ± 0.07^{B}	1.01 ± 0.04^{CD}	1.00 ± 0.11^{C}
2	1.32 ± 0.07^{aA}	1.15 ± 0.11^{bBC}	1.16 ± 0.07^{bB}
3^{ns}	1.37 ± 0.05^{A}	1.30 ± 0.03^{AB}	1.31 ± 0.00^{A}
4^{ns}	1.39 ± 0.17^{A}	1.31 ± 0.00^{AB}	1.34 ± 0.08^{A}
5^{ns}	1.51 ± 0.11^{A}	1.35 ± 0.09^{A}	1.36 ± 0.02^{A}

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

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

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

ตารางผนวกที่ ค2 ปริมาณของแข็งที่ได้รับในชิ้นเงาะ เมื่อแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เทรฮาโลส และมอลติทอล ความเข้มข้นร้อยละ 50 ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน

ระยะเวลาออสโมซิส (ชั่วโมง)	ปริมาณของแข็งที่ได้รับ (กรัม/กรัมของน้ำหนักแห้งเริ่มต้น)		
	ซูโครส	เทรฮาโลส	มอลติทอล
0 ^{ns}	0.00 ± 0.02 ^{D}	0.00 ± 0.00 ^{C}	0.01 ± 0.01 ^{C}
0.5 ^{ns}	0.06 ± 0.00 ^{CD}	0.04 ± 0.03 ^{C}	0.03 ± 0.01 ^{C}
1 ^{ns}	0.11 ± 0.05 ^{C}	0.09 ± 0.06 ^{C}	0.08 ± 0.05 ^{C}
2 ^{ns}	0.22 ± 0.00 ^{B}	0.22 ± 0.05 ^{B}	0.20 ± 0.01 ^{B}
3 ^{ns}	0.29 ± 0.05 ^{B}	0.34 ± 0.00 ^{A}	0.26 ± 0.07 ^{AB}
4 ^{ns}	0.39 ± 0.06 ^{A}	0.32 ± 0.02 ^{A}	0.31 ± 0.06 ^{A}
5 ^{ns}	0.43 ± 0.02 ^{A}	0.40 ± 0.00 ^{A}	0.36 ± 0.01 ^{A}

หมายเหตุ $^{A-D}$ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

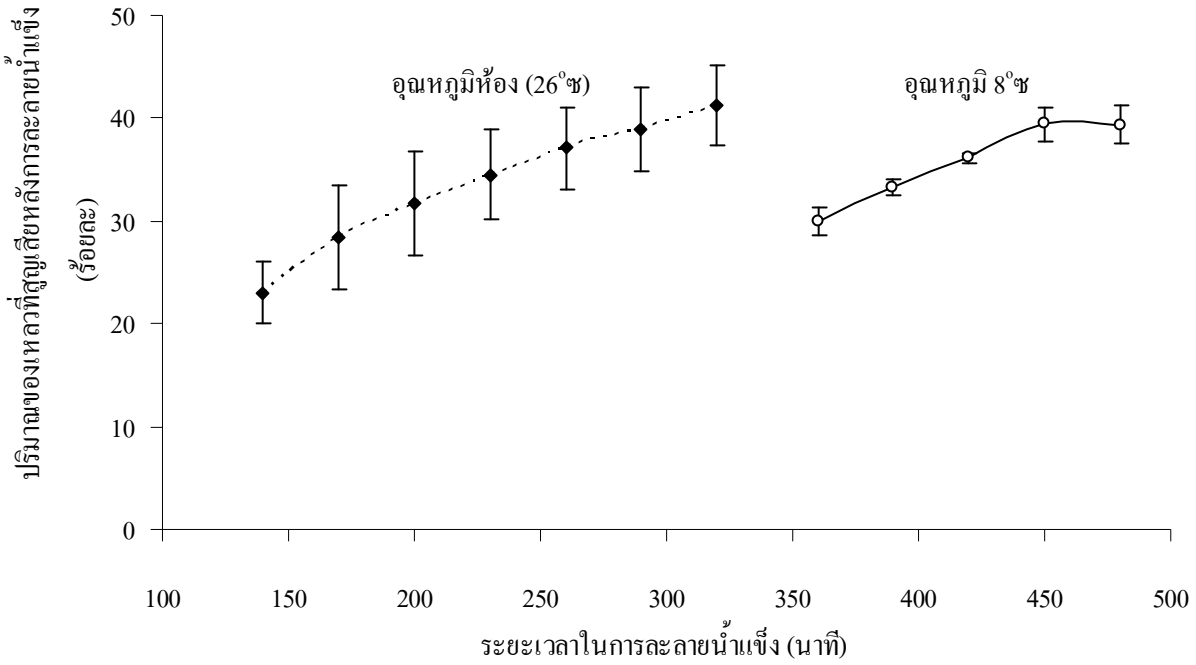
^{ns} ค่าเฉลี่ยในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ค3 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างเงาะแช่เยือกแข็ง ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (°บริกซ์)

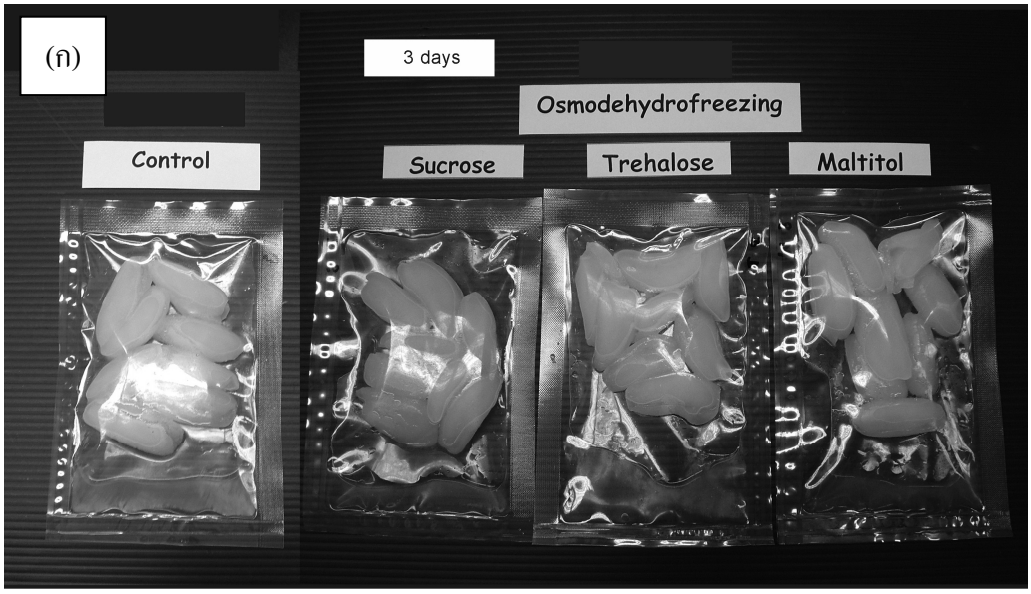
คุณลักษณะ	ระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)	ไม่แช่น้ำตาล	ซูโครส ^{NS}	เทรฮาโลส ^{NS}	มอลติทอล ^{NS}
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	3	79.50 ± 0.05 ^{aA}	72.63 ± 1.01 ^{b}	72.10 ± 0.21 ^{b}	71.49 ± 1.19 ^{b}
	60	79.55 ± 0.45 ^{aA}	71.62 ± 0.08 ^{b}	73.25 ± 0.11 ^{b}	72.80 ± 2.09 ^{b}
	120	79.56 ± 0.57 ^{aA}	72.19 ± 0.29 ^{b}	72.35 ± 0.87 ^{b}	72.23 ± 1.41 ^{b}
ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็ง (ร้อยละ)	3	3.54 ± 0.67 ^{aA}	1.48 ± 0.11 ^{b}	1.71 ± 0.07 ^{b}	1.73 ± 0.04 ^{b}
	60	3.01 ± 0.12 ^{aA}	1.53 ± 0.10 ^{b}	1.52 ± 0.30 ^{b}	1.46 ± 0.10 ^{b}
	120	3.09 ± 0.93 ^{aA}	1.43 ± 0.11 ^{b}	1.76 ± 0.14 ^{b}	1.65 ± 0.06 ^{b}
ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (°บริกซ์)	3	19.20 ± 0.14 ^{bB}	26.50 ± 0.14 ^{a}	26.20 ± 0.71 ^{a}	25.90 ± 1.13 ^{a}
	60	20.00 ± 0.28 ^{bA}	26.80 ± 0.42 ^{a}	26.45 ± 0.35 ^{a}	26.55 ± 1.34 ^{a}
	120	19.98 ± 0.04 ^{bA}	26.25 ± 0.49 ^{a}	25.80 ± 0.42 ^{a}	26.10 ± 0.99 ^{a}

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

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



ภาพผนวกที่ ค1 ปริมาณของเหลวที่สูญเสียหลังการละลายน้ำแข็งของชิ้นเงาะ เมื่อละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่างกัน โดยใช้วิธีดัดแปลงจากวิธีของ Marani *et al.* (2001)



ภาพผนวกที่ ค2 ลักษณะเจาะแช่เยือกแข็งที่ไม่ผ่าน และผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ หลังจากการละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 8°ซ นาน 5 ชั่วโมง โดยตัวอย่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°ซ เป็นเวลา 3 (ก), 60 (ข) และ 120 (ค) วัน

ภาพผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวงามจิตร โล่วิทูร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 1 มกราคม 2521
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	เจ้าหน้าที่วิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนสนับสนุนการศึกษา จากกองทุนพัฒนา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ปีการศึกษา 2548-2549)