บทที่ 2
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. กระบวนการแช่เยือกแข็งหลังดึงน้ำออกด้วยการออสโมซิส (Osmodehydrofreezing)

เป็นกระบวนการที่รวมเอากระบวนการออสโมซิสและการแช่เยือกแข็งเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นกระบวนการดังกล่าวจึงเป็นกระบวนการที่กำจัดน้ำออกบางส่วนออกจากวัตถุดิบ เช่น ผักผลไม้ โดยการแช่ในสารละลายความเข้มข้นสูง ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งทั้งนี้เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของผักและผลไม้แช่เยือกแข็ง (Ngamjit and Sanguansri 2009)

2. การออสโมซิส (ชูทวีป ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา 2542)

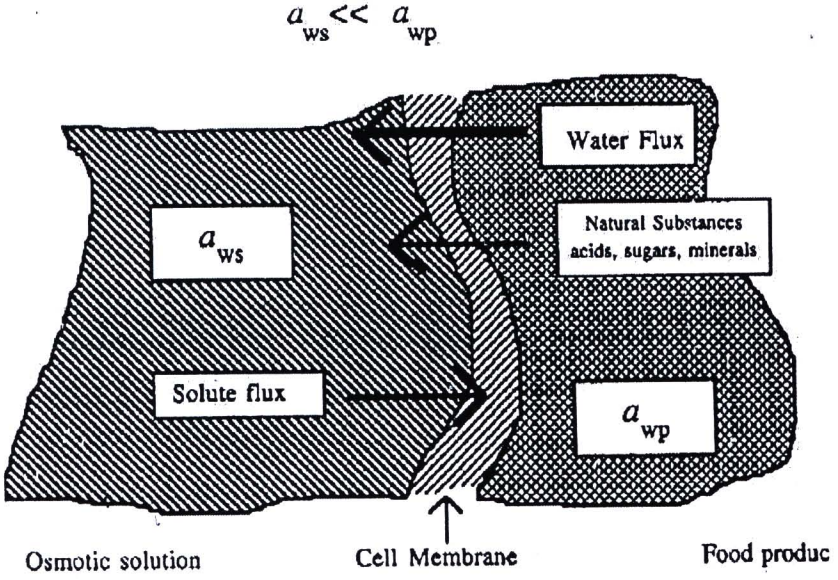
ออสโมซิสเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ลดปริมาณน้ำบางส่วนออกจากชิ้นผลไม้โดยใช้พลังงานไม่สูงมากนักและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อคุณภาพของผลไม้น้อย ซึ่งทำได้โดยการแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายที่มีปริมาณตัวถูกละลายสูงกว่าปริมาณตัวถูกละลายในชิ้นผลไม้ (hypertonic solution) หรือเรียกว่าสารละลายออสโมติค ในระหว่างการแช่นั้นจะเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ขึ้น คือ การเคลื่อนที่ของน้ำจากชิ้นผลไม้ไปยังสารละลาย ขณะเดียวกันก็เกิดการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายจากสารละลายไปยังชิ้นผลไม้ รวมทั้งมีการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบภายในชิ้นผลไม้ไปยังสารละลายด้วย ซึ่งรายละเอียดของเหตุการณ์เหล่านี้ มีดังนี้

1) การเคลื่อนที่ของน้ำจากชิ้นผลไม้ไปยังสารละลาย ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำออกไปจากชิ้นผลไม้ โดยอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชิ้นผลไม้จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

2) การเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายจากสารละลายไปยังชิ้นผลไม้ ทำให้เกิดการแพร่ของตัวถูกละลายเข้าไปในชิ้นผลไม้ เป็นผลให้ชิ้นผลไม้ได้รับของแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งตัวถูกละลายที่เข้าไปยังชิ้นผลไม้จะมีผลต่อกลิ่นรสและรสชาติของผลิตภัณฑ์ด้วย

3) การเคลื่อนที่ขององค์ประกอบต่างๆ ภายในชิ้นผลไม้ไปยังสารละลาย เช่น น้ำตาล กรดอินทรีย์ เกลือแร่ วิตามิน ซึ่งเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสองเหตุการณ์ข้างต้น

สำหรับการถ่ายโอนมวล (mass-transfer) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการออสโมซิสนั้น แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นเมื่อแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายออสโมติค
ที่มา : ดัดแปลงจาก Raoult-Wack (1994)

2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีออสโมซิส (ชูทวีป ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา 2542)

ในการลดปริมาณน้ำออกจากชิ้นผลไม้ด้วยวิธีออสโมซิส จะเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชิ้นผลไม้และการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายเข้าไปในชิ้นผลไม้รวมทั้งการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบต่าง ๆ ออกจากชิ้นผลไม้ด้วย ซึ่งอัตราการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวข้างต้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

2.1.1 คุณลักษณะของผลไม้

ทั้งนี้เนื่องจากมีชนิดของเซลล์ การจัดเรียงตัวของเซลล์ ช่องว่างระหว่างเซลล์ ชนิดของเนื้อเยื่อ และความอัดแน่นของเนื้อเยื่อต่างกัน นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของชิ้นผลไม้ก็มีผลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของน้ำและการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายด้วยเนื่องจากมีผลต่อพื้นที่ผิวของชิ้นผลไม้ที่จะสัมผัสกับสารละลายออสโมติค โดยขนาดและรูปร่างของชิ้นผลไม้ที่เอื้อต่อการสัมผัสกับสารละลายออสโมติคได้มากจะทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำและตัวถูกละลายเกิดขึ้นได้มากด้วย

2.1.2 การปฏิบัติต่อชิ้นผลไม้ก่อนการเข้าสู่กระบวนการ (pretreatment)

การปฏิบัติต่อชิ้นผลไม้ก่อนการเข้าสู่กระบวนการ เช่น การลวก (blanching) การแช่ซัลไฟท์ (sulphiting) การใช้กรด (acidification) จะทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชิ้นผลไม้ และการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายเข้าไปในชิ้นผลไม้สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเหลี่ยมมุมของเซลล์ลดลง ทำให้เส้นทางหรือช่องว่างระหว่างเซลล์คดเคี้ยวลดลง ทำให้น้ำและตัวถูกละลายเคลื่อนที่ผ่านได้ดีขึ้น

2.1.3 ชนิดและขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติค

Lerici and others (1985 อ้างถึงใน วนิดา สระทองคำ 2543) ได้ให้คำจำกัดความของสารออสโมติค (osmotic agent) ไว้ว่า "เป็นสารที่ใช้สำหรับเป็นตัวทำให้เกิดแรงเคลื่อนที่ออสโมซิส (osmotic force)" โดยปัจจัยในการเลือกใช้สารออสโมติค มีดังนี้

2.1.3.1 มีรสชาติดี ทำให้ผลไม้น่ารับประทาน

2.1.3.2 มีค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity) ต่ำ

2.1.3.3 มีแรงดันออสโมติคสูง

2.1.3.4 ไม่มีพิษ หาง่าย และราคาถูก

Osmotic agent ที่นิยมใช้ มี 3 ชนิด คือ

1) น้ำตาล ในการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสนั้นพบว่าผลของน้ำตาลที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ มี 2 ประการ คือ ผลในการยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอล ออกซิเดส (Polyphenol Oxidase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เร่งการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอ็นไซม์ (enzymatic browning) และป้องกันการสูญเสียกลิ่นรสที่ระเหยไปในระหว่างการทำแห้ง นอกจากนี้น้ำตาลยังทำให้เกิดความสมดุลกับรสชาติอื่นๆ เช่น รสเปรี้ยว รสเค็ม รสขม เป็นต้น และน้ำตาลที่ความเข้มข้นสูงๆ ยังสามารถยับยั้งการเติบโตของของจุลินทรีย์บางชนิดได้และป้องกันการเน่าเสียของอาหารได้ กล่าวคือความเข้มข้นของสารละลายจะไปลดปริมาณน้ำอิสระในอาหารและยังไปเพิ่มแรงดันออสโมติคทำให้ จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ด้วยเหตุนี้ผักและผลไม้ที่ผ่านการทำแห้งหลังดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสจึงสามารถเก็บไว้ได้นาน

2) กรด การเติมกรดลงไปในสารละลายออสโมซิสนั้นมีผลในการเพิ่มอัตราการออสโมซิส เมื่อใช้ซูโครสเป็นสารออสโมติค (osmotic agent) ร่วมกับกรดชนิดต่างๆ เช่น กรดแลคติก กรดซิตริก เป็นต้น การที่กรดไปช่วยเพิ่มอัตราการดึงน้ำออก เป็นเพราะกรดจะไปยับยั้งการเกิดเจลเมื่อได้รับความร้อนของสารประกอบเพคตินในผักผลไม้ นอกจากนี้กรดยังเป็นตัวช่วยเพิ่มกลิ่นและรส เนื่องจากจะไปมีผลต่อประสาทรับความรู้สึก กรดส่วนใหญ่ทำให้เกิดรสเปรี้ยว การเลือกใช้กรดนั้นต้องคำนึงกลิ่นรสที่ต้องการเป็นสำคัญ ส่วนใหญ่จะเลือกใช้กรดที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติในอาหารชนิดนั้นเป็นหลัก กรดยังช่วยถนอมอาหารและช่วยยืดอายุการเก็บรักษา (ศิวาพร ศิวเวช 2535 อ้างถึงใน วนิดา สระทองคำ 2543)

3) เกลือ พบว่า โซเดียมคลอไรด์มักใช้เตรียมเป็นสารละลายออสโมติคที่นิยมใช้ ในการทำแห้งผักด้วยวิธีออสโมซิส โดยอาจใช้เพียงชนิดเดียวหรือใช้ร่วมกับสารออสโมติคชนิดอื่นๆ เช่น น้ำตาล โดยปกติจะมีการใช้เกลือที่ความเข้มข้นร้อยละ 5-20 เนื่องจากเกลือมีความสามารถในการละลายต่ำและมีรสเค็ม ถ้าใช้ในปริมาณสูงจะทำให้รสชาติไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค การใช้เกลือทดแทนน้ำตาลบางส่วนจะช่วยลดต้นทุนการผลิตได้เนื่องจากเกลือมีราคาถูกและช่วยเพิ่มรสชาติให้กับอาหาร

ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติคจะมีผลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของน้ำและอัตราการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลาย โดยตัวถูกละลายที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในชิ้นผลไม้ได้ดีกว่าตัวถูกละลายที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่

2.1.4 ความแตกต่างของค่าชลศักย์ (water potential) ระหว่างชิ้นผลไม้กับสารละลายออสโมติค

ในกระบวนการออสโมซิสนั้น การเคลื่อนที่ของน้ำและสารละลายในกระบวนการออสโมซิสนั้นจะเกิดขึ้นได้จะต้องมีความแตกต่างของค่าชลศักย์ระหว่างชิ้นผลไม้กับสารละลายออสโมติค โดยค่าชลศักย์จะ

ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายออสโมติค เมื่อความเข้มข้นของสารละลายออสโมติคสูงขึ้นจะทำให้ค่าชลศักย์สูงขึ้นด้วยเป็นผลให้อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำและสารละลายเพิ่มขึ้น แต่เมื่อน้ำเคลื่อนที่ออกจากชิ้นผลไม้มายังสารละลายจะทำให้ความเข้มข้นลดลง ค่าชลศักย์ลดลง อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำและสารละลายลดลงด้วย

2.1.5 อุณหภูมิของสารละลายออสโมติค

เมื่ออุณหภูมิของสารละลายออสโมติคเพิ่มขึ้นอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำและตัวถูกละลายจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเกิดการพองตัว (swelling) และอ่อนตัว (plasticizing) ของเซลล์เมมเบรน รวมทั้งอุณหภูมิที่สูงทำให้ความหนืดของสารละลายออสโมติคลดลง ชิ้นผลไม้สามารถสัมผัสกับสารละลายได้ดีขึ้น น้ำจึงเคลื่อนที่ออกมาได้ดีขึ้น แต่อุณหภูมิที่จะใช้ไม่ควรสูงมากจนเกินไปเพราะอาจจะเกิดผลเสียต่อผลิตภัณฑ์ได้คือการเกิดสีน้ำตาลคล้ำเนื่องจากการได้รับความร้อนที่มากเกินไป

2.1.6 การสัมผัสกับสารละลายออสโมติค

การกวน (agitation) จะมีผลทำให้ชิ้นผลไม้สัมผัสกับสารละลายออสโมติคในบริเวณที่มีความหนืดสูงได้มากขึ้น และไม่เกิดการสะสมของน้ำที่เคลื่อนที่ออกมาอยู่รอบ ๆ ชิ้นผลไม้ ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติครอบ ๆ ชิ้นผลไม้ไม่ลดลงมากนัก ดังนั้นการเคลื่อนที่ของน้ำและตัวถูกละลายจะเกิดได้อย่างต่อเนื่อง

2.1.7 ระยะเวลาในการแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายออสโมติค

อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชิ้นผลไม้และการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายเข้าไปในชิ้นผลไม้ จะเกิดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่แช่ในสารละลายออสโมติค จนถึงสภาวะสมดุลของน้ำหรือตัวถูกละลายนั้น โดยอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชิ้นผลไม้จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียลตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้วคงที่

2.1.8 ความดันที่ใช้ในกระบวนการ

ความดันที่เลือกใช้ในกระบวนการออสโมซิสมีผลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของน้ำและการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายเช่นกัน โดยที่ความดันต่ำ ๆ เช่น สุญญากาศ จะทำให้อัตราการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวสูงขึ้นเนื่องจากไอน้ำระเหยได้ง่าย ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายค่อนข้างคงที่ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของน้ำและตัวถูกละลายจึงเกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอ

การลดปริมาณน้ำบางส่วนด้วยวิธีออสโมซิส มีปัจจัยต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องมากมายและแต่ละปัจจัยมีผลต่อการเคลื่อนที่ของน้ำและตัวถูกละลายแตกต่างกัน บางปัจจัยสามารถควบคุมได้ง่าย บางปัจจัยควบคุมได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการนี้แล้ว การเลือกใช้ปัจจัยที่สามารถลดปริมาณน้ำได้เป็นปริมาณมากควรเป็นปัจจัยที่ถูกเลือกมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามความเหมาะสมทางด้านเศรษฐกิจและความสะดวกในการปฏิบัติเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเช่นกัน

3. การแช่เยือกแข็งอาหาร

การแช่เยือกแข็งอาหารเป็นกระบวนการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ซึ่งเป็นผลให้น้ำในอาหารส่วนใหญ่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ทำให้น้ำนั้นไม่สามารถเคลื่อนที่และไม่ทำหน้าที่ต่าง ๆ ใน ปฏิกิริยาเคมี สารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น เซลล์หรือเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำเนิน

กิจกรรมทางเคมีและชีวเคมีไปได้ตามปกติ รวมทั้งเซลล์ของจุลินทรีย์ที่ติดมาก็จะชะงักการเจริญเติบโตและหยุดกระบวนการทางเมแทบอลิซึม อย่างไรก็ตามการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสมจะทำให้คุณค่าทางอาหารและลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหารเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก กระบวนการแช่เยือกแข็งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การแช่เยือกแข็ง (Freezing step) การเก็บรักษาในสภาพแช่เยือกแข็ง (frozen storage) และการละลายน้ำแข็ง (Thawing step) (อรพิน ชัยประสพ 2546)

3.1 ขั้นตอนการแช่เยือกแข็งอาหาร (Fellows 1990)

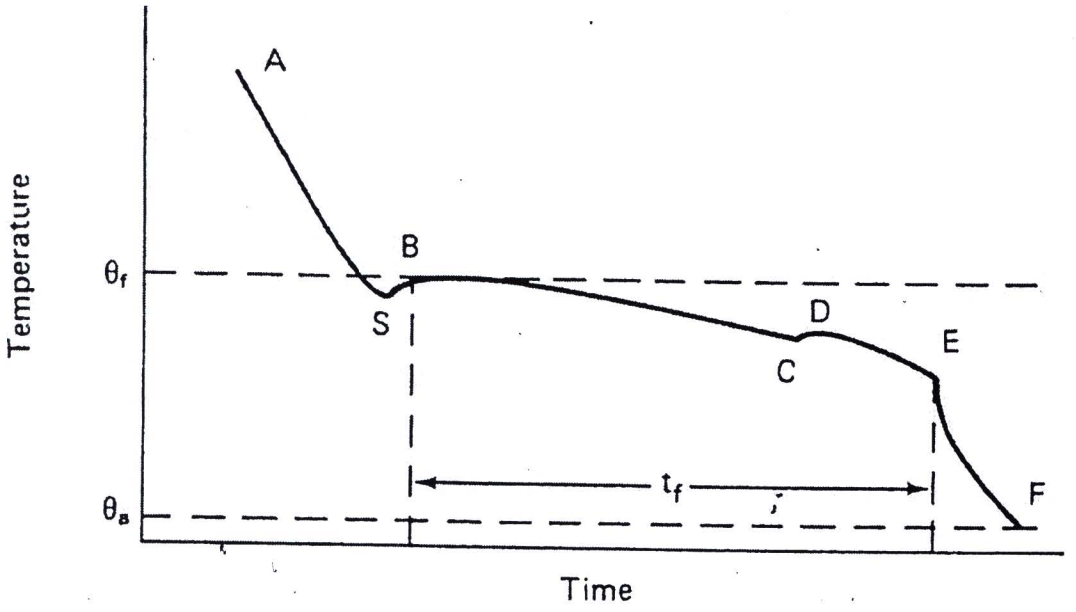
ในระหว่างการแช่เยือกแข็งนั้นขั้นแรกจะต้องกำจัดความร้อนที่มีอยู่ในอาหาร (sensible heat) ออกเสียก่อนเพื่อลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำลงจนถึงจุดเยือกแข็งจากนั้นจะต้องกำจัดความร้อนแฝงของการเกิดผลึก (latent heat of crystallization) ออก ในบางครั้งก็ต้องกำจัดความร้อนที่เกิดจากการหายใจออกเช่นกัน ความร้อนทั้งหมดที่ต้องกำจัดออกนี้เรียกว่า "heat load" ซึ่งมีความสำคัญในการกำหนดขนาดของอุปกรณ์แช่เยือกแข็งที่ถูกต้องสำหรับอัตราการผลิตหนึ่งๆ

อาหารส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำจำนวนมาก ซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะและมีความร้อนแฝงของการเกิดผลึกสูงด้วย ดังนั้นในระหว่างการแช่เยือกแข็งจำเป็นต้องกำจัดความร้อนออกจากอาหารอย่างมาก สำหรับความร้อนแฝงขององค์ประกอบอื่นๆของอาหาร เช่น ไขมันก็ต้องถูกกำจัดออกเช่นกันก่อนที่ไขมันจะแข็งตัว แต่อย่างไรก็ตามมักพบว่าในอาหารส่วนใหญ่องค์ประกอบอื่นๆ จะมีน้อยดังนั้นความร้อนแฝงของการเกิดผลึกขององค์ประกอบเหล่านั้น (ที่ไม่ใช่น้ำ) ที่ต้องดึงออกจึงน้อย

ดังนั้นความร้อนที่ต้องกำจัดออกในระหว่างการ แช่เยือกแข็งอาหารคือ

1) ความร้อนที่มีอยู่ในอาหาร
2) ความร้อนที่เกิดจากการหายใจหรือเมแทบอลิซึมของอาหาร
3) ความร้อนแฝงของการเกิดผลึกของน้ำและองค์ประกอบอื่นๆ

ถ้าในการแช่เยือกแข็งมีการติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดที่เย็นตัวช้าที่สุด (Thermal centre of food) ของอาหารในระหว่างที่มีการดึงความร้อนออก จะได้กราฟของการแช่เยือกแข็งดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งจากกราฟจะแบ่งออกเป็น 6 ช่วง ดังนี้



ภาพที่ 2 กราฟการแช่เยือกแข็งของอาหาร

ที่มา : Fellows (1990)

1) ช่วง AS อาหารจะถูกทำให้เย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (θ_f) ซึ่งปกติแล้วมักจะต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส (ยกเว้นน้ำบริสุทธิ์) ที่จุด "S" น้ำยังคงเป็นของเหลวอยู่แม้ว่าอุณหภูมิของอาหารจะต่ำกว่าจุดเยือกแข็งก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเย็นตัวยิ่งยวด (Super cooling) ซึ่งอาจจะเกิดได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งถึง 10 องศาเซลเซียส

2) ช่วง SB อุณหภูมิของอาหารจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดเยือกแข็ง (freezing point) ทั้งนี้เพราะเริ่มมีการเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นมาและมีการปลดปล่อยความร้อนแฝงของการเกิดผลึกของน้ำออกมา

3) ช่วง BC ความร้อนจะถูกดึงออกจากอาหารด้วยอัตราคงเดิม แต่ความร้อนที่ดึงออกในช่วงนี้ยังเป็นความร้อนแฝงของการเกิดผลึกเพราะในช่วงนี้ยังมีการเติบโตของผลึกน้ำแข็ง (crystal growth) ดังนั้น อุณหภูมิของอาหารยังคงเกือบจะคงที่ จากนั้นอุณหภูมิของอาหารจะค่อยๆ ลดลงอีกเล็กน้อยเนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของเหลวส่วนที่ยังไม่แข็งตัว ช่วง BC นี้เป็นขั้นตอนที่น้ำส่วนใหญ่ในอาหารกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง

4) ช่วง CD เป็นช่วงที่ตัวถูกละลายตัวหนึ่งที่มีอยู่ในอาหารเกิดการอิ่มตัวยวดยิ่ง (supersaturated) และตกผลึกออก ดังนั้นจึงมีการปลดปล่อยความร้อนของการตกผลึกของตัวถูกละลายออกมาจึงทำให้อุณหภูมิของอาหารสูงขึ้นถึงอุณหภูมิจุดยูเทคติค (Eutectic temperature) ของตัวทำละลาย (จุด D)

5) ช่วง DE ช่วงนี้จะยังเกิดผลึกของน้ำ (ส่วนน้อยที่ยังหลงเหลืออยู่ในอาหาร) และผลึกของตัวถูกละลายต่างๆ ต่อไปสำหรับเวลาจากจุด B ถึงจุด E (t_f) จะขึ้นกับอัตราการดึงความร้อนออกจากอาหาร

6) ช่วง EF อุณหภูมิของของผสมระหว่างน้ำแข็งและน้ำเหลวจะลดลงจนถึงอุณหภูมิของตู้แช่เยือกแข็ง

โดยทั่วไปพบว่าในการแช่เยือกแข็งจะยังคงมีน้ำส่วนหนึ่งในอาหารที่ยังคงไม่แข็งตัวหรือยังไม่เป็นผลึกน้ำแข็ง ซึ่งปริมาณน้ำส่วนนี้จะมากหรือน้อยแค่ไหนจะขึ้นกับชนิดและองค์ประกอบของอาหาร รวมทั้งอุณหภูมิในการเก็บอาหารแช่เยือกแข็งด้วย ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิขณะเก็บเป็น -20 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำที่กลายเป็นน้ำแข็งในเนื้อแกะจะมีค่าเป็นร้อยละ 88 ในปลาจะเป็นร้อยละ 91 และในไข่ขาวจะเป็นร้อยละ 93

ในขั้นตอนการแช่เยือกแข็งนั้นจะมีการเกิดผลึกของน้ำ (water crystallization) ซึ่งก็คือ การรวมตัวกันอย่างมีระเบียบในส่วนที่เป็นของแข็ง (solid phases) ที่เกิดจากน้ำหรือสารละลายอื่นที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งปรากฏการณ์การเกิดผลึกของน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากผ่านการเย็นตัวยิ่งยวดไปแล้ว ปรากฏการณ์การเกิดผลึกของน้ำประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อยๆคือ (1) การเกิดนิวเคลียสของผลึก (Nucleation) และ (2) การเติบโตของผลึกน้ำแข็ง (ice crystal growth) (อรพิน ชัยประสพ 2546)

การเกิดนิวเคลียส คือ ปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของน้ำมารวมตัวกันอย่างมีระเบียบ เกิดเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ ซึ่งมีขนาดใหญ่พอที่จะคงอยู่ได้ หรือเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการเพิ่มขนาดหรือการเติบโตของผลึกน้ำแข็งในขั้นต่อไป สำหรับกลไกการเกิดนิวเคลียสยังไม่ทราบแน่ชัด แต่สันนิษฐานว่า เกิดจากโมเลกุลของน้ำมารวมตัวกันอย่างมีระเบียบจนมีขนาดใหญ่พอที่จะเป็นนิวเคลียสของผลึกได้ (อรพิน ชัยประสพ 2546)

การเกิดนิวเคลียสนั้นเกิดขึ้นยาก ต้องลดอุณหภูมิให้ต่ำมากๆ จนถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเย็นตัวยิ่งยวดของอาหาร สำหรับอัตราการเกิดนิวเคลียส จะขึ้นกับ อุณหภูมิของตัวกลางทำความเย็น อัตราการแช่เยือกแข็ง และขนาดของตัวอย่าง (อรพิน ชัยประสพ 2546)

3.1.1 ขนาดผลึกของน้ำแข็ง (อรพิน ชัยประสพ 2546)

ขนาดผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในอาหารแช่เยือกแข็ง มีความสำคัญต่อคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง การที่น้ำในอาหารเป็นผลึกน้ำแข็ง ก่อให้เกิดปัญหาที่ไม่ต้องการมากมาย ดังนั้นถ้าสามารถทำให้น้ำในอาหารไม่เปลี่ยนเป็นน้ำแข็ง ที่อุณหภูมิต่ำใกล้จุดเยือกแข็งของอาหารได้จะดีมาก แต่ในปัจจุบันทำได้เพียงควบคุมให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กที่สุด ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในการแช่เยือกแข็ง จะมีขนาดใหญ่หรือเล็กจะขึ้นอยู่กับนิวเคลียสของผลึกที่เกิดขึ้น ถ้านิวเคลียสของผลึกมีขนาดเล็ก และมีจำนวนมาก ขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ได้ก็จะมีขนาดเล็กแต่มีจำนวนมากด้วยเช่นกัน การแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว จะได้ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก และมีจำนวนมาก แต่ถ้าทำการแช่เยือกแข็งอย่างช้าๆ จะได้ผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ และมีจำนวนน้อย ดังนั้นขนาดของผลึกที่ได้จึงขึ้นกับอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง

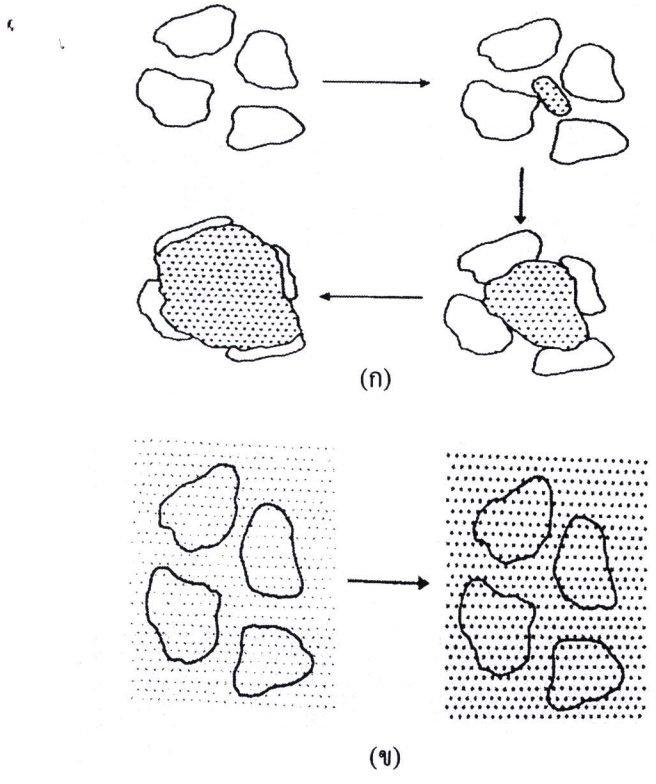
3.1.2 ตำแหน่งของผลึกน้ำแข็ง

ในการแช่เยือกแข็งนั้นพบว่าตำแหน่งของผลึกน้ำแข็งในเซลล์และสารแขวนลอยในผลิตภัณฑ์อาหารเป็นสิ่งสำคัญ ตำแหน่งของผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นภายในหรือภายนอกเซลล์ ขึ้นอยู่กับ อัตราการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิของตัวอย่าง และธรรมชาติของเซลล์

โดยปกติการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์อาหารจะเกิดนิวเคลียสผลึกขึ้นภายนอกเซลล์ก่อน ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเซลล์เพิ่มขึ้น เกิดความแตกต่างระหว่างความดันไอภายนอกและภายในเซลล์ ความดันไอภายในสูงกว่า จะดันให้น้ำซึมผ่านผนังเซลล์ออกสู่ภายนอก ถ้าอัตราแช่เยือกแข็งเป็นแบบช้า ซึ่งกินเวลานาน น้ำภายในเซลล์สามารถเคลื่อนที่ออกมาอยู่ภายนอกเซลล์เรื่อยๆ และเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ภายนอกเซลล์ซึ่ง จะเบียดและทำลายเซลล์ เซลล์สูญเสียน้ำ หดตัวมีขนาดเล็กลง และอาจเกิดลักษณะเหี่ยวย่น

ผลิตภัณฑ์อาหารมีคุณภาพต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 3 (ก) แต่ถ้าใช้อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูงมากการแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลาสั้นๆ การเคลื่อนที่ของน้ำออกจากเซลล์มีน้อยผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นทั้งภายในภายนอกเซลล์ ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอกระจายอยู่ทั่วไป เซลล์ไม่เกิดการหดตัว และมีรูปร่างไม่ต่างจากเซลล์ก่อนการแช่เยือกแข็งดังภาพที่ 3 (ข) ลักษณะปรากฏของอาหารจะใกล้เคียงกับของสด และมีคุณภาพสูงกว่าอาหารที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า

อาหารที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าเมื่อผ่านการคืนรูป โดยการทำให้ผลึกน้ำแข็งละลายจะสูญเสียน้ำที่อยู่ภายนอกเซลล์ไป น้ำเหล่านี้ไม่สามารถกลับเข้าไปภายในเซลล์ได้อีก แต่ปัญหาเหล่านี้จะไม่เกิดขึ้น หรือเกิดน้อยมากในอาหารเยือกแข็งแบบเร็ว



ภาพที่ 3 ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในการแช่เยือกแข็ง (ก) การแช่เยือกแข็งแบบช้า (ข) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว
ที่มา : Fellows (1990)

3.1.3 อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็ง (สุวรรณ วิรัชกุล 2528)

อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งนับเป็นเรื่องสัมพันธ์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งมีหลายลักษณะ ได้แก่ การแช่เยือกแข็งแบบช้า การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว การแช่เยือกแข็งแบบเร็วมาก

สำหรับการพิจารณาอัตราการแช่เยือกแข็งมักพิจารณาจากความเร็วของการเกิดผิวหน้าน้ำแข็ง (Velocity of Ice Front) ที่เคลื่อนที่เข้าไปจากผิวนอกของผลิตภัณฑ์ เป็นหน่วยระยะทางต่อเวลา (เซนติเมตรต่อชั่วโมง) เช่น ถ้าผิวหน้าน้ำแข็งเกิดด้วยความเร็ว 0.1-0.3 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ถือว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ถ้าผิวหน้าน้ำแข็งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.3-1 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ถือว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งปกติ ถ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1-10 เซนติเมตรต่อชั่วโมง จัดเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ววิธีนี้สามารถวัดอัตราการแช่เยือกแข็งได้ค่อนข้างถูกต้อง

นอกจากนี้แล้วอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งอาจพิจารณาจากตำแหน่งที่เกิดผลึกน้ำแข็ง ถ้าเป็นการแช่เยือกแข็งแบบช้าจะเกิดนอกเซลล์แต่ถ้าเป็นการแช่เยือกแข็งแบบเร็วผลึกน้ำแข็งจะเกิดในเซลล์ด้วย ดังนั้นอัตราส่วนของผลึกน้ำแข็งนอกเซลล์และในเซลล์ อาจจะเป็นดัชนีที่ชี้อัตราของการแช่เยือกแข็งได้เป็นอย่างดีเช่นกัน

3.2 การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งในสภาพแช่เยือกแข็ง (Frozen storage) (Karel and others 1975)

ปกติผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วจะถูกเก็บที่ห้องเก็บซึ่งมีอุณหภูมิ –18 ถึง –20 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะที่ยังมีน้ำบางส่วนที่ไม่ได้กลายเป็นผลึกน้ำแข็งคงเหลืออยู่ ดังนั้นในขณะเก็บผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิช่วงดังกล่าวจึงยังคงมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพเกิดขึ้นซึ่งจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลงแต่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางจุลินทรีย์เพราะว่าที่อุณหภูมิระดับนี้จุลินทรีย์ต่างๆไม่สามารถที่จะเจริญเติบโตได้ดังนั้นถ้าเก็บผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งไว้ที่ –18 องศาเซลเซียส จะไม่มีปัญหาการเน่าเสียเนื่องจากจุลินทรีย์

3.2.1 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บในสภาพแช่เยือกแข็ง (Karel and others 1975)

3.2.1.1 การสูญเสียน้ำในรูปน้ำแข็งออกจากผลิตภัณฑ์ (Desiccation)

เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลือบผิว (glazing) ตัวอย่างแช่เยือกแข็งที่ไม่ดีหรือเก็บในภาชนะบรรจุที่ไม่ดี หรืออุณหภูมิภายในห้องเก็บไม่สม่ำเสมอ การเปลี่ยนแปลงนี้นอกจากจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพด้อยลงแล้วยังทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียน้ำหนักไปด้วย ถ้ามีการระเหิดของผลึกน้ำแข็งออกจากผลิตภัณฑ์มากจนทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์แห้งและแข็งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “freezer burn”

ตัวอย่างที่มักเกิดปัญหาเรื่องการสูญเสียน้ำในรูปน้ำแข็งออกจากผลิตภัณฑ์เสมอได้แก่ปลาแช่เยือกแข็งทั้งตัว ถ้าเกิดการระเหิดของน้ำแข็งออกจากเนื้อปลาแล่เป็นชิ้น (fillet) จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อที่ไม่เรียบ สีขุ่น ถ้าแห้งมากอาจมีรูพรุน ผิวปลาถึงกับเป็นสีขาวที่เรียกว่า chalk-white appearance

การลดการสูญเสียน้ำในรูปน้ำแข็งออกจากผลิตภัณฑ์ ทำได้โดย

1) มีการเคลือบผิวที่ดีซึ่งจะทำให้ได้ชั้นของการเคลือบที่หนาพอและสม่ำเสมอ เมื่อมีการสูญเสียน้ำพบว่าส่วนนอกสุดคือชั้นที่มีการเคลือบจะระเหิดก่อนดังนั้นการสูญเสียน้ำของผลิตภัณฑ์จึงลดลงถ้าเก็บผลิตภัณฑ์ไว้เป็นเวลานาน อาจมีเคลือบซ้ำ (Re-glazing)

2) การบรรจุในภาชนะที่เหมาะสม (proper packaging) จะช่วยลดการสูญเสียน้ำในรูปน้ำแข็งจากผลิตภัณฑ์ได้ ยิ่งถ้ามีการเคลือบผิวของของผลิตภัณฑ์ชั้นหนึ่งก่อนแล้วบรรจุในภาชนะจะช่วยป้องกันได้ดีขึ้น

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 28 มิ.ย. 2555
เลขทะเบียน 247083
เลขเรียกหนังสือ

วัสดุที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการระเหยของน้ำได้ดีคือ Polyethylene Polyester Polypropylene ส่วนพวก Vinyl Polystyrene และ cellulose acetate มีคุณสมบัติที่ยอมให้ไอน้ำผ่านได้มากจึงควรเลี่ยงการนำมาใช้หรือทำภาชนะบรรจุ

3) ควบคุมสภาพในห้องเก็บให้เหมาะสม (Proper frozen storage practice) สภาพภายในห้องเย็น (Storage room) ควรมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของห้องและอุณหภูมิน้ำยาเครื่องเย็นน้อยที่สุดจะช่วยป้องกันการระเหิดของน้ำแข็งได้ดี ซึ่งอาจทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ของขดท่อความเย็น (Evaporator) ให้เพียงพอที่จะสามารถลดอุณหภูมิของอากาศได้เพียงพอ นอกจากนั้นภายในห้องเก็บควรมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สูงพอเหมาะ มีการหมุนเวียนของอากาศน้อย และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องเก็บน้อยที่สุด

นอกจากการสูญเสียน้ำระหว่างการเก็บรักษาแล้วยังพบว่าผลึกน้ำแข็งเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Recrystallization) ซึ่งทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง โดยทั่วไปแล้วสามารถป้องกันการจัดเรียงตัวใหม่ของผลิตน้ำแข็งได้ด้วยการเก็บที่อุณหภูมิต่ำ ที่คงที่และเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ในช่วงเวลาสั้น

3.2.1.2 การตกผลึกใหม่ (Recrystallization) (Karel and others 1975)

การที่จะควบคุมขนาดและรูปร่างของผลึกทำได้ค่อนข้างง่ายถ้าผลึกที่เกิดขึ้นมีความคงตัว แต่ความเป็นจริงผลึกเหล่านั้นจะไม่คงตัวในระหว่างการเก็บแบบแช่เยือกแข็ง (Frozen storage) แต่ผลึกเหล่านั้นจะเกิดการเปลี่ยนรูปขึ้นซึ่งหมายความว่ามีการตกผลึกใหม่เกิดขึ้น

ดังนั้นการตกผลึกใหม่จึงหมายถึง การเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกิดขึ้นกับจำนวน ขนาด รูปร่าง การจัดเรียงตัวหรือความสมบูรณ์ของผลึก หลังจากที่ได้ผ่านการกลายเป็นผลึกที่สมบูรณ์แล้ว อัตราการเกิดการตกผลึกใหม่จะขึ้นกับ อุณหภูมิของห้องเก็บและธรรมชาติของตัวอย่าง เช่น อัตราการตกผลึกใหม่ของน้ำแข็งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของห้องเก็บลดลง หรือปริมาณของส่วนประกอบที่ไม่ใช่น้ำเพิ่มขึ้น การตกผลึกใหม่มีหลายประเภทได้แก่

1) Isomass Recrystallization

หมายถึงการเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกิดบนผิวหน้าหรือภายในโครงสร้างของผลึกแต่ละอันที่มีน้ำหนักคงที่การตกผลึกใหม่แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อผลึกมีรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular shape) และเมื่ออัตราส่วนของผิวหน้าต่อปริมาตรมีค่ามาก (large surface to volume ratio)

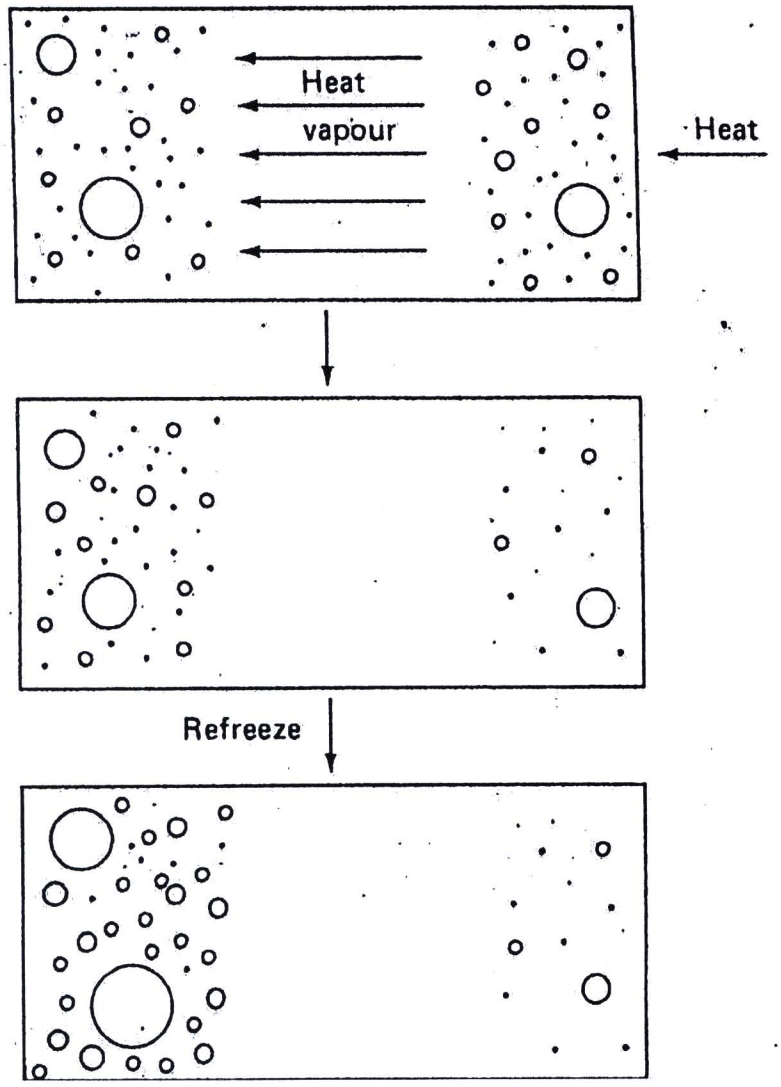
2) Migratory Recrystalliztion

เป็นลักษณะที่ผลึกขนาดใหญ่ขยายขนาดขึ้นจากการใช้ผลึกที่เล็กกว่าเป็นผลให้ขนาดเฉลี่ยของผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น จำนวนผลึกลดลงในสภาพที่อุณหภูมิและความดันคงที่พบว่าการเกิด Migratory recrystallization เป็นผลมาจากความแตกต่างของพลังงานผิวหน้า (surface energy) ระหว่างผลึกขนาดใหญ่และผลึกขนาดเล็กนั่นคือผลึกที่มีขนาดเล็กจะมีรัศมีส่วนโค้งน้อยกว่าจึงไม่สามารถจับโมเลกุลที่ผิวหน้า (Surface molecule) ได้แน่นเท่ากับผลึกขนาดใหญ่ ดังนั้นผลึกขนาดเล็กจึงมีคุณสมบัติในการละลายสูงกว่าผลึกขนาดใหญ่

ส่วนสภาวะที่อุณหภูมิในห้องเก็บไม่คงที่นั้นพบว่าการตกผลึกใหม่แบบนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเฉพาะเมื่อตัวอย่างอาหารแช่เยือกแข็งมีผลึกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 ไมครอนอยู่เป็นจำนวนมากและผลึกอยู่ ณ บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ (ความดันไอจะต่ำด้วย) จะขยายขนาดขึ้นจากการใช้ผลึก

น้ำแข็งที่อยู่ ณ บริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นในบริเวณที่มีความดันไอสูงผลึกขนาดเล็กๆบางส่วนจะหายไปอย่างสมบูรณ์ในขณะที่ผลึกขนาดใหญ่จะมีขนาดลดลงส่วนในบริเวณที่มีความดันไอต่ำขนาดของผลึกน้ำแข็งจะขยายใหญ่ขึ้น

ภาพที่ 4 แสดงการเกิด Migratory Recrystalliztion เมื่อเกิดความแตกต่างของความดันไอในอาหารแช่เยือกแข็ง



ภาพที่ 4 การตกผลึกใหม่แบบ migratory recrystallization

ที่มา : Fellows (1990)

3) Accretive Recrystallization

เป็นการเกิดการตกผลึกใหม่ ที่เกิดจากผลึกน้ำแข็งที่อยู่ใกล้กันหรือสัมผัสกันสามารถหลอมรวมเข้าด้วยกันทำให้ขนาดของผลึกใหญ่ขึ้นแต่จำนวนผลึกน้อยลง ในตัวอย่างอาหาร

แช่เยือกแข็งโดยทั่วไปมักจะมีน้ำแข็งจำนวนมาก และการสัมผัสกันระหว่างผลึกน้ำก็มีมากพอที่จะทำให้เกิดการตกผลึกใหม่แบบนี้ขึ้นได้

4) Pressure-induced Recrystallization

เป็นการตกผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำกับกลุ่มของผลึก (Group of crystal) ทำให้ผลึกเหล่านั้นมีการจัดเรียงตัวในแนวราบไปในทิศทางเดียวกับแรง และจากนั้นผลึกเหล่านี้ก็จะขยายขนาดโตขึ้น โดยใช้ผลึกที่จัดเรียงตัวในทิศทางอื่น

การตกผลึกใหม่แบบนี้ทำให้ขนาดของผลึกใหญ่ขึ้นแต่จำนวนผลึกลดลง และมีการจัดเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของแรง การตกผลึกใหม่แบบนี้มีโอกาสเกิดขึ้นเมื่อตัวอย่างได้รับความดัน ซึ่งอาจปรากฏขึ้นในระหว่างการแช่เยือกแข็ง

5) Irruptive Recrystallization

สำหรับตัวอย่างที่มีขนาดหรือจำนวนเล็กน้อย โดยเฉพาะพวกที่มีปริมาณน้ำน้อยเมื่อถูกนำมาแช่เยือกแข็งในลักษณะที่มีอัตราการแช่เยือกแข็งสูงมากๆ (ultra rapid rate) จะทำให้ตัวอย่างกลายเป็นของแข็งโดยที่ยังไม่ผ่านสภาวะตกผลึกเมื่อนำตัวอย่างไปอุ่น (warm) จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง (ซึ่งขึ้นกับคุณลักษณะของตัวถูกละลายที่มีอยู่) การตกผลึกใหม่จะเกิดขึ้นทันที (Crystallization resume abruptly) สำหรับกลไกการเกิดผลึกใหม่แบบนี้ยังไม่ทราบแน่ชัดการตกผลึกใหม่แบบนี้จะไม่เกิดขึ้นกับอาหารแช่เยือกแข็งในเชิงการค้าเพราะว่าอาหารจะมีน้ำมากและมีอัตราการแช่เยือกแข็งที่ต่ำกว่า

ในบรรดาการตกผลึกใหม่ทั้งหมดนั้นพบว่า Migratory recrystallization เป็นการตกผลึกใหม่หลักที่เกิดขึ้นในอาหารแช่เยือกแข็งและมักจะถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะเก็บรักษา สำหรับการลดการเกิดผลึกใหม่ ทำได้โดยการเก็บอาหารแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำๆ ที่คงที่ (maintaining a low, constant storage temperature)

3.3 การละลายน้ำแข็งออกจากอาหารแช่เยือกแข็ง (ธนะบูลย์ สัจจาอนันตกุล 2533)

การแช่เยือกแข็งคือ การดึงความร้อนในอาหารออกให้เกิดน้ำแข็ง ส่วนการละลาย (Thawing) คือการให้ความร้อนแก่อาหารเพื่อให้น้ำแข็งละลาย ดังนั้น กระบวนการทั้งสองคือ การย้อนกลับกัน อย่างไรก็ตามตามธรรมชาติแล้วการละลายอาหารแช่เยือกแข็งจะใช้เวลานานกว่าการแช่เยือกแข็งอาหารซึ่งก็สามารถอธิบายได้จากคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำและน้ำแข็ง โดยปกตินำ้แข็งมีคุณสมบัติในการเป็นตัวนำความร้อน (Thermal Conductivity) ได้ดีกว่าน้ำถึง 4 เท่า และยังมีคุณสมบัติในการกระจายความร้อน (Thermal Diffusivity) ดีกว่าน้ำถึง 9 เท่า ดังนั้น น้ำแข็งนั้นจึงสามารถส่งผ่านความร้อน และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้เร็วกว่าน้ำเหลวที่ไม่มีการเคลื่อนที่

การละลายน้ำแข็งจะเกิดขึ้นในบริเวณผิวหน้าอาหารก่อน ดังนั้น ในวินาทีแรกที่อาหารแช่เยือกแข็งได้รับความร้อนที่ผิวหน้า ความร้อนนั้นจะถูกส่งผ่านเข้าไปในบริเวณผิวหน้าของอาหารแช่เยือกแข็งได้อย่างรวดเร็ว จึงเห็นว่าการละลายที่ผิวหน้าอาหารเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อผิวหน้าเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำ น้ำก็จะทำให้การส่งผ่านความร้อนเข้าไปในอาหารแช่เยือกแข็งได้ช้าลงและใช้เวลาเพิ่มขึ้น (กว่าจะส่งผ่านความร้อนไปถึงชั้นน้ำแข็งได้และให้ความร้อนแฝงแก่น้ำแข็ง) นั่นก็คือ สาเหตุว่าทำไมการละลายอาหารแช่แข็งถึงใช้เวลานานกว่า

การแช่เยือกแข็ง และบ่อยๆ ครั้งที่สังเกตดูจากภายนอกว่าการละลายดีแล้ว แต่เมื่อผ่าลงไปในอาหารนั้นกลับพบว่าภายในยังคงเป็นน้ำแข็งอยู่

ในทางตรงกันข้ามการแช่เยือกแข็งเกิดจากผิวหน้า เมื่อสามารถทำให้ผิวหน้าเกิดน้ำแข็งได้ น้ำแข็งจะช่วยในการส่งผ่านและกระจายความร้อนจากภายในอาหารออกมาที่ผิวได้เร็วขึ้น การเกิดน้ำแข็งที่หนาขึ้น จึงช่วยให้อาหารภายในแข็งตัวเร็วขึ้น

วิธีการละลายอาหารแช่เยือกแข็งที่เหมาะสมคือวิธีที่เร็ว (Fast Thawing) แต่อุณหภูมิไม่สูงเกินไปจนเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวหน้าหรือในอาหารสามารถเจริญได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งปัญหาในข้อหลังจะหมดหากสามารถนำอาหารไปปรุงผ่านความร้อนที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ และบริโภคหมด แต่หากต้องการละลายเพื่อนำไปใช้แปรรูปต่อหรือรับประทานสด หรือเหลือบริโภคแล้วเก็บต่อ การระวังในจุดนี้เป็นหนึ่งในจุดวิกฤต (Critical Point) ของกระบวนการผลิตเพื่อมิให้เกิดการปนเปื้อนซ้ำ (Recontamination) ของจุลินทรีย์ ดังนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการละลายอาหารแช่เยือกแข็งในด้านของผู้ผลิตคือ ความเหมาะสมของเวลาและอุณหภูมิ

การละลายที่ใช้เวลาสั้นหรือ Fast Thawing โดยทั่วไปจะให้อาหารที่มีคุณภาพดีกว่าการใช้เวลานาน ทั้งนี้เพราะการที่อาหารแช่เยือกแข็งมีอุณหภูมิอยู่ที่จุดต่ำกว่าจุดเยือกแข็งเพียงเล็กน้อย (Subfreezing temperature) ซึ่งเป็นช่วงเวลาส่วนใหญ่ของการละลาย จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มีผลเสีย คือ

1) การเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่ (Recrystallization) ที่ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งสามารถทำลายเนื้อเยื่อ โครงสร้าง และเนื้อเยื่อสัมผัสของอาหารได้

2) การเกิดปฏิกิริยาเคมีในอัตราที่สูงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีผลเสียต่อ สี กลิ่น รส และคุณค่าทางอาหารมีผลให้เกิดการปรับตัวและเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บางชนิดด้วย

3.4 สาเหตุของการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง (อรพิน ชัยประสพ 2546)

ในขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง การเก็บรักษาในสภาพแช่เยือกแข็งและการทำให้น้ำแข็งละลาย ล้วนแต่มีผลต่อคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการของการแช่เยือกแข็ง จะเป็นแนวทางในการหาวิธีการที่สามารถควบคุมกระบวนการของการแช่เยือกแข็งเพื่อให้ได้อาหารแช่เยือกแข็งที่มีคุณภาพสูงตามความต้องการได้

สาเหตุที่ทำให้อาหารแช่เยือกแข็งเสื่อมคุณภาพ สามารถแบ่งแยกได้ ดังนี้

1) การเปลี่ยนแปลงระหว่างการแช่เยือกแข็ง การดึงความร้อนออกจากอาหารที่แช่เยือกแข็งทำให้มีผลเกิดขึ้นสองประการคือ ทำให้อุณหภูมิของอาหารลดลง และมีการเปลี่ยนสถานะของน้ำเป็นน้ำแข็ง ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง ดังนี้

1.1) สาเหตุจากการลดอุณหภูมิโดยไม่มีการเปลี่ยนสถานะ จะทำให้เกิด

1.1.1) การสะท้านหนาว (Chilling injury) คือความเสียหายที่เกิดกับสิ่งที่มีชีวิตเมื่อเก็บในที่มีอุณหภูมิต่ำมากแต่ยังไม่ถึงจุดเยือกแข็ง เช่น กล้วย สับปะรด และผลไม้ในเขตร้อน ที่มีอุณหภูมิเหมาะสมในการเก็บรักษาซึ่งอยู่เหนือจุดเยือกแข็งขึ้นมามาก

1.1.2) การช็อคด้วยความร้อน (Thermal shock) เกิดจากการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วแต่อยู่เหนือกว่าจุดเยือกแข็ง จะทำให้เซลล์เป็นอันตรายได้ แต่โดยทั่วไปอัตราการลดอุณหภูมิถึงขั้นทำให้

เกิดการช็อคด้วยความร้อน อยู่ในช่วงที่มากเกินกว่าในช่วงที่ต้องการใช้กับอาหาร ฉะนั้นความเสียหายที่เกิดขึ้นจากสาเหตุนี้จึงมีน้อยมาก

1.2) สาเหตุจากการเปลี่ยนสถานะ จะมีผลต่อคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งเช่นกัน สามารถแบ่งได้เป็น

1.2.1) การทำลายเชิงกล (Mechanical damage) เกิดจากการเปลี่ยนปริมาตรระหว่างการแช่เยือกแข็ง น้ำจะขยายตัวในขณะที่สารอื่นหดตัว สารที่มีน้ำในปริมาณสูง แต่มีอากาศภายในเซลล์น้อยจะทำให้เห็นการขยายตัวได้อย่างชัดเจน ในขณะที่สารที่มีน้ำในปริมาณต่ำและมีอากาศภายในเซลล์มาก จะมีการขยายตัวน้อย ตัวถูกละลายจะมีอิทธิพลต่อการขยายตัวเช่นกัน โดยจะไปรวมตัวกับน้ำ หรือทำให้จุดเย็นยิ่งยวดยาวนานขึ้น อันเป็นผลทำให้ปริมาณของน้ำซึ่งจะเปลี่ยนสถานะระหว่างการแช่เยือกแข็งน้อยลง การขยายตัวหรือการหดตัวดังกล่าวจะมีผลทำให้เกิดความเสียหายได้

ชนิดและปริมาณการเกิดความเสียหายเชิงกลจะขึ้นกับลักษณะของอาหารและอัตราเร็วของการการแช่เยือกแข็ง ตัวอย่างเช่นเนื้อเยื่อพืชจะแข็งและไม่เรียงตัวกันเป็นแถว การหดตัวหรือขยายตัวระหว่างการแช่เยือกแข็งจะทำให้เกิดการแยกตัวของเซลล์หรือเซลล์แตก หรือทำให้ส่วนประกอบภายในเซลล์เสียหายได้ นอกจากนี้ชนิด พันธุ์ และความแก่อ่อนของพืชยังมีความต้านทานต่อความเสียหายที่เกิดจากการแช่เยือกแข็งได้ไม่เท่ากันด้วย แต่โดยทั่ว ๆ ไปเนื้อเยื่อของพืชจะได้รับความเสียหายทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) ระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งและการละลายน้ำแข็ง

การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (Rapid freezing) จะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นหากเก็บอาหารแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำ และควบคุมให้อุณหภูมิสม่ำเสมอ รวมทั้งการละลายน้ำแข็งอย่างรวดเร็วจะช่วยลดการแตกของเซลล์ และลดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเนื้อเยื่อ

1.2.2) ความเสียหายที่เกิดจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายอื่น ๆ ที่ไม่ใช่น้ำ (Concentration of non-aqueous constituents) ความเข้มข้นของตัวถูกละลายและของสารที่แขวนลอยอาจเพิ่มขึ้นในระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากน้ำไปเป็นน้ำแข็ง ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่จะทำให้เกิดความเสียหายในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งโดยทั่วไปขณะแช่เยือกแข็งจะเกิด การเปลี่ยนแปลงของ pH และความเป็นกรดในอาหาร รวมทั้งเกิดการขยายตัวของโครงสร้างของเซลล์ ซึ่งปริมาณของการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็ง การแช่เยือกแข็งแบบช้าจะทำให้เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้น (concentration damage) ดังกล่าวได้มากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

2) การเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา (Frozen storage) อาหารที่อยู่ในสภาพแช่เยือกแข็งจะไม่เฉื่อย (inert) แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพระหว่างการเก็บในอัตราที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยทั่ว ๆ ไปการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นน้อยเมื่ออุณหภูมิถูกทำให้ต่ำลง การเสื่อมคุณภาพนี้อาจเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมี หรือ ทางฟิสิกส์ แต่ไม่ใช่เกิดจากจุลินทรีย์ เนื่องจากจะมีจุลินทรีย์เหลืออยู่น้อยมากในระหว่างการเก็บในสภาพแช่เยือกแข็ง

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างการเก็บที่อาจเกิดขึ้นคือ การสลายตัวของวิตามินซี การเปลี่ยนสี และกลิ่นของอาหารเป็นต้น

3) การเปลี่ยนแปลงระหว่างการละลายน้ำแข็ง (Thawing)

ในระหว่างการละลายน้ำแข็งเป็นโอกาสที่อาหารจะได้รับความเสียหายจากสาเหตุต่างๆ มากที่สุด เช่น การเกิดผลึกน้ำแข็งใหม่ (recrystallization) การเกิดความเสียหายเชิงกล (mechanical damage) รวมทั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

เนื่องจากการละลายน้ำแข็งจะใช้เวลานานกว่าการแช่เยือกแข็งดังกล่าวแล้ว ในระหว่างการละลายน้ำแข็งอุณหภูมิของอาหารจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วถึงบริเวณใกล้จุดเยือกแข็งและจะอยู่ที่บริเวณนี้เป็นเวลานาน โดยทั่วไปแล้วพบว่าที่อุณหภูมิใกล้ๆ จุดเยือกแข็งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการในอัตราที่สูงที่สุด

หลังละลายน้ำแข็งอาหารไม่สามารถคืนสู่สภาพปกติได้ แต่จะขึ้นกับชนิดของอาหารด้วย เนื้อเยื่อจากพืชตามธรรมชาติมักจะแข็ง แต่หลังจากการละลายน้ำแข็งแล้วจะมีลักษณะอ่อนนิ่ม

ในระหว่างการละลายน้ำแข็งจะมีของเหลวสูญเสียจากเนื้อเยื่อของวัตถุดิบซึ่งเรียกว่า "Drip" ความรุนแรงของการสูญเสียของเหลวจะขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร พื้นที่ผิว และสภาพของ การเก็บสภาพแช่เยือกแข็งรวมทั้งวิธีการละลายน้ำแข็ง

3.5 คุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง (สุวรรณ วิรัชกุล 2528)

คุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ ซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้ คือ

1) อาหารที่นำมาแช่เยือกแข็ง ต้องอยู่ในสภาพสดและมีคุณภาพดีเยี่ยม

2) ในระหว่างกรรมวิธีการแช่เยือกแข็ง ต้องระวังอย่าให้มีเศษโลหะปนลงในอาหาร

3) ต้องระวังไม่ให้อาหารแช่เยือกแข็งสูญเสียความชื้นไปมาก (desiccation) หรือเกิดออกซิเดชั่น ซึ่งการป้องกันการสูญเสียความชื้นสามารถทำได้โดยเคลือบอาหารด้วยน้ำแข็ง (glazing) ส่วนวิธีการบรรจุอาหารในหีบห่อ วัสดุที่ใช้ทำหีบห่อต้องมีคุณสมบัติป้องกันความชื้น และออกซิเจนไม่ให้ผ่านเข้ามาได้

4) ควรเก็บอาหารแช่เยือกแข็งไว้ในห้องที่มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ (-18 ถึง -20 องศาเซลเซียส)

5) ห้องที่ใช้เก็บอาหารแช่เยือกแข็ง ควรมีชื้นสัมพัทธ์สูง มีการหมุนเวียนของอากาศต่ำ และระดับอุณหภูมิต้องสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการเก็บอาหาร

3.6 ผลของการแช่เยือกแข็งที่มีต่อผลไม้

การแช่เยือกแข็งผลไม้สดอาจทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัส สี กลิ่นและรสชาติ เนื่องมาจากผลไม้บางชนิด เช่น เงาะ และสับปะรด ซึ่งมีปริมาณน้ำภายในเซลล์มาก จึงทำให้โครงสร้างของเซลล์ในเนื้อเยื่อถูกทำลายเนื่องมาจากการก่อผลึกของน้ำแข็งจำนวนมาก จึงได้มีการลดปริมาณน้ำภายในเนื้อเยื่อผลไม้ลง โดยใช้วิธีออสโมซิสก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง โดยจุ่มในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง Li and Sun (2002) ได้ศึกษาการจุ่มเนื้อสับปะรดหั่นเป็นชิ้นในสารละลายน้ำตาลซูโครสก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง พบว่าปริมาณการสูญเสียของเหลวหลังการละลายน้ำแข็งต่ำกว่าเนื้อสับปะรดที่ไม่ได้จุ่มในสารละลาย และเนื้อสับปะรดในชุดการทดลองยังได้รับคะแนนผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสมากกว่าชุดควบคุมและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

Sajjaanantakul and David (1990) ได้ศึกษาผลกระทบจากการแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษาในสภาพแช่เยือกแข็งของสตรอเบอรี่ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสารละลายเพคตินชนิดที่ละลายในน้ำมากกว่าชนิดที่ละลายในตัวทำละลาย โดยในระหว่างการละลายน้ำแข็งออกจากผลไม้นั้นพบว่าสารเพคตินที่มีอยู่ในผลไม้จะ

ละลายออกมาด้วย การเปลี่ยนแปลงของสารเพคตินนี้จึงมีผลทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อสัมผัสซึ่งมักพบในผลไม้แช่เยือกแข็ง

4. ลำไย (longan) (จริยา ปิติพรณรงค์ 2531)

ลำไย (longan) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Dimocarpus longan* Lour. var. *longan* จัดอยู่ในตระกูล Sapindaceae ลำไยเป็นผลไม้เขตกึ่งร้อน สำหรับถิ่นกำเนิดของลำไย สันนิษฐานว่าอยู่ในประเทศจีนตอนใต้

4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

4.1.1 ลำต้น ต้นลำไยที่ขยายพันธุ์ด้วยเมล็ดจะมีลำต้นตรงสูงประมาณ 30 – 40 ฟุต ต้นลำไยที่ขยายพันธุ์ด้วยการตอนกิ่งจะแตกกิ่งก้านสาขาใกล้ๆกับพื้นทรงพุ่มต้นสวยงาม เนื้อไม้เปราะ เปลือกลำต้น ขรุขระ มีสีน้ำตาลหรือเทา

4.1.2 ใบ ลักษณะเป็นใบรวมประกอบด้วยใบย่อยบนก้านใบร่วมกัน มีใบย่อย 2 – 5 คู่ ความยาวใบ 20 – 30 เซนติเมตร ใบย่อยเรียงตัวสลับหรือเกือบตรงข้าม ความกว้างของใบย่อย 3 – 6 เซนติเมตร ใบเป็นรูปรีหรือหอก ปลายใบและฐานใบค่อนข้างป้าน ใบด้านบนมีสีเขียวเข้มกว่าด้านล่าง ผิวด้านบนเรียบ ผิวด้านล่างสากเล็กน้อย ขอบใบเรียบไม่มีหยัก ใบเป็นคลื่นเล็กน้อยและเห็นเส้นแขนง (vein) แตกออกจากเส้นกลางใบชัดเจน และมีจำนวนมาก

4.1.3 ดอก ดอกลำไยมีสีขาว หรือขาวออกเหลืองมีขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 – 8 มิลลิเมตร ช่อหนึ่งๆ มีดอก 3 ชนิด คือ ดอกตัวผู้ ดอกตัวเมีย และดอกสมบูรณ์เพศ

4.1.4 ผล ทรงกลมหรือเบี้ยว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ผลสุกมีสีเหลืองหรือน้ำตาลอมแดง ผิวเปลือกเรียบหรือเกือบเรียบ มีตุ่มแบนๆปกคลุมผิวเปลือกด้านนอก เปลือกบาง เนื้อหนา เนื้อ (aril) เจริญมาจากก้านรังไข่ (funiculus) เป็นพวกเนื้อเยื่อฟองน้ำ และผิวหุ้มเมล็ดส่วนนอก (outer integument) เป็นเนื้อเยื่อพาเรนไคม่าเจริญล้อมรอบเมล็ดอยู่ระหว่างเปลือกกับเมล็ดมีสีขาวคล้ายวุ้น สีขาวขุ่น หรือสีชมพูเรื่อๆ แตกต่างตามพันธุ์

4.1.5 เมล็ด ลักษณะกลมถึงแบน เมื่อยังไม่แก่มีสีขาวและค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีดำ มัน ส่วนของเมล็ดที่ติดกับขั้วผลมีวงกลมสีขาวบนเมล็ด (placenta) มีลักษณะคล้ายตามังกร (dragon's eye)

ลำไยจะออกดอกอยู่ในช่วงปลายเดือนธันวาคมถึงเดือนมกราคม และช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวจะอยู่ในช่วงปลายเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม (สุรภา จีระสันติกุล 2548)

4.2 ส่วนประกอบของลำไยสดและลำไยแห้ง

จริยา ปิติพรณรงค์ (2531) ได้ศึกษาองค์ประกอบของลำไยสดและลำไยแห้ง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของลำไยสดและลำไยแห้ง

ส่วนประกอบ	เนื้อลำไยสด (ร้อยละ)	เนื้อลำไยแห้ง (ร้อยละ)
ความชื้น	81.10	17.80
ไขมัน	0.11	0.40
เส้นไย	0.28	1.60
โปรตีน	0.97	4.60
เถ้า	0.56	2.86
คาร์โบไฮเดรท	16.98	72.70
ค่าพลังงานความร้อน (กิโลแคลอรี/100 กรัม)	72.79	311.80
แคลเซียม (มิลลิกรัม/100 กรัม)	5.70	27.70
เหล็ก (มิลลิกรัม/100 กรัม)	0.35	2.39
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/100 กรัม)	35.30	159.50
วิตามินซี (มิลลิกรัม/100 กรัม)	69.20	137.80

ที่มา : จริยา ปิติพรณรงค์ (2531)

5. คุณสมบัติของน้ำตาลซูโครส มอลโทเดกซ์ทริน และซอร์บิทอล

5.1 ซูโครส (Sucrose)

น้ำตาลซูโครสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดไดแซคคาไรด์ (disaccharide) เป็นสารประกอบของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{12}H_{22}O_{11}$ โมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกับน้ำตาลฟรักโทส ลักษณะการจัดเรียงตัวของน้ำตาลซูโครส คือ β-D-Fructofuranosyl-α-D-glucopyranoside หรือ α-D-Glucopyranosyl-(1- 2)β-fructofuranoside น้ำตาลซูโครสมีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) เท่ากับ 342 กรัม/โมล โดยปกตินำ้ตาลบริสุทธิ์จะอยู่ในรูปผลึก ไม่มีสี และมีลักษณะโปร่งแสง น้ำตาลซูโครสจัดเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากเป็นสารให้ความหวานแล้ว ยังมีหน้าที่อื่นๆ อีกมากมายที่สารอื่นๆ ไม่สามารถทดแทนได้ ทั้งนี้เพราะน้ำตาลซูโครสมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น คุณสมบัติเกี่ยวกับความหนืด การที่สารละลายน้ำตาลมีความหนืดสูงทำให้การแพร่กระจายตัวของอากาศหรือออกซิเจนเป็นไปได้ช้า จึงเป็นการป้องกันการเกิดออกไซด์หรือสนิมของภาชนะที่สัมผัสกับน้ำตาล นอกจากคุณสมบัติข้างต้นแล้ว น้ำตาลยังทำหน้าที่ลดปริมาณน้ำอิสระ เพิ่มแรงตึงผิว แรงดันออสโมติค และลดค่าวอร์เตอร์แอกทิวิตี (a_w) ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตในอาหารได้ (สุจิตรา วงษ์ประยูร 2550) สำหรับลักษณะโครงสร้างของน้ำตาลซูโครส แสดงดังภาพที่ 5 (ก)

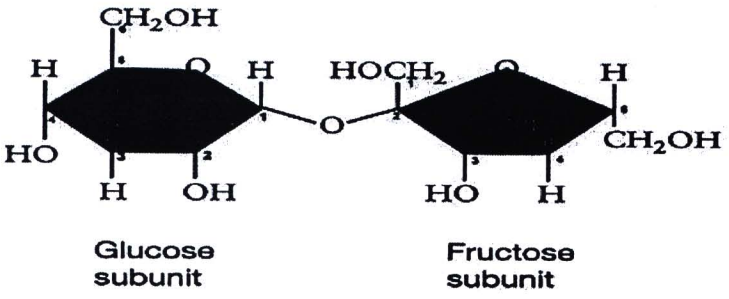
5.2 มอลโทเดกซ์ทริน (maltodextrin)

มอลโทเดกซ์ทริน เป็นผลิตภัณฑ์แป้งดัดแปรประเภทเดียวกับกลูโคสไซรัปได้จากการย่อยสลายโมเลกุลสตาร์ช (Starch) ด้วยกรดและ/ หรือเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส มีอะมิโลสโซ่ตรงและอะมิโลเพกตินโซ่กิ่งอยู่ในโมเลกุล (ปิยะวิทย์ ทิพรส 2544) มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า dextrose equivalent (DE) น้อยกว่า 20 ประกอบด้วย (1-4 และ 1-6)-α-D-glucopyranose-linked residues ค่า DE คือ ค่า reducing power ของพอลิแซคคาไรด์หรือ โอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้จากสตาร์ช เปรียบเทียบกับ D-กลูโคส โดยน้ำหนักฐานแห้ง โดยปกติมอลโทเดกซ์ทรินมีค่า DE<20 ขณะที่ corn syrup solid มีค่า DE≥20 มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE แตกต่างกัน จะมีสมบัติทางเคมีกายภาพแตกต่างกัน เช่นความสามารถในการละลาย อุณหภูมิแช่เยือกแข็ง ความหนืด เป็นต้นมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE สูงกว่า จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า เช่น มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE 10 และ 20 มีหนักโมเลกุลเท่ากับ 1800 และ 900 ตามลำดับ มอลโทเดกซ์ทรินมีสมบัติที่ดีหลายประการ จึงมีการนำมอลโทเดกซ์ทรินไปใช้ในอาหารประเภทต่างๆ เช่น ในกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย นิยมใช้มอลโทเดกซ์ทรินเป็นสารตัวกลางสำหรับห่อหุ้มให้กลิ่นรสต่างๆ ได้แก่ ไขมันเนย น้ำมันหอมระเหย เป็นต้น ในอุตสาหกรรมให้กลิ่นรสและสารให้ความหวานสังเคราะห์ นิยมใช้มอลโทเดกซ์ทรินเป็นสารเพิ่มปริมาณ (bulking agent) มอลโทเดกซ์ทรินจะช่วยป้องกันการเกิดผลึกน้ำตาล ช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัส รักษาความชุ่มชื้น และ ยืดอายุการเก็บรักษาในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน มอลโทเดกซ์ทรินจะช่วยควบคุมการเพิ่มขนาดของเกล็ดน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง และเนื่องจากการที่มอลโทเดกซ์ทรินเป็นสารตัวกลางพากลิ่นรส (flavor carrier) ที่ดี จึงนิยมใช้เป็นสารเชื่อม (binder) และสารเคลือบโดยใช้เป็นตัวกลางให้กับสารให้ความหวาน สารให้กลิ่นรส และเครื่องเทศในผลิตภัณฑ์จากธัญชาติและอาหารว่าง นอกจากนี้ยังใช้มอลโทเดกซ์ทรินเป็นสารทดแทนไขมันในอาหารประเภทไขมันต่ำ เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินให้พลังงานเพียง 3.8 กิโลแคลอรี/กรัม น้อยกว่าไขมันซึ่งให้พลังงานถึง 9 กิโลแคลอรี/กรัม (Macrae and others 1993) ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้มอลโทเดกซ์ทริน ที่มีค่า DE เท่ากับ 12.06 สำหรับลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของมอลโทเดกซ์ทรินแสดงดังภาพที่ 5 (ข)

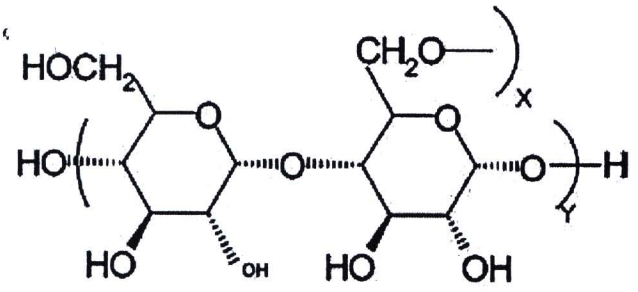
5.3 ซอร์บิทอล (Sorbitol) (บุญยรัศมี สุขเขียว 2532)

ซอร์บิทอลเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งมีสูตรโครงสร้างเป็น $C_6H_{14}O_6$ มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) เท่ากับ 182.14 กรัม/โมล มีความหวานประมาณร้อยละ 60 เมื่อเปรียบเทียบกับความหวานของน้ำตาลซูโครส ซอร์บิทอลบริสุทธิ์จะเป็นผลึกใสไม่มีสี มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี และสามารถละลายได้บ้าง ในกรณีใช้สารละลาย ethanol, methanol, isopropanol, butanol, cyclohexanol, phenol, acetone, acetic acid, pyridine และ acetamide ส่วนถ้าเป็นสารละลายอินทรีย์อื่นๆ พบว่าซอร์บิทอลไม่มีความสามารถในการละลายได้เลย นอกจากนั้นซอร์บิทอลมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 110-112 องศาเซลเซียส ได้มีการนำซอร์บิทอลไปใช้กันอย่างกว้างขวางมากขึ้น ทั้งในด้านการแพทย์และในทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งในทางการแพทย์นั้นโดยมากแล้วจะนำซอร์บิทอลมาใช้เป็นน้ำตาลสำหรับคนเป็นโรคเบาหวาน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของซอร์บิทอลที่มีความหวานเพียงร้อยละ 60 ของน้ำตาลจากอ้อย และเมื่อรับประทานซอร์บิทอลเข้าไปยังสามารถจะย่อยสลายแล้วให้ค่าพลังงานได้มากประมาณ 3.994 แคลอรี่ต่อน้ำหนัก 1.0 กรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ได้จากน้ำตาลซูโครสซึ่งมีค่าประมาณ 3.940 แคลอรี่ต่อน้ำหนัก 1.0 กรัม ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก นอกจากนั้นแล้วซอร์บิทอลยังสามารถถูกเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ได้โดยไม่ปรากฏเป็นน้ำตาล

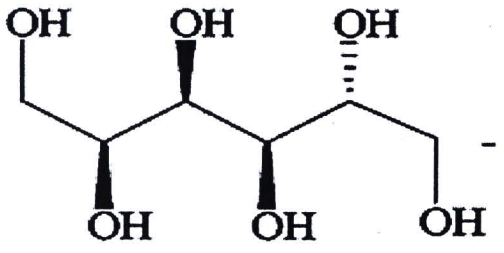
กลูโคสสะสมไว้ในเลือดเลย สำหรับในทางอุตสาหกรรม ซอร์บิทอลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้เป็นส่วนผสมของยาบางชนิด นอกจากนี้ยังใช้ซอร์บิทอลเป็นตัวให้เกิดความอ่อนนุ่มสำหรับการสังเคราะห์ plastic หรือ resin ตลอดจนถึงในอุตสาหกรรมในการทำเครื่องหนังต่างๆ อีกด้วย ส่วนอุตสาหกรรมอาหารบางชนิด เช่น เครื่องดื่มจำพวกน้ำอัดลม หรือน้ำผลไม้ต่างๆ ลูกกวาด ไอศกรีม มะพร้าวเส้น ขนมปัง จะใช้ซอร์บิทอลจะเป็นสารให้ความหวานและยังช่วยทำให้เกิดความนุ่มรักษาความชุ่มชื้นของอาหาร ลดการแตกหักในขนมปังได้อีกด้วย สำหรับในกรณีอุตสาหกรรมการทำปากกาลูกลื่น หรือแท่นพิมพ์ต่างๆ จะใช้ซอร์บิทอลเป็นตัวช่วยให้มีการหล่อลื่นได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ซอร์บิทอลยังมีบทบาทในการนำไปใช้ในการทำ surface active agents ที่เรียกทางภาษาการค้าว่า span และ Tweens ซึ่งเป็นกรดไขมันเอสเทอร์ของซอร์บิทาน (sorbitans) โดยที่ทั้ง Span และ Tween นี้จะใช้มากในโรงงานที่เกี่ยวข้องกับการผลิตยา โดยใช้เป็นตัว emulsifying และ wetting agents ตลอดจนนำไปใช้ในการทำอาหารได้อีกหลายชนิดด้วย ส่วนอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ซอร์บิทอลยังคงมีบทบาทสำคัญ เช่น อุตสาหกรรมในการผลิตยาสีฟัน บุหรี่ ตลอดจนการผลิตเครื่องสำอาง เป็นต้น (กัญญา บุตราช 2536) สำหรับลักษณะโครงสร้างของน้ำตาลซอร์บิทอล แสดงดังภาพที่ 5 (ค)



(ก) ซูโครส



(ข) มอลโทเดกซ์ทริน



(ค) ซอร์บิทอล

ภาพที่ 5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ (ก) น้ำตาลซูโครส (ข) มอลโทเดกซ์ทริน และ (ค) ซอร์บิทอล
ที่มา : (ก) Mallery (2005), (ข) Alexander and Raluca-Ioana (2004), (ค) Jiaojiao and others (2011)

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแช่เยือกแข็งหลังดึงน้ำออกด้วยการออสโมซิส

Ngamjit and Sanguansri (2009) ได้ศึกษาผลของการใช้สารให้ความหวานที่แตกต่างกันแต่มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)ใกล้เคียงกันในการออสโมซิสที่มีผลต่อคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็ง โดยนำชิ้นเงาะแช่ในสารละลาย sucrose, trehalose และ maltitol ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส และเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน และ 60 วัน พบว่าการออสโมซิสชิ้นเงาะด้วยสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิดจะมีผลให้เกิดการสูญเสียระหว่างการละลายน้ำแข็งของตัวอย่างใกล้เคียงกัน ค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) หลังจากเก็บตัวอย่างไว้ 60 วัน ผลที่ได้จากการประเมินด้านประสาทสัมผัสแสดงให้เห็นว่าการออสโมซิสตัวอย่างด้วย น้ำตาล sucrose จะได้รับการยอมรับในเรื่องของเนื้อสัมผัสและคุณสมบัติอื่นมากกว่าการใช้น้ำตาล maltitol และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส

Dermesonlouoglou and Taoukis (2006) ได้ศึกษาการดึงน้ำบางส่วนออกจากผักผลไม้บางชนิดด้วยวิธีออสโมซิสก่อนการแช่เยือกแข็ง โดยแช่วัตถุดิบลงในสารละลาย Oligofructose และ high-DE maltodextrin ที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (35 องศาเซลเซียส) ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดการสูญเสียของน้ำและเกิดการเพิ่มขึ้นของของแข็งในตัวอย่าง พบว่าการทำออสโมซิสช่วยป้องกันการสูญเสีย วิตามินซี ไลโคปีน และการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งได้ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของของแข็งในอาหารและการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากอาหารบางส่วนจะเป็นการปรับปรุงคุณภาพของอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการออสโมซิสก่อนการแช่เยือกแข็ง

Tregunno and Goff (1996) ได้ศึกษากระบวนการ Osmodehydrofreezing ของตัวอย่างแอปเปิ้ล โดยใช้สารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง (sucrose, sorbital และ DE 42 corn syrup solid [CSS]) และทำการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -35 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าน้ำตาลจะช่วยในการเพิ่มค่าความแน่นเนื้อให้กับตัวอย่างที่ผ่านการละลายน้ำแข็งหรือผ่านการดูดน้ำกลับเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ไม่ผ่านการทำออสโมซิสและนำมาแช่เยือกแข็งจะมีค่าความแน่นเนื้อมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำออสโมซิสก่อนแช่เยือกแข็ง แสดงว่าสภาวะที่ใช้ในการทำออสโมซิส (50 องศาเซลเซียส เวลา 40 นาที) เป็นสภาวะที่รุนแรงอย่างมาก จากการศึกษาโดยใช้เทคนิค SEM พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำ Osmodehydrofreezing จะมีผนังเซลล์ที่ราบเรียบ และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิสก่อนการแช่เยือกแข็งจะมีรอยแตกเกิดขึ้น การวัดการนำไฟฟ้าของตัวอย่างแอปเปิ้ลที่ผ่านการดูดน้ำกลับชี้ให้เห็นว่าเกิดการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของผลไม้ที่ผ่านการ Osmodehydrofreezing

Talens and others (2001) ได้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการออสโมซิสและการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งที่มีต่อคุณสมบัติด้านแสง และลักษณะเชิงกลของตัวอย่างกีวีโดยการแช่ในสารละลาย sucrose จนกระทั่งปริมาณของแข็งทั้งหมดในกีวีเพิ่มเป็น 30°Brix การออสโมซิสจะกระทำภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ (OD) และภายใต้สภาวะสุญญากาศ (PVOD) จากนั้นวิเคราะห์ตัวอย่างกีวีสดและตัวอย่างกีวีที่ผ่านการออสโมซิสทั้งก่อนและหลังการเก็บตัวอย่างแบบแช่เยือกแข็ง (ที่อุณหภูมิ –18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 30 วัน) จากการทดลองพบว่าการออสโมซิสภายใต้สภาวะสุญญากาศ จะทำให้ตัวอย่างมีความทึบแสงที่บริเวณผิวมากขึ้นเมื่อเทียบกับการ

ออสโมซิสที่สภาวะปกติ การออสโมซิสและการแช่เยือกแข็งจะทำให้ค่า stress สูงสุดก่อนที่ตัวอย่างจะแตกหักเปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับตัวอย่างสด

Dermesonlouoglou and others (2007) ได้ทดลองปรับปรุงคุณภาพของมะเขือเทศแช่เยือกแข็ง โดยการนำมะเขือเทศไปออสโมซิสในสารละลาย glucose, high DE maltodextrin และสารละลายผสมระหว่าง oligofructose และ thehalose ที่ความเข้มข้นร้อยละ 56.5 โดยน้ำหนัก ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส แล้วเก็บที่อุณหภูมิ -12 และ -20 องศาเซลเซียส จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าคุณภาพของมะเขือเทศแช่เยือกแข็งหลังการออสโมซิสจะสูงกว่ามะเขือเทศแช่เยือกแข็งที่ไม่ได้ผ่านการออสโมซิสตลอดช่วงระยะเวลา 12 เดือนของการเก็บ การเก็บมะเขือเทศแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จะช่วยรักษาคุณภาพได้ดีกว่าการเก็บที่ -12 องศาเซลเซียส

Olatidoye and others (2010) ได้ศึกษาผลของการออสโมซิสมะเขือเทศด้วยสารละลายชนิดต่างๆ ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งที่ -18 องศาเซลเซียส และเก็บไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 30 วัน ในการออสโมซิสได้ใช้สารละลายเกลือเข้มข้นร้อยละ 10 (w/v) สารละลายน้ำตาลเข้มข้นร้อยละ 25 (w/v) และทำการออสโมซิสที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 ถึง 5 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสก่อนแช่เยือกแข็งจะยังคงเหลือปริมาณวิตามินเอมากกว่าและมีสีที่ดีกว่าตัวอย่างที่แช่เยือกแข็งเลยโดยไม่ผ่านการออสโมซิส หลังจากเก็บตัวอย่างไว้ 30 วัน พบว่าตัวอย่างแช่เยือกแข็งที่ผ่านการออสโมซิสจะได้รับการยอมรับในด้านเนื้อสัมผัส สี กลิ่น และการยอมรับรวมสูงกว่าตัวอย่างมะเขือเทศสดแช่เยือกแข็ง

Ramallo and Mascheroni (2010) ได้ศึกษาถึงผลของวิธีดึงน้ำบางส่วนออกจากชิ้นสับปะรด ซึ่งได้แก่ (1) การออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาลซูโครส เข้มข้น 60°Brix ที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 ถึง 240 นาที และ (2) การทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ ก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง ซึ่งพบว่าตัวอย่างแช่เยือกแข็งที่ผ่านการดึงน้ำออกด้วยวิธีการออสโมซิสและการอบแห้งจะมีคุณภาพดีกว่าตัวอย่างสดแช่เยือกแข็ง ตัวอย่างแช่เยือกแข็งหลังการดึงน้ำบางส่วนออกโดยวิธีการทำแห้งจะเกิดการสูญเสียน้ำหลังการละลายน้อยกว่าตัวอย่างแช่เยือกแข็งหลังการออสโมซิส ดังนั้นผู้วิจัยจึงสรุปว่าการดึงน้ำออกจากตัวอย่างโดยวิธีการทำแห้งที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง จะเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการลดการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นสับปะรดในระหว่างการแช่เยือกแข็ง