บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

ผลไม้

ผลไม้สดประกอบด้วยส่วนของอวัยวะสืบพันธุ์ คือ รังไข่และส่วนอื่น ๆ ของดอก ในแง่ความรู้สึกของผู้บริโภคผลไม้ควรมีรสชาติและกลิ่นหอม อาจหวานโดยธรรมชาติ หรือทำให้หวานก่อนบริโภค รสชาติที่ได้รับเป็นผลเนื่องจากความหวาน (น้ำตาล) และความเปรี้ยว (กรด) ผสมกับรสฝาดเล็กน้อย ผลไม้เกือบทุกชนิดมีของเหลวในเนื้อเยื่อเป็นกรด คือ มี pH ต่ำกว่า 4.5 ยกเว้นผลไม้บางชนิดเมื่อสุกแล้วมี pH มากกว่า 4.5 เช่น มะละกอ มะม่วง กล้วย เป็นต้น

ผลไม้สดหลังการเก็บเกี่ยวอาจมีการสูญเสียเกิดขึ้นได้ การสูญเสียที่สำคัญและพบอยู่เสมอ คือ การสูญเสียน้ำหนัก การเน่าเสีย และการเกิดบาดแผล การสูญเสียเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับชนิด และลักษณะโครงสร้างของผลิตผลแต่ละชนิด

1. การเสื่อมเสียของผลไม้จากเชื้อจุลินทรีย์ (8)

โดยทั่วไปผลไม้จะมีเปลือกหรือผิวเป็นตัวป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย แต่ในระหว่างการเจริญเติบโต การเก็บเกี่ยว และการขนส่งผลไม้มักเกิดการเสียหายจากแมลงกัดกิน การกระทบกระแทกหรือแรงกระทำทางกลต่าง ๆ ทำให้ผิวเสียหายไม่สามารถป้องกันการแพร่ของเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่เนื้อผลไม้ ผลไม้จึงเกิดการเน่าเสียได้

เชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนเข้าสู่ผลไม้อาจมาจากแหล่งต่าง ๆ (9) เช่น จากอากาศ แมลง สัตว์ป่า สัตว์เลี้ยงในฟาร์ม มนุษย์ ดิน น้ำ นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของผลไม้ก็เหมาะแก่การเจริญของเชื้อรา ยีสต์ และแบคทีเรีย เชื้อราที่ทำให้เกิดความเสียหายในผลไม้ เช่น Cladosporium, Alternaria, Penicillium, Diplodia เป็นต้น ยีสต์ที่ทำให้เกิดความเสียหายในผลไม้ เช่น Zygosaccharomyces, Saccharomyces, Hanseniaspora, Torulopsis, Torula เป็นต้น ส่วนแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคหรือความเสียหายในผลไม้ เช่น Bacillus, Staphylococcus, Enterobacter, Escherichia และ Lactobacillus

ดังนั้นจึงต้องล้างทำความสะอาดผลไม้ เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและเชื้อจุลินทรีย์ก่อนแช่แข็ง ส่วนการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ระหว่างการแช่แข็งขึ้นกับชนิดของเชื้อ และระยะการเจริญของเชื้อ สปอร์ของเชื้อราสามารถทนต่อการแช่แข็งได้ดีกว่าเซล นอกจากนี้วิธีการแช่แข็งที่ใช้ก็มีผลต่อปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ โดยการแช่แข็งอย่างเร็วจะมีผลดีทั้งในด้านการควบคุมเชื้อจุลินทรีย์และคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2. การเสื่อมเสียของผลไม้จากปฏิกิริยาชีวเคมี (9)

คุณภาพของผลไม้แช่แข็งขึ้นกับพันธุ์ สภาวะการปลูก และความแก่ของผลไม้ การเสื่อมเสียของผลไม้จากปฏิกิริยาชีวเคมีเกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ เช่น o-diphenol oxidase (polyphenol oxidase) ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบ phenolic ทำให้เกิดสีน้ำตาลในผลไม้ โดยทั่วไปจะไม่ใช้ความร้อนในการควบคุมปฏิกิริยาของ polyphenol oxidase กับผลไม้ เพราะความร้อนจะทำให้กลิ่นรสของผลไม้เสียไป ดังนั้นการเติมสารเคมีบางชนิดจึงเป็นวิธีที่สามารถควบคุมปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยสารเคมีเหล่านี้จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์หรือกำจัดออกซิเจนออกไป

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และกรดบางชนิด เช่น กรดซิตริก กรดมาลิก เป็นสารเคมีที่ใช้ควบคุมปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลอันเนื่องจากเอนไซม์ โดยซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ในอาหาร ในขณะที่กรดทำให้ pH ลดลงจนถึงจุดที่ปฏิกิริยาของเอนไซม์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้

กรดแอสคอร์บิคหรือวิตามินซี ใช้เป็นสารควบคุมการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้ดี และยังเป็นสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ กรดแอสคอร์บิกจะรักษาสารประกอบ phenolic ให้อยู่ในรูปรีดิวซ์และอยู่ในสภาพที่ไม่มีสี การใช้กรดแอสคอร์บิกเข้มข้น 0.3% ผสมในน้ำเชื่อมในการทำผลไม้กระป๋อง จะช่วยยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้อย่างสมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติมักใช้ความเข้มข้นประมาณ 0.1%

ในการผลิตผลไม้แช่แข็งอาจมีการเติมน้ำตาลหรือน้ำเชื่อมลงไปในผลไม้ก่อนแช่แข็ง เพื่อเป็นตัวให้ความหวาน ช่วยรักษากลิ่นรส และช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ โดยทำหน้าที่เป็นตัวกันออกซิเจนเข้าไปในเนื้อผลไม้

ผลไม้ที่ต้องผ่านการตัดแต่ง โดยเฉพาะผลไม้ที่มีสีอ่อน จำเป็นต้องป้องกันการเกิดสีน้ำตาลอันเนื่องจากเอนไซม์ในช่วงระหว่างการตัดแต่งและการแช่แข็ง การแช่ผลไม้ในสารละลายเกลือเข้มข้น 1-3% จะสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ โดยคลอไรด์ไอออนจะไปยับยั้ง polyphenol oxidase

ผลไม้ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เงาะ

เงาะมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Nephelium lappaceum L.* เงาะที่เป็นที่นิยมของผู้บริโภค ควรมีลักษณะดังนี้คือ มีรสดี ไม่ติดเมล็ด ขนาดผลใหญ่ เนื้อหนา เมล็ดเล็ก ซึ่งเงาะที่มีลักษณะดังกล่าวได้แก่พันธุ์ต่อไปนี้คือ (10)

1.1 เงาะพันธุ์โรงเรียน หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เงาะนาสาร มีถิ่นกำเนิดอยู่ที่อำเภอนาสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี เป็นเงาะที่มีคุณภาพดี สีของผลสีแดงสด ปลายขนมีสีเขียว เป็นพันธุ์ที่ถูกรสนิยมของผู้บริโภคและตลาดต้องการกันมาก ปลูกกันมากในจังหวัดสุราษฎร์ธานี และบางจังหวัดในภาคใต้

1.2 เงาะพันธุ์สีชมพู เป็นเงาะที่มีผลเมื่อสุกเป็นสีชมพูแดง ขนยาว ปลูกกันมากในจังหวัดจันทบุรี และระยอง

ในงานวิจัยเลือกใช้เงาะพันธุ์โรงเรียน เพราะเป็นที่นิยมของผู้บริโภค หาซื้อได้ง่าย โดยผลผลิตจะออกสู่ตลาดในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกันยายน

คุณค่าทางอาหารของเงาะในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม (11)

พลังงาน	63 กิโลแคลอรี่	ฟอสฟอรัส	6.0 มิลลิกรัม
ความชื้น	82.9 %	เหล็ก	1.8 มิลลิกรัม
โปรตีน	0.9 กรัม	วิตามินเอ	4.0 ไอ.ยู.
ไขมัน	0.1 กรัม	วิตามินบีหนึ่ง	0.04 มิลลิกรัม
คาร์โบไฮเดรต	14.5 กรัม	วิตามินบีสอง	0.05 มิลลิกรัม
เส้นใย	1.1 กรัม	ไนอะซิน	0.6 มิลลิกรัม
แคลเซียม	3.0 มิลลิกรัม	วิตามินซี	31.0 มิลลิกรัม

2. ลิ้นจี่

ลิ้นจี่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Litchi chinensis Sonn.* สกุล sapindaceae เป็นไม้ในสกุลเดียวกับเงาะและลำไย ลิ้นจี่เป็นผลไม้ที่กำลังได้รับความนิยมเพิ่มสูงขึ้น ชาวจีนและชาวยุโรปจะถือว่าลิ้นจี่เป็นผลไม้พิเศษ เป็นของฝากที่ภูมิใจทั้งผู้ให้และเป็นเกียรติแก่ผู้รับ อาจเป็นเพราะว่ามีช่วงฤดูกาลที่ออกสู่ตลาดสั้น ติดผลค่อนข้างยาก มีราคาแพง และที่สำคัญคือมีรสชาติดี

มีสีของเปลือกน่ารับประทาน มีการปลูกมากในภาคเหนือ เช่น จังหวัดเชียงราย เชียงใหม่ ทางภาคกลางมีที่จังหวัดสมุทรสงคราม ขณะนี้การปลูกลิ้นจี่มีแนวโน้มที่จะขยายพื้นที่การปลูกเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพราะความต้องการของตลาดทั้งในและต่างประเทศมีมากขึ้น (12)

ลิ้นจี่ในประเทศไทยมีหลายพันธุ์ ทางภาคเหนือของไทย มีพันธุ์ที่น่าสนใจ 3 พันธุ์ คือ พันธุ์โฮงฮวย โอวเฮียะ และกิมเจ็ง ส่วนทางภาคกลางมีพันธุ์ที่นิยมมาก คือ พันธุ์ค่อมหรือหอมลำเจียก กะโหลกใบยาว สาแหรกทอง พันธุ์แห้ว เป็นต้น (13)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ลิ้นจี่พันธุ์โฮงฮวย ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีชาวสวนทางภาคเหนือปลูกกันมากที่สุด เพราะติดผลเกือบทุกปี (13)

ลิ้นจี่พันธุ์โฮงฮวย (13)

เป็นพันธุ์ที่เติบโตเร็ว ออกดอกออกผลง่าย ลำต้นมีสีน้ำตาลอมเทา และบิดเวียนซ้ายเป็นคลื่นยาว ๆ ช่วงข้อบนกิ่งห่าง ยอดอ่อนมีสีเขียวอมแดงจาง ๆ ทรงพุ่มรูปไข่ ต้นค่อนข้างสูง ผลออกเป็นช่อยาวดก ลักษณะผลกลมรีรูปไข่ ไหล่กว้าง หนามผลห่าง เมื่อแก่จัดหนามจะเป็นตุ่มสั้นกว่าตอนที่ยังไม่แก่ เปลือกบางสีแดงอมชมพู เนื้อหนาปานกลาง สีของเนื้อขาวขุ่น มีกลิ่นหอม รสหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย ผลผลิตออกในช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน

คุณค่าทางอาหารของลิ้นจี่ในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม (11)

พลังงาน	57 กิโลแคลอรี่	ฟอสฟอรัส	41.0 มิลลิกรัม
ความชื้น	85.2 %	เหล็ก	1.3 มิลลิกรัม
โปรตีน	0.9 กรัม	แคลเซียม	7.0 มิลลิกรัม
ไขมัน	0.1 กรัม	วิตามินบีหนึ่ง	0.11 มิลลิกรัม
คาร์โบไฮเดรต	13.1 กรัม	วิตามินบีสอง	0.04 มิลลลิกรัม
เส้นใย	0.1 กรัม	วิตามินซี	167.0 มิลลิกรัม
		ไนอะซิน	0.3 มิลลิกรัม

การรักษาสีแดงของเปลือกลิ้นจี่

การรักษาสภาพสดของลิ้นจี่ทำได้ยาก เนื่องจากการสูญเสียน้ำของเปลือกลิ้นจี่ ซึ่งมีผลต่อการสูญเสียสีแดงของเปลือกและทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้นที่เปลือกลิ้นจี่ ทำให้ลิ้นจี่มีอายุการขาย

สั้น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกลิ้นจี่ คาดว่าเกิดจากการสูญเสียน้ำออกจาก pericarp และปฏิกิริยาของ polyphenol oxidase(14) การใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส สามารถยับยั้งการทำงานของ polyphenol oxidase นอกจากนี้การขึ้นราก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลที่เปลือก (14)

รงควัตถุในเปลือกลิ้นจี่

รงควัตถุในเปลือกลิ้นจี่จะประกอบด้วย anthocyanin ทั้งในรูป precursor และ polymer (14) Wu (15) พบว่า สีชมพูที่เกิดขึ้นในลิ้นจี่บรรจุกระป๋องมีค่า R_f เดียวกันกับ cyanidin ซึ่งยืนยันได้ว่า condensed tannin จะถูก degrade ภายใต้ภาวะที่เป็นกรดและที่อุณหภูมิสูงได้ catechin และ leucoanthocyanin ซึ่ง leucoanthocyanin สามารถเปลี่ยนไปเป็น anthocyanin ได้

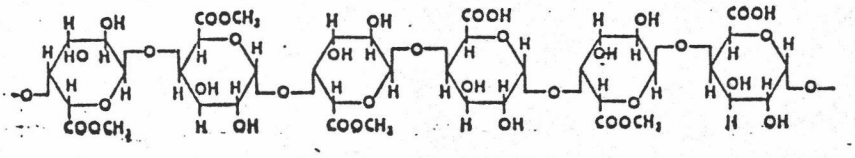
การยืดอายุการเก็บของลิ้นจี่ในภาวะแช่แข็ง

ปัญหาหลักของการยืดอายุการเก็บของลิ้นจี่ คือ การเปลี่ยนสีของเปลือกลิ้นจี่ โดยทั่วไปลิ้นจี่จะเก็บได้ไม่เกิน 3 วันที่อุณหภูมิห้อง ลิ้นจี่เป็นผลไม้ที่เหมาะสมสำหรับแช่แข็ง แต่จะเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกระหว่างแช่แข็งหรือหลังละลายน้ำแข็งแล้ว การให้ความร้อนในเวลาสั้น ๆ กับผลลิ้นจี่ก่อนแช่แข็ง จะยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลระหว่างแช่แข็งและระหว่างเก็บได้ แต่จะทำให้เปลือกแตกและสีซีด (14) การอบไอน้ำและตามด้วยการพ่นสารละลายกรดซิตริก 3% 2 ครั้ง หรือการลวกและจุ่มในสารละลายกรดซิตริก 5-10% และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2% จะรักษาสีของเปลือกลิ้นจี่ได้ดีในระหว่างแช่แข็ง เก็บ และหลังละลายน้ำแข็งนานถึง 3 ชั่วโมง (16) การแช่ลิ้นจี่ในสารละลายผสมระหว่างกรดซิตริก 10% กรดแอสคอร์บิค 1% และน้ำตาลทราย 10% ก่อนแช่แข็งและการเคลือบด้วยสารละลายนี้อีกครั้งหลังแช่แข็งแล้ว จะช่วยรักษาสีแดงของเปลือกลิ้นจี่ได้ดี (17)

ลักษณะทางคุณภาพของผลไม้แช่แข็ง (8)

1. คุณภาพทางลักษณะเนื้อสัมผัส

ผลไม้มีโมเลกุลเพคตินช่วยในด้านลักษณะเนื้อสัมผัส เพคตินประกอบด้วย หน่วยของ galacturonic acid ต่อกันด้วย α-1,4-glycosidic linkage และมีหมู่ carboxyl ที่ถูก esterify ดังรูปที่ 2.1 ปฏิกิริยา deesterification ของเพคตินโดย pectinesterase ที่มีอยู่ในผักและผลไม้จะทำให้ได้กรดเพคตินิคและเมทานอล กรดเพคตินิคสามารถเกิดเจลแคลเซียมเพคติเนตกับแคลเซียมในเนื้อเยื่อผลไม้ ทำให้ผลไม้แช่แข็งมีความแน่นเนื้อและความเหนียวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโมเลกุลเพคติน

ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่าการแช่แข็งเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการรักษาสี กลิ่น รสชาติ และคุณค่าทางอาหาร แต่ปัญหาที่สำคัญของผลไม้แช่แข็ง คือ การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัส ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้วิธีแช่แข็งที่มีอัตราการแช่แข็งเร็วและการเลือกพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับแช่แข็ง

2. สีและลักษณะปรากฏ

ผลไม้แช่แข็งจะมีสีและลักษณะปรากฏดี ก็ต่อเมื่อมีการเก็บเกี่ยว กระบวนการผลิต และมีเทคนิคการแช่แข็งอย่างดี ผลไม้ที่มีสีอ่อน เช่น peach apple และ apricot ภายหลังละลายน้ำแข็งแล้ว อาจเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ ซึ่งสามารถยับยั้งปฏิกิริยานี้ได้โดยใช้ความร้อน แต่การใช้ความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกลิ่นและรสชาติไปจากผลไม้สด ซึ่งจะไม่เป็นปัญหาสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านความร้อน เช่น พาย แยม และเยลลี่ แต่เป็นปัญหาสำหรับผลไม้ที่ใช้บริโภคสด โดยทั่วไปวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุดระหว่างแช่แข็งและละลายน้ำแข็ง คือ การแช่แข็งผลไม้ในน้ำเชื่อมที่มีกรดแอสคอร์บิคอยู่ด้วย ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปริมาณกรดแอสคอร์บิคที่ใช้ ปริมาณออกซิเจนในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท และอัตราส่วนของผลไม้ต่อน้ำเชื่อมซึ่งต้องเพียงพอสำหรับปิดชิ้นผลไม้และทำให้ในภาชนะบรรจุมี headspace น้อย เมื่อเปิดภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์จะสัมผัสกับอากาศ การรวมตัวของออกซิเจนกับ polyphenol oxidase จะทำให้สารประกอบ phenolic ถูกออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว ผลไม้จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ปริมาณกรดแอสคอร์บิคที่เติมในน้ำเชื่อมจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการควบคุมให้ชิ้นผลไม้มีสีเหมือนเดิมภายหลังละลายน้ำแข็ง เพราะกรดแอสคอร์บิคเป็น reducing agent ทำให้ o-quinone ถูกรีดิวซ์ไปเป็น o-diphenol ซึ่งเป็นรูปที่ไม่มีสี นอกจากนี้พันธุ์ของผลไม้ก็มีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลและปริมาณสีน้ำตาลที่เกิดขึ้น โดยพันธุ์ผลไม้ที่มี polyphenol oxidase หรือสารประกอบ phenolic น้อยจะเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าพันธุ์ที่มี polyphenol oxidaseหรือสารประกอบ phenolic อยู่มาก (8)

3. กลิ่นและรสชาติ

นอกจากสีและลักษณะปรากฏแล้ว กลิ่นและรสก็เป็นคุณภาพที่สำคัญในการบ่งบอกการยอมรับของผลิตภัณฑ์ เมื่อกล่าวถึงลักษณะทางคุณภาพของผลไม้สด ผู้บริโภคจะคิดถึงคุณภาพทางกลิ่นและรสเป็นอันดับแรก การแช่แข็งไม่ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่ต้องการ ในขณะที่การใช้ความร้อนในผลไม้กระป๋อง ผลไม้อบแห้ง จะให้กลิ่นรสซึ่งแตกต่างไปจากผลไม้สด ในการผลิตผลไม้แช่แข็งนั้นมีวัตถุประสงค์ที่จะทำให้ผลไม้มีกลิ่นรสเหมือนผลไม้สดมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นผลไม้สดจึงเป็นมาตรฐานสำหรับลักษณะทางคุณภาพด้านนี้ ความสุกของผลไม้และความล่าช้าในกระบวนการผลิตเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกลิ่นรสในผลไม้แช่แข็ง นอกจากนี้การเติมน้ำตาลหรือน้ำเชื่อม จะช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนสัมผัสกับผลไม้ ช่วยรักษาสี ลักษณะปรากฏ และกลิ่นรสของผลไม้ระหว่างแช่แข็งและเก็บผลิตภัณฑ์ (8)

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลไม้ระหว่างแช่แข็งและเก็บรักษาในภาวะแช่แข็ง

1. การเปลี่ยนแปลงลักษณะของผลิตภัณฑ์ขณะแช่แข็ง (18)

1.1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ขณะแช่แข็ง

1.1.1 การเกิดผลึกน้ำแข็ง

เมื่อลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ให้ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์จะเริ่มเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นที่จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจุดเยือกแข็งนี้จะขึ้นโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายที่มีอยู่ภายในผลิตภัณฑ์แต่ไม่ขึ้นกับปริมาณน้ำ เช่น ผลไม้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้ำสูงจะมีจุดเยือกแข็งอยู่ในช่วง -2 ถึง -3 องศาเซลเซียส ขณะที่เนื้อมีปริมาณน้ำต่ำกว่ามากจะมีจุดเยือกแข็งที่ -1 องศาเซลเซียส ความแตกต่างนี้เกิดเนื่องจากปริมาณกรดและน้ำตาลที่อยู่ภายในผลไม้สูงกว่าเนื้อ ซึ่งทำให้ผลไม้มีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าเนื้อ (18) การเกิดผลึกน้ำแข็งของผลิตภัณฑ์จะเกิดขึ้นหลังจากผ่านจุดเย็นตัวยวดยิ่ง (supercooling) แล้ว ซึ่งจุดเย็นตัวยวดยิ่งนี้เป็นปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิของสารละลายหรือสสารลดต่ำกว่าจุดเยือกแข็งโดยไม่เกิดผลึกน้ำแข็ง จากนั้นอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์จะสูงขึ้นเนื่องจากสารละลายที่จุดเย็นตัวยวดยิ่งจะคายความร้อนออกมา น้ำจะเริ่มเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งที่จุดนี้ ซึ่งก็คือจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์นั่นเอง

1.1.2 ขนาดของผลึกน้ำแข็ง

อัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับอัตราการระบายความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ และอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากสารละลายหรือเจลไปสู่ผิวของผลึกน้ำแข็งที่ก่อตัวขึ้น อัตราเร็วของการแช่แข็งช้าจะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ มีปริมาณผลึกน้ำแข็งน้อย

และเกิดผลึกน้ำแข็งภายนอกเซล เพราะเกิดจากน้ำที่ซึมผ่านออกมาจากผนังเซลและมีผลทำให้เซลเกิดการยุบตัวลง นอกจากนี้ผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่จะทำลายเนื้อเยื่อของผลิตภัณฑ์ ขณะที่อัตราเร็วของการแช่แข็งเร็วขึ้น จำนวนผลึกน้ำแข็งมีปริมาณมากขึ้น ขนาดของผลึกน้ำแข็งเล็กลง และเกิดผลึกน้ำแข็งภายในเซลของผลิตภัณฑ์ ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับขนาดและตำแหน่งของผลึกน้ำแข็งที่มีผลต่อคุณภาพทาง organoleptic ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งพบว่ามีผลเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามวิธีแช่แข็งที่มีอัตราเร็วของการแช่แข็งเร็วจะมีผลต่อการสูญเสียน้ำจากเนื้อเยื่อเมื่อน้ำแข็งละลายน้อยกว่าวิธีแช่แข็งที่มีอัตราเร็วของการแช่แข็งช้า และจะช่วยรักษาลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ให้ดีอยู่เสมอ

1.1.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร

เมื่อน้ำบริสุทธิ์เปลี่ยนไปเป็นผลึกน้ำแข็งจะทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นประมาณ 9% ผลิตภัณฑ์อาหารเมื่ออยู่ในสภาพแช่แข็งก็จะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยกว่า โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรประมาณ 6% เท่านั้น ทั้งนี้เพราะว่ามีน้ำเพียงบางส่วนในผลิตภัณฑ์เท่านั้นที่เปลี่ยนไปเป็นผลึกน้ำแข็งและในขณะเดียวกันผลิตภัณฑ์อาหารจะมีช่องว่างอากาศอยู่ การใช้วิธีแช่แข็งที่มีอัตราเร็วของการแช่แข็งเร็วมาก เช่น วิธีแช่แข็งด้วยไนโตรเจนเหลว จะทำให้เกิดความดันภายในเซลสูงมาก และเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างรวดเร็วทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกและเสียหายได้

1.1.4 การสูญเสียความชื้น

ในขณะแช่แข็งถ้าผลิตภัณฑ์ไม่ได้บรรจุอยู่ในภาชนะจะทำให้เกิดการสูญเสียความชื้น แต่ป้องกันได้โดยบรรจุผลิตภัณฑ์ลงในภาชนะบรรจุที่สามารถกันการซึมผ่านของน้ำและใช้วิธีแช่แข็งที่มีอัตราการแช่แข็งเร็ว (18) ถ้าบรรจุผลิตภัณฑ์ลงในภาชนะบรรจุที่มีช่องว่างอากาศระหว่างผิวของผลิตภัณฑ์และผิวของภาชนะบรรจุ ความชื้นจากผลิตภัณฑ์จะไม่สูญเสียผ่านออกไปจากภาชนะบรรจุ แต่ปริมาณน้ำจะยังคงอยู่ในรูปเกล็ดน้ำแข็งเล็ก ๆ เกาะอยู่ตามผิวด้านในของภาชนะบรรจุ ผลิตภัณฑ์แช่แข็งที่ไม่ได้บรรจุในภาชนะบรรจุจะสูญเสียความชื้นประมาณ 0.5-1.5% (18) หรืออาจมากกว่านี้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะแช่แข็ง อัตราเร็วของการแช่แข็ง วิธีแช่แข็งและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่แข็ง วิธีแช่แข็งด้วยลมเย็นเมื่อใช้อุณหภูมิลมที่เย็นจัด ลมเย็นจะมีปริมาณความชื้นต่ำด้วย จึงสามารถดึงเอาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ได้ และเมื่ออัตราเร็วของการแช่แข็งเร็วขึ้น จะทำให้อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็วขณะแช่แข็งผลิตภัณฑ์จะเกิดการสูญเสียความชื้นเนื่องจากการระเหย และการระเหยจะลดต่ำลงเมื่อผิวของผลิตภัณฑ์มีสิ่งป้องกันความชื้น (moisture-resistance) เช่น ไขมันต่าง ๆ ดังนั้นการออกแบบเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับ

กระบวนการแช่แข็งจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่จะลดการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์

1.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์ขณะแช่แข็ง

1.2.1 องค์ประกอบและการเปลี่ยนแปลง pH

ขณะแช่แข็งปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารจำนวนมากจะเปลี่ยนไปเป็นผลึกน้ำแข็ง ซึ่งทำให้สารละลาย สารคอลลอยด์ และสารแขวนลอยต่าง ๆ มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH เนื่องจากค่า pH จะไปมีผลต่อเสถียรภาพของสารคอลลอยด์ และสารแขวนลอยต่าง ๆ และมักพบว่าการเปลี่ยนแปลง pH ของผลิตภัณฑ์อาหารขณะแช่แข็ง จะมีแนวโน้มเป็นกรดมากขึ้น โดยมีค่า pH ลดลงประมาณ 1 หน่วย นอกจากนี้ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นสูงจะมีผลต่อการตกผลึกของเกลือ และสารประกอบต่าง ๆ จะละลายได้น้อยลง เช่น ฟอสเฟต ถ้า pH เกิดการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก และองค์ประกอบของสารละลายเกลือในอาหารเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อลักษณะทางเคมีฟิสิกส์ของอาหารแบบไม่สามารถย้อนกลับได้ เช่น มีผลเสียต่อเอนไซม์แลกติกดีไฮโดรจิเนส เอนไซม์จากเนื้อเยื่อ และไลโปโปรตีน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในไข่แดงจะถูกทำลายขณะแช่แข็ง เมื่อค่า pH ลดลงจาก 7 เป็น 5 และเมื่อความเข้มข้นของฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (18)

1.2.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีฟิสิกส์

ขณะแช่แข็งน้ำภายในเซลบางส่วนอาจเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งนอกเซล ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำจากเนื้อเยื่อเมื่อน้ำแข็งละลายและยังมีผลต่อการสูญเสียลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อีกด้วย (18) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีฟิสิกส์อื่น ๆ ในผลิตภัณฑ์แช่แข็ง เช่น การเปลี่ยนแปลงโปรตีนแอคโตมัยซินในเนื้อเยื่อของปลาทำให้เนื้อปลามีความหยาบและเหนียวขึ้น การเกิดลักษณะแห้ง (desiccation) ของสัตว์ปีก การสูญเสียความเต่งของผักและผลไม้สด และการสูญเสียสภาพเจลของไข่แดง การเปลี่ยนแปลงทางเคมีฟิสิกส์หลาย ๆ อย่างจะเกิดมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้นขณะที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาพที่ยังไม่แข็งตัว และการเปลี่ยนแปลงนี้จะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง เพราะเกลือในสารละลายจะเกิดการเคลื่อนที่ได้น้อยลง โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิจะมีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีฟิสิกส์จะเกิดได้ดี และทำลายผลิตภัณฑ์ให้เสียหายมากที่สุด เมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อยู่ที่ระหว่างจุดเยือกแข็งและ -10 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะให้ผลิตภัณฑ์อยู่ภายใต้อุณหภูมิช่วงนี้เป็นระยะเวลาสั้นที่สุด

2. การเปลี่ยนแปลงลักษณะของผลิตภัณฑ์ขณะเก็บแช่แข็ง

2.1 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและลักษณะเนื้อสัมผัส

2.1.1 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของเนื้อเยื่อผลไม้ (9)

ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อผลไม้จะทำลาย middle lamella protoplast และผนังเซลของเนื้อเยื่ออย่างถาวร ทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หลังละลายน้ำแข็งเสียไป โดยการเสื่อมเสียของลักษณะเนื้อสัมผัสจะขึ้นกับระดับความเสียหายของเนื้อเยื่อที่เกิดจากตำแหน่งและขนาดของผลึกน้ำแข็ง ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราเร็วของการแช่แข็งและภาวะการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่แข็ง การแช่แข็งที่มีอัตราเร็วของการแช่แข็งช้า จะเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ภายนอกเซลบริเวณช่องว่างระหว่างเซล การสูญเสียน้ำภายในเซลระหว่างที่เกิดผลึกน้ำแข็งภายนอกเซลจะทำให้ความเข้มข้นของเกลืออินทรีย์ภายในเซลเพิ่มขึ้น จนถึงระดับหนึ่งโปรตีนจะเกิดการตกตะกอน แต่ถ้าเป็นการแช่แข็งอย่างเร็วที่มีอัตราเร็วของการแช่แข็งมากกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จะเกิดผลึกน้ำแข็งภายในเซล ช่องว่างระหว่างเซลจะไม่ขยาย ผนังเซลจะไม่ถูกทำลาย เช่น ใน apple ที่แช่แข็งด้วยไนโตรเจนเหลว เมื่อดูเนื้อเยื่อด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าผนังเซลของ apple ที่แช่แข็งด้วยวิธีนี้จะไม่ถูกทำลาย เช่นเดียวกับเซลของ green bean ที่แช่แข็งด้วยไนโตรเจนเหลวไม่แตกต่างจากเซลของ green bean ที่ไม่ผ่านการแช่แข็ง

2.1.2 การเปลี่ยนแปลงทางลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อผลไม้ (9)

ลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นลักษณะที่สำคัญของผลไม้ เป็นลักษณะที่ประกอบด้วยแรงต้านการกัด ความรู้สึกของลื่น ความฉ่ำ และความกรอบ ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลไม้ คือ อัตราเร็วของการแช่แข็ง อุณหภูมิและระยะเวลาเก็บผลิตภัณฑ์แช่แข็ง การแช่แข็งอย่างช้า จะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งภายนอกเซลซึ่งจะทำลายผนังเซล และ middle lamella ทำให้ผลไม้หลังละลายน้ำแข็งนิ่มกว่าผลไม้สด เช่น สตรอเบอรี่ที่แช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และเก็บ 1 วัน มีคะแนนการยอมรับทางลักษณะเนื้อสัมผัสและความแน่นเนื้อต่ำกว่าสตรอเบอรี่สด และมีการสูญเสียน้ำจากเนื้อเยื่อประมาณ 40% ของน้ำหนักทั้งหมด ความแน่นเนื้อของ apple จะลดลงประมาณ 10% เมื่อแช่แข็งอย่างช้าที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กภายในเซลเนื้อเยื่อที่เกิดจากการแช่แข็งอย่างเร็วจะไม่ทำลาย protoplasm หรือผนังเซล เช่น สตรอเบอรี่ที่ผ่านการแช่แข็งอย่างช้าที่ -18 องศาเซลเซียส จะมีความแน่นเนื้อน้อยกว่าสตรอเบอรี่ที่แช่แข็งอย่างเร็วที่ -40 องศาเซลเซียสหรือที่แช่แข็งด้วยไนโตรเจนเหลว ส่วนผลของระยะเวลาเก็บต่อความแน่นเนื้อนั้น พบว่า red sour pitted cherries ที่แช่แข็งที่

-6.7 องศาเซลเซียส จะมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้นใน 5 สัปดาห์แรก และลดลงใน 5 สัปดาห์ถัดไป ซึ่งจะสัมพันธ์กับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส ความแน่นเนื้อของ cherries ที่เพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กับ demethoxylation ของ pectin ใน middle lamella เมื่อจำนวนของกลุ่ม carboxyl อิสระเพิ่มขึ้น จะเกิด calcium bridge ระหว่าง polymer ของ pectin ทำให้เซลเกาะกันได้ดีขึ้น

2.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อเยื่อผลไม้ (9)

การเก็บผลไม้แช่แข็งที่ -7 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่าจะยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ แต่การเปลี่ยนแปลงทางเคมีจะเกิดขึ้นถึงแม้จะเก็บที่ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้กันทั่วไปในการเก็บผลิตภัณฑ์แช่แข็ง การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่สำคัญซึ่งมีผลต่อการสูญเสียทางคุณภาพของผลไม้แช่แข็ง เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดจากเอนไซม์ ปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของกรดแอสคอร์บิค และการเปลี่ยนแปลงของ pH

2.2.1 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดจากเอนไซม์

สีน้ำตาลในเนื้อเยื่อผลไม้ เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบ phenolic ด้วยเอนไซม์ในขณะที่มีออกซิเจน ใน pear และ apple มี chlorogenic acid และ catechin เป็นสารตั้งต้นหลักของ polyphenol oxidase โดย pH ที่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ คือ ที่ pH ประมาณ 6

การฉีกขาดของเซลเนื่องจากผลึกน้ำแข็งจะทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้น โดยการสัมผัสกันระหว่าง polyphenol oxidase และสารตั้งต้นของมัน สีน้ำตาลนี้จะเกิดที่บริเวณผิวของผลไม้แช่แข็งมากกว่าภายในเซล เพราะบรรยากาศบริเวณผิวจะมีออกซิเจนอยู่ในปริมาณมาก แต่อย่างไรก็ตาม อาจเกิดสีน้ำตาลขึ้นภายในเนื้อผลไม้บางชนิดหลังละลายน้ำแข็ง เช่น ในเนื้อเยื่อ apple จะเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยาเอนไซม์เมื่อช่องว่างภายในเซลมีออกซิเจนอยู่

การควบคุมการเกิดสีน้ำตาลในเนื้อเยื่อผลไม้เนื่องจากเอนไซม์นี้ทำได้โดยการใช้ความร้อนเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือใช้สารยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดแอสคอร์บิค หรือโดยการกำจัดออกซิเจน การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ด้วยความร้อนนั้น บางครั้งจะเกิดกลิ่นแปลกปลอมขึ้นในเนื้อผลไม้ และเป็นปัญหาในการบริโภคสด ดังนั้นจึงควรใช้สารยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล เช่น กรดซัลฟูรัสและเกลือของมัน ซึ่งสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้ การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 10 ppm. เพียงพอที่จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ใน apple ได้ การจุ่ม apple ในสารละลายที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1000-2500 ppm. นาน 6-8 ชั่วโมงก่อนแช่แข็ง จะทำให้ผลิตภัณฑ์แช่แข็งมี

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เหลืออยู่ประมาณ 100 ppm. (9) ปริมาณสีน้ำตาลที่เกิดใน peach แช่แข็งจะแปรผกผันกับปริมาณกรดแอสคอร์บิคpeachที่จุ่มในน้ำเชื่อมที่มีกรดแอสคอร์บิค 150-250 มิลลิกรัมต่อผลิตภัณฑ์ 1 ปอนด์แล้วนำมาสัมผัสกับอากาศที่อุณหภูมิ -6.7 องศาเซลเซียส จะเกิดสีน้ำตาลภายใน 2-3 สัปดาห์ แต่ถ้าจุ่มในน้ำเชื่อมที่มีกรดแอสคอร์บิคตลอดเวลาที่อุณหภูมิเดียวกัน สีจะไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างเก็บนาน 65 วัน (9) กรดแอสคอร์บิคที่ความเข้มข้นต่ำจะไม่สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้ แต่จะรักษา polyphenol ที่ถูกออกซิไดซ์แล้วให้อยู่ในรูปรีดิวซ์

2.2.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดแอสคอร์บิค

ในกรณีที่มีออกซิเจน กรดแอสคอร์บิคจะถูกออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูป dehydroascorbic acid (DHA) และถูกออกซิไดซ์ต่อไปอยู่ในรูป 2,3-diketogulonic acid และ degradation product ของมัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดแอสคอร์บิคเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของความเข้มข้นของ copper และเป็นสัดส่วนผันกลับกับรากที่สองของความเข้มข้นของ hydrogen ion ในสารละลายกรด ในระหว่างแช่แข็งกรดแอสคอร์บิคอาจถูกออกซิไดซ์ด้วย ascorbic oxidase ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในเนื้อเยื่อผลไม้ผักและผลไม้แช่แข็งที่บรรจุในกระป๋องโลหะที่มีออกซิเจนอยู่น้อย กรดแอสคอร์บิคจะไม่ถูกออกซิไดซ์ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าบรรจุผลไม้ในกล่อง composite ที่ประกอบด้วย กระดาษเคลือบไขและฝาโลหะ หรือในกล่องกระดาษเคลือบพลาสติก ออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านภาชนะบรรจุได้ ซึ่งถ้ามีปริมาณมากพอจะทำลายกรดแอสคอร์บิคระหว่างเก็บ (9)

นอกจากนี้อัตราการเกิดออกซิเดชันของกรดแอสคอร์บิค ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเก็บรักษา เช่น green peas ที่เก็บที่อุณหภูมิ -6.7 องศาเซลเซียส กรดแอสคอร์บิคถูกออกซิไดซ์เกือบทั้งหมด แต่ถ้าเก็บที่ -18 องศาเซลเซียส กรดแอสคอร์บิคจะถูกออกซิไดซ์ไปประมาณ 10% เมื่อเก็บนาน 1 ปี

2.2.3 การเปลี่ยนแปลงของ pH

ในระหว่างแช่แข็ง เกลืออินทรีย์และเกลืออนินทรีย์ในส่วนที่ไม่เป็นน้ำแข็งจะเข้มข้นขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง เกลืออาจตกตะกอนที่จุด eutectic ของมัน ทำให้ pH เปลี่ยนแปลงไป เช่น pea ที่เก็บที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส pH จะเปลี่ยนจาก 6.7 เป็น 6.0 ระหว่างเก็บ 3 วันแรก และจะเพิ่มขึ้นเป็น 7 ระหว่างเก็บ 2-3 สัปดาห์ถัดไป จากนั้น pH จะลดลงอีกเป็น 6.4 เมื่อเก็บนาน 75 วัน ส่วน bean และ cauliflower ที่เก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ pH ระหว่างเก็บ การที่ pH ลดลงในช่วงแรกของการเก็บนั้น เนื่องจากการตกตะกอนของ potassium phosphate การตก

ตะกอนของ sodium และ potassium citrate ทำให้ pH เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีการศึกษาที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง pH ที่เปลี่ยนไปในผลไม้และการเสื่อมเสียทางคุณภาพระหว่างเก็บ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลง pH เพียงเล็กน้อย อาจทำให้ activity ของเอนไซม์เปลี่ยนแปลงไป และ cell membrane ถูกทำลายได้

2.3 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางจุลชีววิทยา

พืชและสัตว์ที่ใช้เป็นอาหารมนุษย์โดยมากจะเกิดการเน่าเสียได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และทางจุลชีววิทยา (18) ที่อุณหภูมิห้อง จุลินทรีย์มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการก่อให้เกิดการเน่าเสียของอาหารมากกว่าการเปลี่ยนแปลงอื่น ๆ วัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติมักมีจุลินทรีย์ปนอยู่ด้วยเสมอ และเมื่อจุลินทรีย์เจริญก็จะปล่อยเอนไซม์ต่าง ๆ ลงบนผลิตภัณฑ์ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกลิ่น รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ จุดประสงค์สำคัญของการถนอมรักษาอาหารก็เพื่อยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น ซึ่งทำได้โดยวิธีการฆ่าจุลินทรีย์ หรือยับยั้งความสามารถต่าง ๆ และการเจริญของจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคบางชนิดจะทนต่อการแช่แข็งมากกว่าจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของอาหาร แบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคโดยทั่วไปจะเป็นพวกแกรมลบ ซึ่งจะถูกทำลายได้ด้วยการแช่แข็งง่ายกว่าแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของอาหารซึ่งเป็นพวกแกรมบวก (18) นอกจากนี้ยังพบว่า วิธีแช่แข็งที่ใช้จะมีผลต่อการทำลายจุลินทรีย์ วิธีแช่แข็งที่มีอัตราเร็วของการแช่แข็งช้าจะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งอย่างช้า ๆ และผลึกจะมีขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ดีกว่าวิธีแช่แข็งที่มีอัตราเร็วของการแช่แข็งเร็ว (18) จุลินทรีย์บางส่วนจะถูกทำลายได้ขณะแช่แข็งและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในตู้แช่แข็ง แต่ทั้งนี้ขึ้นกับวิธีแช่แข็งและชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร ด้วยเหตุนี้การแช่แข็งจึงไม่สามารถที่จะลดจำนวนแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหารได้ทั้งหมด

กระบวนการผลิตผลไม้แช่แข็ง (9)

โดยทั่วไป กระบวนการผลิตผลไม้แช่แข็ง จะประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน คือ การปฏิบัติการก่อนแช่แข็ง การแช่แข็ง การเก็บรักษาผลไม้แช่แข็ง และการละลายน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์แช่แข็ง

1. การปฏิบัติการก่อนการแช่แข็ง

การผลิตผลไม้แช่แข็งจะยังคงสภาพสดได้ วัตถุดิบต้องมีการเก็บเกี่ยวอย่างระมัดระวังและแช่แข็งโดยเร็ว ไม่มีกระบวนการผลิตใดที่สามารถปรับปรุงสภาพสดของผลิตภัณฑ์ได้ การผลิตอย่างถูกต้องและรวดเร็วจะทำให้เกิดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด ผลไม้ที่แช่แข็งอย่างถูก

วิธีจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าผลไม้สดที่ขายตามปกติ ถ้าไม่สามารถแช่แข็งผลไม้ที่เก็บมาได้ทันทีต้องทำให้ผลไม้มีอุณหภูมิต่ำ เพื่อลดอัตราการเกิดเมตาบอลิซึมของผลไม้และชลอการเสียเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์

1.1 การเลือกวัตถุดิบ Carles (3) ได้ให้ข้อเสนอแนะว่า ควรเลือกชนิดผลไม้ที่มีสี มีความมันเงา กลิ่นหอม มีความแข็งพอควร รสชาติเด่น และมีความสุกพอเหมาะ

1.2 การล้างทำความสะอาด เป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนสกปรก ฝุ่นละออง โรคและแมลงบางชนิด ยาฆ่าโรคและแมลงที่ใช้ตั้งแต่ในแปลงปลูกซึ่งติดอยู่ตามผิว การล้างผลไม้ด้วย detergent จะช่วยกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ ที่ติดอยู่ตามผิวออกได้ง่ายขึ้น น้ำที่ใช้ล้างหรือแช่ผลไม้อาจเป็นแหล่งของเชื้อโรคโดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย ดังนั้นอาจใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติในการควบคุมการแพร่กระจายของโรคร่วมด้วย เช่น คลอรีน (19)

1.3 การคัดเลือกคุณภาพ เพื่อคัดเอาผลไม้ที่ไม่เหมาะสมออกไป เช่น รูปร่างผิดปกติ มีรอยตำหนิ มีบาดแผล ทำให้ผลิตผลได้มาตรฐาน การคัดเลือกส่วนใหญ่นิยมใช้แรงคน เพราะสายตาของคนมีความชำนาญกว่าเครื่องจักร ในบริเวณคัดเลือกต้องมีแสงสว่างอย่างเพียงพอ เพื่อมองเห็นผลิตผลได้ง่าย สายพานที่เคลื่อนที่ผ่านคนที่ทำหน้าที่คัดเลือกไม่ควรกว้างเกิน 30 เซนติเมตร และไม่เคลื่อนที่เร็วเกินไป สำหรับผลิตผลที่มีลักษณะกลมหรือค่อนข้างกลม ควรใช้สายพานลูกกลิ้งเพื่อให้ผลิตผลได้พลิกหรือกลับตัวได้ (19)

1.4 การคัดขนาด เพื่อให้ได้ผลิตผลที่มีขนาดสม่ำเสมอ สามารถคัดขนาดโดยใช้คนงานหรือเครื่องจักร เครื่องจักรที่ทำหน้าที่คัดเลือกขนาดมีระบบการทำงานโดยอาศัยเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความยาวของผลิตผล ขนาดของผลิตผล และน้ำหนักของผลิตผล

1.5 การปอกเปลือกและตัดแต่ง ผลไม้บางชนิดต้องมีการกำจัดเปลือกออกก่อน ซึ่งอาจใช้สารละลายด่าง แล้วขัดถูและล้างเอาเปลือกออก หรือโดยการใช้ความร้อน การแช่แข็ง หรือโดยการขัดสีกับวัตถุผิวหยาบเพื่อเอาเปลือกออก ผลไม้ส่วนใหญ่ถูกตัดระหว่างการเตรียมก่อนการแช่แข็ง เพื่อให้เหมาะสมกับการรับประทาน พื้นที่ผิวที่ถูกตัดนี้ทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางอาหาร และทำให้เป็นปัญหาสำหรับการล้างและกำจัดน้ำเสียที่เหลือจากการล้าง

1.6 การใช้สารยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดบางชนิด เพื่อควบคุมการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยาของเอนไซม์กับสารประกอบ phenolic

1.7 ภาชนะบรรจุ (18)

ผลไม้แช่แข็งควรบรรจุในภาชนะบรรจุที่เหมาะสม เพื่อปกป้องผลิตภัณฑ์จากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่ไม่ต้องการ เช่น การปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ การซึมผ่านของอากาศ สมบัติ

เหล่านี้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของภาชนะบรรจุที่ใช้ สมบัติของภาชนะบรรจุสำหรับผลไม้แช่แข็งควรมีลักษณะดังนี้

- ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับอาหาร มีเสถียรภาพและไม่เป็นพิษ
- กันการซึมผ่านของของเหลว ไอน้ำและสารระเหยอื่น ๆ ได้ดี เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและสารระเหยระหว่างแช่แข็งและการเก็บ
- สามารถใช้กับระบบการบรรจุอัตโนมัติได้
- ทำจากวัสดุที่ยืดหยุ่นได้ เพื่อสะดวกในการขนส่งและการเก็บรักษา
- ต้องทนอุณหภูมิต่ำได้ เพราะใช้ในการแช่แข็ง และเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า
- ปราศจากรอยด่างและกลิ่น ไม่เกาะติดกับผลิตภัณฑ์ในสภาวะแช่แข็ง
- ทนกรดอ่อนได้
- ป้องกันการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์
- มีราคาถูกโดยมีสมบัติที่ต้องการด้วย
- มีลักษณะปรากฏที่ดี สวยงาม สมกับเป็นภาชนะบรรจุอาหาร และดึงดูดใจผู้บริโภค

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวกับการปฏิบัติการก่อนการแช่แข็งของผลไม้แช่แข็ง มีดังนี้

Reyes และ Luh (20) ศึกษาผลของการใช้กรดแอสคอร์บิคและกรดไอโซแอสคอร์บิคเป็นสาร antioxidant สำหรับ peach แช่แข็งซึ่งบรรจุในกระป๋อง เพื่อยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลด้วยเอ็นไซม์ พบว่าสารทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพเท่าเทียมกัน และเมื่อความเข้มข้นของ antioxidant เพิ่มขึ้น peach จะเกิดสีน้ำตาลน้อยลง

Main และคณะ (21) ศึกษาลักษณะการแช่แข็งของสตรอเบอรี่ 2 ลักษณะ คือ แช่แข็งทั้งลูก และตัดเป็นชิ้นแล้วจึงแช่แข็ง และศึกษาสารละลายที่ใช้เพิ่มความแน่นให้เนื้อผลไม้ ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 8 treatments คือ (1) control(ไม่แช่ในสารละลาย) (2) vacuum+น้ำ (3) 1% calcium lactate (4) 1% calcium lactate+vacuum (5) 2% calcium lactate (6) 2% calcium lactate+vacuum (7) 3% Avicel® (type CL 611)+ vacuum และ (8) 3.5% Avicel®+ vacuum พบว่า การแช่แข็งสตรอเบอรี่ทั้งลูกและการใช้ calcium lactate 2% จะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสดีที่สุด โดยการใช้สุญญากาศไม่มีผลต่อความแน่นเนื้อและการยอมรับทางประสาทสัมผัส

Isaacs (22) ศึกษาความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 100 200 300 และ 400 g/l และลักษณะการบรรจุ 2 ลักษณะคือ มะม่วงชิ้นแช่แข็งในน้ำเชื่อม และมะม่วงชิ้นคลุกน้ำตาลทราย แช่แข็งต่อคุณภาพของมะม่วงชิ้นแช่แข็ง พบว่า มะม่วงชิ้นแช่แข็งในน้ำเชื่อมเข้มข้น 200 g/l ให้ผลดีที่สุด

Venning และคณะ (23) ศึกษาผลของอากาศและภาชนะบรรจุ 2 ชนิด คือ polyethylene และ foil laminate (PET/foil/LLDPE) ต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดแอสคอร์บิคและคลอโรฟิลล์ จากการทดลองพบว่าภาชนะบรรจุและการเอาอากาศออกจากเนื้อผลไม้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดแอสคอร์บิค และคลอโรฟิลล์ในเนื้อผลไม้ที่เก็บที่ -18 องศาเซลเซียส

2. การแช่แข็ง

การแช่แข็งอาหารเป็นลักษณะการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากอาหารไปยังสารให้ความเย็นซึ่งสารให้ความเย็นนี้อาจอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลวหรือกาซ สารให้ความเย็นนี้จะนำไปใช้ในวิธีการแช่แข็งแบบต่าง ๆ

2.1 วิธีการแช่แข็งที่ใช้ในอุตสาหกรรม (9)

2.1.1 Air Blast Freezing

เป็นวิธีแช่แข็งที่อาศัยลมเย็นเป็นตัวกลางเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงพัดหมุนเวียนอยู่เหนือผลิตภัณฑ์ ลมเย็นระบายความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิต่ำลง การนำลมกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งทำได้โดยอาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างลมกับตัวทำความเย็น ความเร็วลมเฉลี่ยสำหรับห้องแช่แข็งขนาดเล็กของวิธีนี้ประมาณ 2.5 เมตร/วินาที และห้องแช่แข็งขนาดใหญ่ประมาณ 7.5 เมตร/วินาที อัตราเร็วของการแช่แข็งขึ้นอยู่กับ ความเร็วลม อุณหภูมิของลมเย็น และอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่แข็ง เครื่องแช่แข็งนี้สามารถทำแบบต่อเนื่องได้ โดยส่งผลิตภัณฑ์ผ่านไปตามสายพานที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าห้องแช่แข็ง หรือแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้แรงงานคนจัดวางผลิตภัณฑ์ลงบนถาดแล้วนำไปวางไว้ในห้องแช่แข็ง

ข้อดีของวิธีแช่แข็งด้วย air blast freezing คือ เป็นวิธีแช่แข็งที่ใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เสียค่าใช้จ่ายต่ำ และใช้ได้ดีกับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ กัน

ข้อเสียของวิธีแช่แข็งด้วย air blast freezing คือ ผลิตภัณฑ์มีการสูญเสียน้ำหนักมากขณะแช่แข็ง ถ้าไม่มีการบรรจุผลิตภัณฑ์ในภาชนะบรรจุก่อนการแช่แข็ง

2.1.2 Plate Freezing

ผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่แข็งที่บรรจุหรือไม่บรรจุอยู่ในภาชนะ จะถูกจัดวางไว้ระหว่างผิวของโลหะเย็น ซึ่งทำให้เย็นโดยผ่านน้ำเกลือที่เย็นจัดหรือไอของสารทำความเย็น เช่น R-22(monodichlorodifluoromethane) R-12 (dichlorodifluoromethane) หรือแอมโมเนีย ความร้อนจากผลิตภัณฑ์จะระบายออกโดยตรงด้วยวิธีการนำความร้อนด้วยแผ่นโลหะเย็น การสัมผัสกับแผ่นโลหะเย็นนี้ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีมาก ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะลดลง เมื่อความหนาของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

ข้อดีของวิธีแช่แข็งด้วยแผ่นโลหะเย็น คือ ผลิตภัณฑ์มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่แช่แข็งด้วย air blast freezing เสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ และใช้ได้ดีกับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในภาชนะที่มีลักษณะพองนูน เพราะสามารถปรับแผ่นโลหะเย็นให้แนบกับผลิตภัณฑ์ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ได้ดี

ข้อเสียของการแช่แข็งด้วยแผ่นโลหะเย็น คือ ผลิตภัณฑ์ต้องมีความหนาสม่ำเสมอ และจะมีอัตราเร็วของการแช่แข็งช้า ถ้าบรรจุผลิตภัณฑ์ในภาชนะบรรจุที่มีช่องว่างอากาศ

2.1.3 Liquid Immersion Freezing

เป็นวิธีแช่แข็งที่มีการใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ เช่น ไก่ และสัตว์ปีกต่าง ๆ ผลิตภัณฑ์ที่นำมาแช่แข็งจะบรรจุหรือไม่บรรจุในภาชนะบรรจุก็ได้ จุ่มผลิตภัณฑ์ลงในสารละลายที่เย็นจัด เช่น propyleneglycol, glycerol, sodium chloride, calcium chloride หรือสารละลายผสมของเกลือและน้ำตาล การแช่แข็งด้วยวิธีนี้จะเกิดเกล็ดน้ำแข็งกระจายทั่วผิวของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวได้ดีมาก และทำให้สีผิวของผลิตภัณฑ์ขาวน่าดู

ข้อดีของการแช่แข็งด้วยการจุ่มลงในสารละลายเย็น คือ มีอัตราการแช่แข็งเร็ว เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุหรือไม่บรรจุในภาชนะก็ได้ เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กกระจายทั่วผลิตภัณฑ์ทำให้ได้ลักษณะปรากฏที่ดี และน้ำแข็งที่หุ้มผิวของผลิตภัณฑ์จะช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นจากผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถปรับให้เป็นระบบต่อเนื่องได้ค่อนข้างง่าย

ข้อเสียของวิธีแช่แข็งด้วยการจุ่มลงในสารละลายเย็น คือ ต้องเลือกตัวทำความเย็นที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

2.1.4 Cryogenic Freezing

เป็นวิธีแช่แข็งที่อัตราเร็วของการแช่แข็งเร็วมาก ผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาแช่แข็งจะบรรจุในภาชนะที่เป็นแผ่นฟิล์มบางหรือไม่บรรจุในภาชนะก็ได้ นำมาสัมผัสกับตัวทำความเย็นที่เย็นจัดแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของตัวทำความเย็น เนื่องจากความร้อนที่ระบายออกจากผลไม้ วิธีนี้จะแตกต่างจากการแช่แข็งโดยการจุ่มลงในสารละลายเย็นในเรื่องการเปลี่ยนสถานะของตัวทำความเย็น สารทำความเย็นที่ใช้ในวิธีแช่แข็งแบบไครโอจีนิคต้องใช้กับอาหารได้ เช่น ไนโตรเจนเหลว คาร์บอนไดออกไซด์เหลวหรือแข็ง ส่วนฟรีออน (R-12 หรือ CCl_2F_2) แม้จุดเดือดของมันไม่ต่ำพอแต่ก็สามารถใช้หลักการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอได้เช่นกัน ทำให้สามารถนำฟรีออนไปใช้ในวิธีแช่แข็งนี้ได้ อัตราเร็วของการแช่แข็งแบบไครโอจีนิคจะเร็วกว่าการแช่แข็งด้วยวิธี air blast freezing และ plate freezing ค่อนข้างมาก แต่จะเร็วกว่าการแช่แข็งด้วยวิธี fluidized-bed freezing และ immersion freezing เพียงเล็กน้อย

วิธีแช่แข็งแบบไครโอจีนิคด้วยไนโตรเจนเหลว ผลิตภัณฑ์จะวางอยู่บนสายพานและเคลื่อนเข้าสู่ช่วงที่ 1 ซึ่งไอเย็นของไนโตรเจนจะเคลื่อนที่สวนทางกับผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิด pre-freezing เมื่อผลิตภัณฑ์เข้าสู่ช่วงที่ 2 จะมีการฉีดพ่นไนโตรเจนเหลวลงบนผลิตภัณฑ์ และเกิดการเปลี่ยนสถานะของไนโตรเจนเหลวกลายเป็นไอ ผลิตภัณฑ์จะอยู่ในสภาวะแช่แข็งทันที แล้วเคลื่อนที่ผ่านไปยังช่วงที่ 3 ซึ่งเป็นช่วงที่ปล่อยให้อุณหภูมิอยู่ในสภาพสมดุลคงที่ (-18 ถึง -30 องศาเซลเซียส) ก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่ผ่านห้องแช่แข็ง

ข้อดีของวิธีแช่แข็งแบบไครโอจีนิคด้วยไนโตรเจนเหลว คือ ผลิตภัณฑ์มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า 1% เครื่องมือไม่สลับซับซ้อน เหมาะที่จะใช้ในการผลิตแบบต่อเนื่อง สามารถปรับอัตราการผลิตและใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด นอกจากนี้ระบบนี้ยังป้องกันออกซิเจนไม่ให้ผ่านเข้าไปในห้องแช่แข็งระหว่างการแช่แข็ง(9)

ข้อเสียของการแช่แข็งแบบไครโอจีนิคด้วยไนโตรเจนเหลว คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง เนื่องจากไนโตรเจนเหลวมีราคาแพง

2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเวลาสำหรับการแช่แข็ง (24)

2.2.1 ขนาดของผลิตภัณฑ์

เวลาสำหรับการแช่แข็งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของผลิตภัณฑ์ เมื่อความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการระบายความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์จะนานขึ้น

2.2.2 อุณหภูมิตัวกลางในการแช่แข็ง

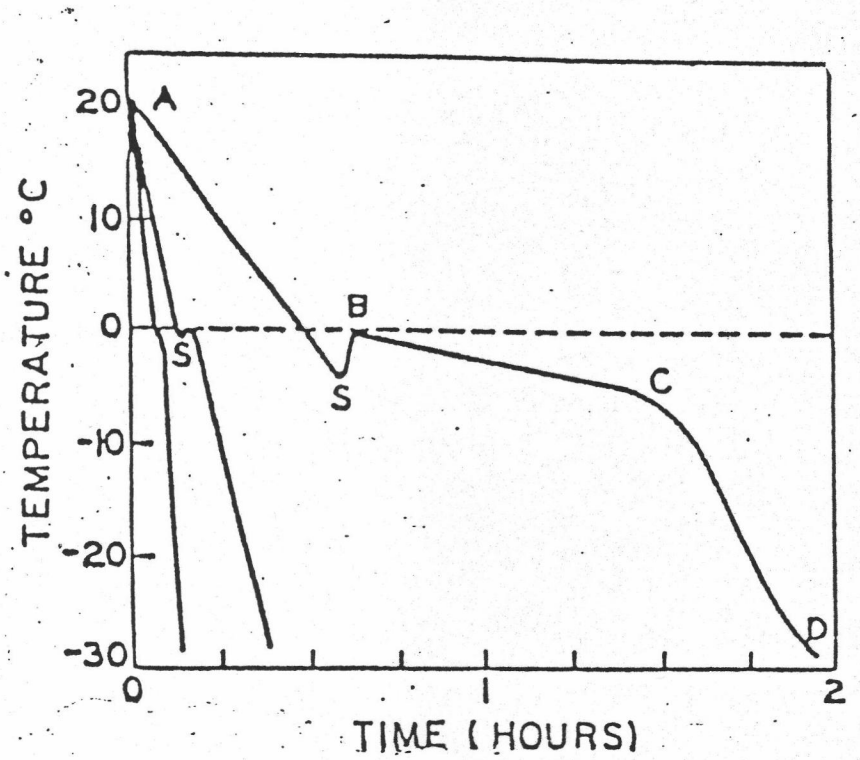
การลดอุณหภูมิตัวกลางในขณะแช่แข็งให้ต่ำลงจะช่วยเพิ่ม driving force ในการระบายความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น ทำให้ใช้เวลาสำหรับแช่แข็งผลิตภัณฑ์สั้นลง

2.2.3 อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์

อิทธิพลของอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อเวลาสำหรับการแช่แข็ง คือ เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ต่ำ เวลาที่ใช้ในการแช่แข็งจะสั้นลง

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในขณะแช่แข็ง (25)

รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหารในภาวะแช่แข็งแสดงดังรูปที่ 2.3 ช่วง A-S เป็นช่วงที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงเป็นการระบายความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากน้ำไปเป็นผลึกน้ำแข็ง จุด S เป็นจุดเย็นตัวยวดยิ่ง (supercooling) คือ จุดที่สารละลายภายในผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งแต่ไม่เกิดผลึกน้ำแข็ง ซึ่งจุดนี้ไม่จำเป็นต้องพบเสมอไป ขึ้นอยู่กับความไว การสนองตอบต่อเวลา และตำแหน่งของเครื่องวัดอุณหภูมิ การแช่แข็งอย่างเร็วจะผ่านจุดเย็นตัวยวดยิ่งเร็ว ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กไม่ทำให้เนื้อเยื่อผลไม้เกิดการเสียหายเนื่องจากผลึกน้ำแข็ง หลังจากผ่านจุดเย็นตัวยวดยิ่งไปเล็กน้อยจะเกิดความร้อนของการเกิดผลึกน้ำแข็ง ซึ่งทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นและเริ่มเกิดผลึกน้ำแข็งซึ่งก็คือจุดเยือกแข็งที่จุด B นั่นเอง จากช่วง B-C เป็นช่วงเวลาที่น้ำส่วนมากเปลี่ยนไปเป็นผลึกน้ำแข็งมากที่สุด ความร้อนที่ระบายออกช่วงนี้ เกิดจากความร้อนที่น้ำเปลี่ยนไปเป็นผลึกน้ำแข็ง ในช่วงต้นของ B-C น้ำบริสุทธิ์จะแยกตัวออกไปเป็นผลึกน้ำแข็ง ขณะที่ดำเนินไปในช่วงท้ายของ B-C จะเกิดสารละลายผสมต่าง ๆ หลายชนิดปะปนกัน การระบายความร้อนจากช่วง C-D จะมีผลต่อการลดอุณหภูมิลงได้มากกว่าช่วง B-C และแม้ว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงถึงจุด D อุณหภูมิที่จุดนี้ก็ยังคงมีน้ำที่ไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นผลึกน้ำแข็งได้



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในขณะแช่แข็ง

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีแช่แข็งผลไม้ มีดังนี้

Isaacs (22) ศึกษาวิธีแช่แข็งต่อคุณภาพของมะม่วงชิ้นแช่แข็ง โดยใช้ still air freezing และ air blast freezing พบว่า วิธีแช่แข็งมีผลต่อเวลาสำหรับแช่แข็ง คือ still air freezing ใช้เวลา 7 ชั่วโมง ในขณะที่ air blast freezing ใช้เวลา 1 ชั่วโมง และมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส ส่วนการยอมรับรวมของมะม่วงชิ้นแช่แข็งทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างกัน

Hung และ Thompson (26) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของ green peas ระหว่างแช่แข็ง โดยใช้วิธีแช่แข็ง 3 วิธี คือ still air freezing air blast freezing และ Freon immersion freezing พบว่า pea ที่แช่แข็งด้วยวิธี Freon immersion มีลักษณะเนื้อสัมผัสดีกว่าวิธีแช่แข็งอีก 2 วิธี เพราะเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก

3. การเก็บรักษาผลไม้แช่แข็ง

คุณภาพของผลิตภัณฑ์แช่แข็ง ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ คือ คุณภาพเริ่มต้นของวัตถุดิบ กระบวนการผลิต ภาชนะบรรจุ อุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ และระยะเวลาที่ใช้เก็บผลิตภัณฑ์แช่แข็ง อุณหภูมิและเวลาที่ใช้เก็บผลไม้แช่แข็ง เป็นปัจจัยที่สำคัญในการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปมักเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า การปิดเปิดห้องแช่แข็งทำให้อุณหภูมิของห้องแช่แข็งไม่คงที่ เกิด freeze-thaw-refreeze cycle ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพด้อยลง

3.1 อุณหภูมิการเก็บรักษา

โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งจะถูกเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นภาวะที่น้ำบางส่วนยังคงเหลือในผลิตภัณฑ์ การเสื่อมสลายและการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นตลอดเวลาในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ชีวเคมี และกายภาพ แต่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางจุลชีววิทยา เพราะที่อุณหภูมิระดับนี้จุลินทรีย์ต่างๆไม่สามารถเจริญได้ โดยทั่วไปแบคทีเรียไม่สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -10 องศาเซลเซียส เนื่องจากความเข้มข้นของเกลือและสารอินทรีย์ต่างๆที่ละลายได้เพิ่มขึ้นจึงมีผลทำให้น้ำภายในผลิตภัณฑ์มีค่า water activity ลดต่ำลง ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสนี้ยังคงมีจุลินทรีย์ที่สามารถทนต่อภาวะแห้งแล้งได้ เช่น ราและยีสต์ ยีสต์ไม่สามารถเจริญได้เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า -12 องศาเซลเซียส ราไม่สามารถเจริญได้เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า -18 องศาเซลเซียส ดังนั้นถ้าเก็บผลิตภัณฑ์แช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิสูงกว่า -18 องศาเซลเซียส อาจพบโคโลนีของยีสต์หรือราบนผิวของผลิตภัณฑ์แช่แข็งได้ (18)

Venning และคณะ(23) ศึกษาสภาวะเก็บที่มีผลต่อคุณภาพของ kiwifruit pulp แช่แข็ง ซึ่งเก็บที่ -9 -18 และ -25 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -9 องศาเซลเซียส คลอโรฟิลล์เปลี่ยนไปเป็นฟีโอไฟติน (pheophytin) และกรดแอสคอร์บิคเปลี่ยนไปเป็นกรดดีไฮโดรแอสคอร์บิค(dehydroascorbic acid) มากขึ้นเมื่อเทียบกับการเก็บที่ -18 องศาเซลเซียส

3.2 การสูญเสียความชื้นระหว่างการเก็บรักษา

การสูญเสียความชื้นระหว่างการเก็บรักษาเป็นปัญหาระหว่างการเก็บผลิตภัณฑ์ในสภาพแช่แข็ง การใช้ภาชนะที่กันการซึมผ่านของไอน้ำ และบรรจุผลิตภัณฑ์ให้แนบสนิทโดยไม่มีช่องอากาศ จะลดปัญหาการสูญเสียความชื้น นอกจากนี้การสูญเสียความชื้นยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเฉลี่ยของสภาพแวดล้อม อุณหภูมิของเครื่องระเหยในอุปกรณ์แช่แข็ง และอุณหภูมิภายในห้องเก็บผลิตภัณฑ์แช่แข็ง การสูญเสียความชื้นเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเก็บสูง อุณหภูมิการเก็บไม่

คงที่ และเมื่ออุณหภูมิของเครื่องระเหยต่ำกว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะเกิดการส่งผ่านความร้อนและไอน้ำจากผลิตภัณฑ์ไปสู่เครื่องระเหย (18)

ถ้าใช้ภาชนะบรรจุที่กันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี แต่บรรจุผลิตภัณฑ์ไม่แนบสนิทกับภาชนะบรรจุ การสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ยังคงเกิดขึ้นตลอดเวลาแต่ไม่ผ่านออกไปนอกภาชนะบรรจุแต่จะเกิดเป็นเกล็ดน้ำแข็งเล็กๆเกาะอยู่ตามผิวด้านในของภาชนะบรรจุ โดยมีกลไกการเกิดดังนี้ (18)

1. ชั้นอากาศที่เกิดระหว่างผลิตภัณฑ์และภาชนะบรรจุซึ่งอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะที่อุณหภูมิรอบๆผลิตภัณฑ์ลดต่ำลงมีผลทำให้อุณหภูมิที่ภายในของภาชนะบรรจุลดต่ำลงกว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ชั่วขณะหนึ่ง ผลึกน้ำแข็งที่ผิวของผลิตภัณฑ์ หรือภายในผลิตภัณฑ์จะเกิดการระเหิดขึ้นแล้วควบแน่นเป็นเกล็ดน้ำแข็งเล็กๆเกาะอยู่ตามผิวภายในของภาชนะบรรจุ

2. เมื่ออุณหภูมิสภาพรอบๆสูงขึ้นจะเกิดกระบวนการย้อนกลับจากข้อ 1 แต่จะเกิดการควบแน่นของน้ำกลับคืนบนผิวของผลิตภัณฑ์มากกว่าที่จะกลับเข้าไปแทรกอยู่ภายในเนื้อเยื่อ

3. เมื่อเกิดวัฏจักรของการเปลี่ยนแปลงความร้อน-ความเย็นสลับกันบ่อย ๆ ผลึกน้ำแข็งบนผลิตภัณฑ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ผิวภายในของภาชนะบรรจุมากกว่าผลึกน้ำแข็งภายในผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์อาหารที่บรรจุในภาชนะบรรจุที่ไม่เหมาะสมจะทำให้การระเหิดของน้ำแข็งมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดข้อบกพร่องหรือตำหนิที่เรียกว่า freezer burn ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่เกิดขึ้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะแห้ง เป็นจุดสีน้ำตาล ไม่ดึงดูดใจผู้บริโภค การเกิด freezer burn จะลดลง หากมีการป้องกันการสูญเสียความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ เช่น เก็บผลิตภัณฑ์ในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ใช้น้ำเคลือบ หรือบรรจุผลิตภัณฑ์ลงในภาชนะบรรจุที่กันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีและบรรจุอย่างถูกวิธี

3.3 ข้อแนะนำการเก็บผลิตภัณฑ์แช่แข็ง (18)

คุณภาพของผลิตภัณฑ์แช่แข็งจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเก็บที่เหมาะสมสำหรับระยะเวลาการเก็บขณะใดขณะหนึ่ง และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่แข็งเพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีควรปฏิบัติดังนี้

- เก็บผลิตภัณฑ์แช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิไม่สูงกว่า -18 องศาเซลเซียส และสม่ำเสมอตลอดเวลา
- เก็บผลิตภัณฑ์แช่แข็งไว้ในห้องเก็บรักษาที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง
- ไม่เก็บผลิตภัณฑ์แช่แข็งที่มีอายุเกินกำหนดไว้ในห้องเก็บรักษาอีกต่อไป

- ไม่เก็บผลิตภัณฑ์แช่แข็งที่ชำรุดเสียหาย แตกหัก หรือภาชนะบรรจุฉีกขาดไว้ในห้องเก็บรักษา

- ภายในห้องเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่แข็งไม่ควรมีสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ เข้าไป เช่น หนู ขนสัตว์ต่าง ๆ และสิ่งอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการ จึงจำเป็นต้องออกแบบห้องเก็บรักษาให้เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว

4. การละลายน้ำแข็งในผลไม้แช่แข็ง (18)

วิธีการละลายน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์แช่แข็งมี 2 หลักการคือ การนำความร้อนจากผิวไปสู่ภายในผลิตภัณฑ์ และการสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ สำหรับหลักการแรกจะให้ความร้อนไปที่ผิวของผลิตภัณฑ์โดยให้ผิวของผลิตภัณฑ์สัมผัสกับแหล่งให้ความร้อน เช่น แผ่นโลหะร้อน อากาศร้อน น้ำอุ่น หรือไอน้ำภายใต้สุญญากาศ หลักการที่สองทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในผลิตภัณฑ์โดยใช้วิธีการเกิดความต้านทานไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์อาหาร ไดอิเลคตริกหรือไมโครเวฟ แต่วิธีการละลายน้ำแข็งด้วยการให้ความร้อนที่ผิวของผลิตภัณฑ์เป็นที่นิยมมากกว่าการทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่แข็งส่วนใหญ่ นิยมละลายน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์โดยใช้วิธีการละลายน้ำแข็งด้วยน้ำหรืออากาศ และมักจะไม่ละลายน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์จนหมด ผลิตภัณฑ์จะถูกบริโภคในลักษณะที่ยังมีผลึกน้ำแข็งอยู่ ซึ่งช่วยทดแทนลักษณะเนื้อสัมผัสที่สูญเสียไปได้ (4,27)

จากการค้นคว้าวารสารปริทัศน์ จะเห็นว่า ข้อมูลทางวิชาการและรายละเอียดเกี่ยวกับการแช่แข็งผลไม้ไทยยังมีอยู่น้อยมาก ถ้าสามารถศึกษาวิธีแช่แข็งผลไม้ไทยเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมหรือเพื่อบริโภคในลักษณะผลไม้แช่แข็งก็จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการแช่แข็งเงาะและลิ้นจี่ เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาวิธีผลิตเงาะแช่แข็ง ส่วนลิ้นจี่นั้นได้มีการศึกษาบ้างแล้วในรูปลิ้นจี่ทั้งเปลือกแช่แข็ง โดยเน้นการรักษาสีแดงของเปลือกลิ้นจี่ (14,15,16,17) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาภาวะการเตรียมผลไม้ก่อนนำไปแช่แข็ง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการแช่แข็งผลไม้แต่ละชนิด ศึกษาผลการใช้เครื่องแช่แข็งต่างชนิดกันต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์แช่แข็ง โดยใช้เครื่องแช่แข็ง 3 ชนิด คือ air blast freezer plate freezer และ cryogenic freezer และศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่แข็งหลังจากแช่แข็งทันทีและหลังจากเก็บนาน 24 สัปดาห์