

บทที่ 2

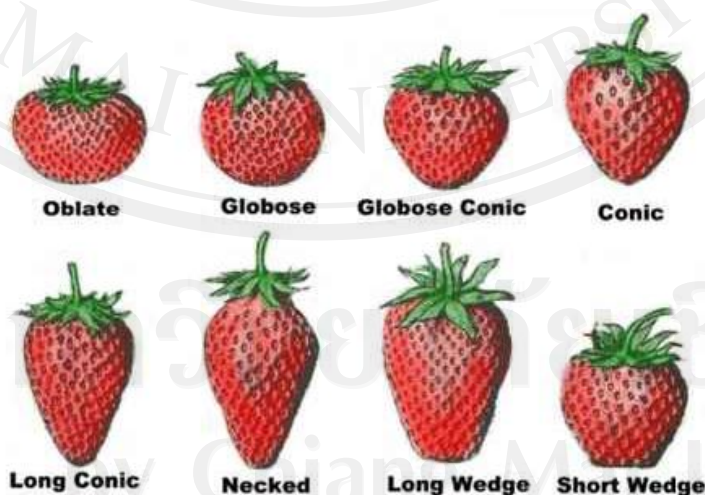
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สตรอเบอรี่

สตรอเบอรี่ (*Fragaria x ananassa* Duch.) จัดอยู่ในตระกูล Rosaceae สกุล *Fragaria* เป็นพืชล้มลุกที่มีอายุหลายปี ลำต้นมีลักษณะเป็นกอและมีระบบรากค่อนข้างตื้น มีลักษณะการเจริญเติบโตโดยการแตกกอ มีดอกสีขาว ออกดอกเป็นช่อแบบ compound cymes ผลเป็นแบบผลกลุ่ม (aggregate fruit) ประกอบด้วยผลย่อยแบบ achene เมื่อผลสุกผิวมีสีแดงเป็นมัน มีกลิ่นหอมรสชาติหวานอมเปรี้ยวถึงหวาน ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และระยะการสุก (ณรงค์ชัย, 2543)

2.1.1 ลักษณะรูปร่างของผลสตรอเบอรี่

ผลสตรอเบอรี่มีรูปร่างหลายแบบแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ (Bianco *et al.*, 2009; Liming and Yanchao, 2010) และตำแหน่งของผลในช่อ รูปร่างของผลสตรอเบอรี่มีได้หลายแบบ ส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นทรงกว้าง และแบนเป็นรูปกลม หรือเป็นแท่งรูปหงอนไก่ (ชูพงษ์, 2531) รูปร่างของผลสตรอเบอรี่สามารถแบ่งออกได้ 8 แบบ คือ ทรงกลมแป้น (oblate) ทรงกลม (globose) ทรงกลมปลายแหลม (globose conic) ทรงแหลม (conic) ทรงแหลมยาว (long conic) ทรงยาวมีคอ (necked) ทรงลิ้นยาว (long wedge) และทรงลิ้นสั้น (short wedge) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 รูปร่างของผลสตรอเบอรี่

ที่มา : พิมพ์เพ็ญและนิธิยา (2553)

2.1.2 ส่วนประกอบทางเคมีของผลสตรอเบอรี่

2.1.2.1 สารสี

เมื่อผลสตรอเบอรี่ดิบจะมีสีขาวอมเหลือง และเมื่อผลสตรอเบอรี่เริ่มแก่ สีผิวจะเปลี่ยนจากสีเขียวไปเป็นสีขาว ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์โดยกระบวนการออกซิเดชัน และเอนไซม์คลอโรฟิลเลส (chlorophyllase) เมื่อผลสุกจะเปลี่ยนเป็นสีแดง การเปลี่ยนแปลงของสีผิวสตรอเบอรี่สอดคล้องกับสารสีซึ่งอยู่ในผลสตรอเบอรี่ ได้แก่ แอนโทไซยานิน (anthocyanins) ซึ่งเป็นสารสีที่อยู่ในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ (flavonoids) และเป็นสารประกอบพวกไกลโคไซด์ที่ละลายได้ดีในน้ำ ให้สีแดง ชมพู น้ำเงิน และม่วง และเมื่อผลสตรอเบอรี่เริ่มสุกจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม หรือชมพู และแดง ตามลำดับ นั่นคือสารสีคลอโรฟิลล์สลายตัวทั้งหมด และมีการสังเคราะห์แอนโทไซยานินซึ่งเป็นสารสีแดง และจะอยู่ตามเซลล์ชั้นนอกของผล เมื่อผลสตรอเบอรี่สุกมากขึ้นจะสังเคราะห์แอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น ทำให้ผลของสตรอเบอรี่สุกมีสีแดงเข้ม และในระหว่างนี้จะมีปริมาณน้ำตาลมากที่สุด และมีกลิ่นรสเฉพาะตัวของพันธุ์ด้วย (คนัย, 2538)

2.1.2.2 คุณค่าทางโภชนาการ

สตรอเบอรี่จัดเป็นผลไม้เพื่อสุขภาพ เนื่องจากอุดมด้วยสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและให้แคลอรีต่ำ โดยคุณค่าทางโภชนาการของผลสตรอเบอรี่แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของผลสตรอเบอรี่สดในส่วนที่บริโภคได้ 100 กรัม

คุณค่าทางโภชนาการ	หน่วย	ปริมาณ
น้ำ	กรัม	91.57
พลังงาน	กิโลแคลอรี	30.00
โปรตีน	กรัม	0.61
ไขมัน	กรัม	0.37
คาร์โบไฮเดรต	กรัม	7.02
เส้นใยอาหาร	กรัม	2.30
เถ้า	กรัม	0.43

ที่มา : USDA Nutrient Database for Standard Reference (1998)

ก. โปรตีน

ในผลไม้มีปริมาณโปรตีนน้อยมาก โปรตีนส่วนใหญ่ทำหน้าที่เป็นเอนไซม์ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการเจริญเติบโต การแก่ และการสุกของผลไม้ เช่น เอนไซม์พอลิกลีเกส โรเนส เพกทินเอสเทอเรส และเพกทินเมทิลเอสเทอเรส (คณัย, 2540) ในผลสตรอเบอรี่มีโปรตีน 0.23 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณโปรตีนจะเพิ่มขึ้นขณะที่ผลไม้สุกเนื่องจากการสังเคราะห์เอนไซม์เกิดขึ้น ชนิดและปริมาณของกรดแอมิโนของผลสตรอเบอรี่แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณกรดแอมิโนของผลสตรอเบอรี่สดในส่วนที่บริโภคได้ 100 กรัม

กรดแอมิโน	ปริมาณ (มิลลิกรัม)
กรดกลูตามิก (Glutamic acid)	90
กรดแอสพาร์ติก (Aspartic acid)	138
ไกลซีน (Glycine)	24
ซีรีน (Serine)	23
ซิสตีน (Cystine)	5
ทริพโตเฟน (Tryptophan)	7
ทรีโอนีน (Threonine)	19
ไทโรซีน (Tyrosine)	21
โพรลีน (Proline)	19
ฟีนิลแอลานีน (Phenylalanine)	18
เมไทโอนีน (Methionine)	1
วาลีน (Valine)	18
ลูซีน (Leucine)	31
ไลซีน (Lysine)	25
อาร์จินีน (Arginine)	26
แอลานีน (Alanine)	31
ไอโซลูซีน (Isoleucine)	14
ฮิสทีดีน (Histidine)	12

ที่มา : USDA Nutrient Database for Standard Reference (1998)

ข. คาร์โบไฮเดรตและน้ำตาล

ผลไม้ส่วนใหญ่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตซึ่งอยู่ทั้งในรูปของอาหารสะสม เช่น สตาร์ช และ น้ำตาลชนิดต่างๆ ที่ให้รสหวาน และมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างผนังเซลล์ที่ให้ความแข็งแรง ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และสารประกอบเพกทิน เป็นต้น คิดเป็นส่วนประกอบประมาณ 23 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักผลสดของเบอร์รี่สด (จริงแท้, 2544) น้ำตาลในผลไม้ที่สำคัญมีอยู่ 3 ชนิด คือ น้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรักโทสซึ่งสะสมอยู่ในแวคิวโอลเป็นส่วนใหญ่ ผลสดของเบอร์รี่แต่ละสายพันธุ์มีปริมาณน้ำตาลแตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในผลสดของเบอร์รี่ 6 สายพันธุ์ พบว่ามีปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุดคือ 1.89–4.52 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร รองลงมาคือน้ำตาลฟรักโทส ประมาณ 2.14–4.14 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร และน้ำตาลซูโครส ประมาณ 0.90–3.87 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร (Kallio *et al.*, 2000)

ค. กรดอินทรีย์

กรดอินทรีย์ที่อยู่ในผักและผลไม้มีผลต่อรสชาติโดยตรง และยังเป็นแหล่งที่สำคัญของสารเริ่มต้นในกระบวนการหายใจด้วย กรดอินทรีย์ที่พบมากในผักและผลไม้ คือ กรดซิตริกและกรดมาลิก ซึ่งจะแปรผันตามชนิดของผลไม้ กรดอินทรีย์ที่พบมากที่สุดในการวิเคราะห์ผลสดของเบอร์รี่ คือ กรดซิตริก รองลงมา คือ กรดมาลิก ผลการวิเคราะห์ผลสดของเบอร์รี่ 6 สายพันธุ์พบว่ามีปริมาณกรดซิตริก 0.73–1.58 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร และมีปริมาณกรดมาลิก 0.22–0.69 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร (Kallio *et al.*, 2000)

ง. วิตามินและแร่ธาตุ

ผลไม้เป็นแหล่งวิตามินและแร่ธาตุที่สำคัญสำหรับร่างกาย โดยชนิดและปริมาณวิตามินและแร่ธาตุที่พบในผลไม้แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ผลสดของเบอร์รี่มีปริมาณวิตามินซีสูงที่สุด ส่วนแร่ธาตุมีปริมาณโพแทสเซียมสูงที่สุด นอกจากนี้ยังมีแมกนีเซียมและแคลเซียมด้วย (Hakala *et al.*, 2003) ชนิดและปริมาณวิตามินและแร่ธาตุของผลสดของเบอร์รี่แสดงดังตารางที่ 2.3

จ. ลิพิด

ผิวหนังของผลสดของเบอร์รี่มีลักษณะเป็นมันวาว ดึงดูดความสนใจของผู้บริโภคเนื่องจากมีแว็กซ์ (wax) ซึ่งเป็นลิพิดชนิดหนึ่งเคลือบอยู่โดยเฉพาะที่ผิวของผลสดของเบอร์รี่สุก (दनัย, 2538)

ตารางที่ 2.3 วิตามินและแร่ธาตุของผลสตรอเบอรี่สดในส่วนที่บริโภคได้ 100 กรัม

วิตามินและแร่ธาตุ	ปริมาณ (มิลลิกรัม)
วิตามิน	
วิตามินซี (กรดแอสคอร์บิก)	56.70
วิตามินบี 1 (ไทอะมิน)	0.02
วิตามินบี 2 (ไรโบฟลาวิน)	0.07
ไนอะซิน (กรดนิโคตินิก)	0.23
แร่ธาตุ	
แคลเซียม	14.00
เหล็ก	0.38
แมกนีเซียม	10.00
ฟอสฟอรัส	19.00
โพแทสเซียม	166.00
โซเดียม	1.00
สังกะสี	0.13
ทองแดง	0.05
แมงกานีส	0.30

ที่มา : USDA Nutrient Database for Standard Reference (1998)

2.1.3 สายพันธุ์ของสตรอเบอรี่ที่ใช้ในการวิจัย

สตรอเบอรี่สายพันธุ์ 329 เป็นสายพันธุ์ที่กรมส่งเสริมการเกษตรนำเข้ามาจากต่างประเทศเพื่อมาปลูกในประเทศไทย สามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมในภาคเหนือของประเทศไทยได้ดี มีขนาดผลค่อนข้างใหญ่ เนื้อแน่น และมีรสชาติหวานอมเปรี้ยว เหมาะแก่การนำไปใช้เป็นวัตถุดิบแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมอาหาร (บริษัท ลานนาเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด, 2554)

สตรอเบอรี่สายพันธุ์ A80 เป็นสตรอเบอรี่ที่นิยมปลูกกันมากในประเทศไทย เนื่องจากมีรสชาติหวานและเนื้อนุ่ม ส่วนลักษณะผลจะเป็นทรงกลมปลายแหลม และมีขนาดผลเล็กกว่าสายพันธุ์ 329 เหมาะแก่การบริโภคแบบผลสด (บริษัท ลานนาเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด, 2554)

สตรอเบอรี่สายพันธุ์ Allstar เป็นสายพันธุ์สตรอเบอรี่ที่นำเข้าจากประเทศจีน ลักษณะ ผลกลม ขนาดผลค่อนข้างใหญ่ เนื้อค่อนข้างนุ่ม ผลสีแดงอ่อน ส่วนสีเนื้อตรงกลางเป็นสีชมพู รสชาติหวานอมเปรี้ยว เหมาะกับการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมอาหาร (บริษัท ลานนาเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด, 2554)

สตรอเบอรี่สายพันธุ์ American13 เป็นสายพันธุ์สตรอเบอรี่ที่นำเข้าจากประเทศจีน เช่นเดียวกัน ลักษณะผลอ้วนตรงกลาง ส่วนบริเวณก้นจะแหลมและมีขนาดผลเล็กกว่าพันธุ์ Allstar มีเนื้อเหนียว เมื่อผลสุกมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ และผลสุกมีสีไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งผล บางส่วนของผล มีสีแดงเข้ม (บริษัท ลานนาเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด, 2554)

2.2 การเปลี่ยนแปลงระหว่างการสุกของผลสตรอเบอรี่

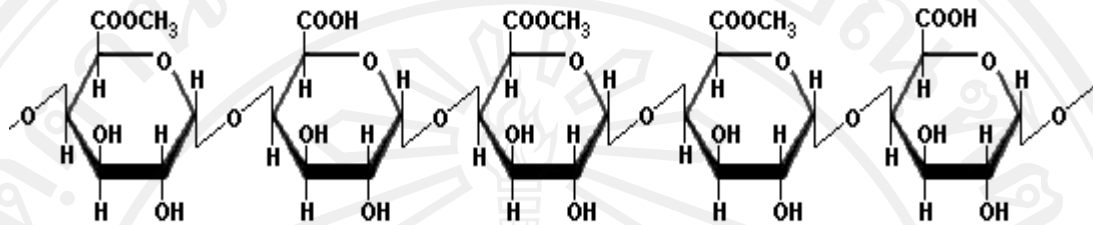
2.2.1 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ

ความแน่นเนื้อของผลสตรอเบอรี่จะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์และระยะการสุก เมื่อผลสตรอเบอรี่เริ่มสุก ความแน่นเนื้อจะลดลง เนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารประกอบที่เป็น ส่วนประกอบของผนังเซลล์ ผนังเซลล์ของผลสตรอเบอรี่ประกอบด้วยเพกทิน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้จะทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์พืช โดยเฉพาะเพกทินจะทำหน้าที่ประสานโมเลกุลต่างๆ ในผนังเซลล์ ให้ยึดเกาะกัน และยังทำหน้าที่เชื่อมเซลล์ที่อยู่ข้างเคียงให้ติดกันด้วย

เพกทินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ประเภทเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) แสดงดังภาพที่ 2.2 โมเลกุลของเพกทินเป็นพอลิเมอร์ของกรดแอลฟา-ดี-กาแล็ก-ทูโลนิก (α -D-galacturonic acid) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ชนิดแอลฟา-1,4 ประกอบด้วย หมู่คาร์บอกซิลอิสระ (COOH) และหมู่คาร์บอกซิลที่เอสเทอร์ไฟด์กับหมู่เมทิลได้เป็น เมทิลเอสเทอร์ ($-\text{COOCH}_3$) ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) (Duvetter *et al.*, 2009)

เมื่อผลไม้ดิบเพกทินจะอยู่ในรูปของโพรโทเพกทินซึ่งไม่ละลายในน้ำ เนื่องจากมีหมู่เมทิลซึ่งเป็นหมู่ไฮโดรโฟบิกอยู่บนโมเลกุลของกรดพอลิกลาลักตินิก (polygalacturonic acid) จำนวนมาก อัตราส่วนของโพรโทเพกทินและเพกทินใช้เป็นตัวบ่งชี้ระยะความแก่ของผลสตรอเบอรี่ได้ และยังใช้บ่งชี้ความนุ่ม และการสลายตัวของผนังเซลล์ได้ด้วย นอกจากนี้ยังมี แคลเซียมไอออนที่รวมกับโพรโทเพกทินเป็นเกลือแคลเซียมเพกเตต (Ca-pectate) ซึ่งไม่สามารถละลายในน้ำได้ ทำให้ผลสตรอเบอรี่มีความแน่นเนื้อสูง แต่เมื่อผลไม้สุกปริมาณแคลเซียมจะลดลง

และโมเลกุลของโปรโทเพกทินจะถูกสลายกลายเป็นเพกทินและกรดเพกติก (pectic acid) ซึ่งละลายได้ดีในน้ำได้ (Duvetter *et al.*, 2009; Sila *et al.*, 2009; Van Buggenhout *et al.*, 2009)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างเพกทิน

ที่มา : Zamora (2012)

2.2.1.1 การเปลี่ยนแปลงของเอนไซม์ที่มีผลต่อความแน่นเนื้อ

องค์ประกอบแต่ละชนิดในผนังเซลล์จะมีเอนไซม์เฉพาะที่ใช้สำหรับตัดแปรโครงสร้างเอนไซม์เหล่านี้ทำงานสัมพันธ์กันหรือการทำงานของเอนไซม์ชนิดหนึ่งอาจจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์อีกชนิดหนึ่ง เอนไซม์หลักที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายโมเลกุลของสารประกอบเพกทิน ได้แก่ เพกทินเมทิลเอสเทอเรส (pectinmethylesterase, PME) พอลิกลาแล็กตูโรเนส (polygalacturonase, PG) และเพกเตตไลเอส (pectate lyase, PL)

PME เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์หมู่เมทิล (demethoxylation) ออกจากโมเลกุลของเพกทินทำให้ได้กรดเพกติก หรือกรดเพกติกิก หรือเพกทินที่มีเอสเทอร์ต่ำ (carboxylated pectin) และเมทานอล (Draye and Van Cutsem, 2008) โดยโมเลกุลของเพกทินที่ไม่มีหมู่เมทิลและมีหมู่คาร์บอกซิลอิสระจะสามารถเชื่อมโยงข้าม (cross-link) กับไอออนที่มีเวเลนซ์สอง (divalent ions) เช่น แคลเซียมไอออนได้สร้างเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส หรือเป็นสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเมอร์ (depolymerization) โดยเอนไซม์ PG ทำให้เกิดการนิ่มของเนื้อเยื่อ

PG เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการสลายพันธะไกลโคไซด์ในโมเลกุลของเพกทินให้สั้นลง (Draye and Van Cutsem, 2008) โดยเอนไซม์ที่พบมีทั้ง exo และ endo PG โดย endo PG จะช่วยย่อยสลายพันธะแอลฟา 1,4 โดยการสุมไฮโดรไลซ์ทั่วทั้งโมเลกุลของเพกทิน ส่วน exo PG จะช่วยย่อยสลายพันธะแอลฟา 1,4 จากปลายของโมเลกุลด้าน non-reducing เท่านั้น ดังนั้นการทำงานของ endo PG จะทำให้โมเลกุลของเพกทินถูกตัดออกเป็นสายสั้นๆ อย่างรวดเร็ว และทำให้ผลไม้อ่อนนิ่มลง (จริงแท้, 2550)

PME และ PG ไม่ใช้เอนไซม์เพียงสองชนิดที่ทำให้เกิดการอ่อนตัวของเนื้อเยื่อพืช ถึงแม้ว่า ผลการศึกษาพบความเกี่ยวข้องกับคุณภาพในหลายประเด็น เพกทินถูกย่อยสลายได้จากการทำงานอย่างต่อเนื่องของเอนไซม์ PME และ PG โดยปฏิกิริยาการแยกหมู่เมทิลและปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเมอร์ ตามลำดับ การทำงานของเอนไซม์ทั้งสองจำกัดอยู่ในพืชโดยพบกิจกรรมของเอนไซม์ สูงสุดในเนื้อเยื่อที่ถูกทำลายหรือเป็นแผลและระหว่างการสุก พืชที่มีระดับเอนไซม์ PG สูง เช่น มะเขือเทศ และอะโวคาโด ส่วนแครอท ถั่ว และสตรอเบอรี่พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ PG ต่ำมาก จึงไม่มีผลกระทบต่อเนื้อสัมผัส เช่น ความกรอบ และความแข็งของผลไม้ (Duvetter *et al.*, 2009; Sila *et al.*, 2008)

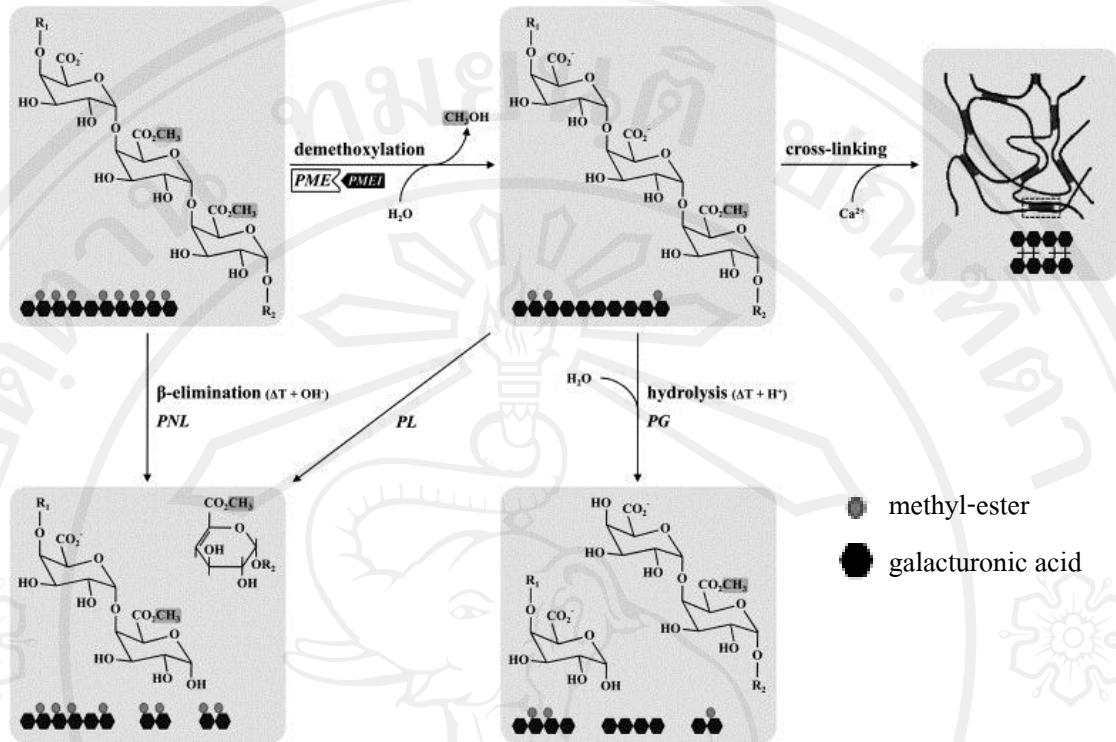
PL เป็นเอนไซม์ย่อยสลายโมเลกุลของกรดเพกติกได้เป็นกรดกาแล็กทูโรนิก (galacturonic acid) ในตำแหน่งเดียวกับเอนไซม์ PG แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการสลายพอลิเมอร์ของเพกทินโดยกลไกปฏิกิริยาการขจัดชนิดบีตา (β -elimination) แตกต่างจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอนไซม์ PG (จริงแท้, 2550) ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งแบบตัดพันธะภายใน (endo-acting) หรือตัดพันธะด้านปลายสายพอลิเมอร์ (exo-acting) และทำงานจำเพาะกับโอลิโกแซ็กคาไรด์สายสั้น (short oligosaccharides) (Duvetter *et al.*, 2009)

นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ลูลอส ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการอ่อนตัวของผลไม้ระหว่างการสุก โดยกิจกรรมของเอนไซม์เซลล์ลูลาส (cellulase) จะเพิ่มขึ้นในระหว่างการสุกของผลไม้บางชนิด ด้วยเหตุนี้ผลไม้สุกจึงมีลักษณะอ่อนนุ่ม ส่งผลให้ความแน่นเนื้อของผลไม้ลดลง ผิวมีความต้านทานต่อการเสียหายเชิงกลลดลงและซอกซ้าได้ง่าย (จริงแท้, 2544)

ภาพที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของเพกทินโดยกิจกรรมของเอนไซม์บางชนิด

2.2.1.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผนังเซลล์ที่ไม่ได้เกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์

การแยกเป็นส่วนย่อย (fragmentation) ของพอลิเมอร์เนื่องจากอนุมูลไฮดรอกซิลที่ไวต่อปฏิกิริยา ระหว่างกระบวนการแปรรูปโดยใช้ความร้อนเพกทินอาจเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเมอร์ โดยมีกรดหรือเบสอย่างใดอย่างหนึ่งเป็นตัวเร่งที่ค่าพีเอชต่ำ (≤ 3.5) เกิดปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสในสภาวะที่เป็นกรด (acid hydrolysis) ถึงแม้ว่ายังไม่ค่อยพบมากในกระบวนการแปรรูปอาหารทั่วไป และเพกทินที่มีจำนวนเมทอกซีเอสเทอร์ต่ำ (low methoxy pectin) จะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเมอร์ได้เร็วกว่าเพกทินที่มีจำนวนเมทอกซีเอสเทอร์สูง (high methoxy pectin) (Sila *et al.*, 2009)



ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเพกตินที่เกิดจากเอนไซม์และไม่ได้เกิดจากเอนไซม์

เมื่อ PME (pectin methyl esterase)	คือ เอนไซม์เพกตินเมทิลเอสเทอร์
PMEI (PME inhibitor)	คือ ตัวยับยั้งเอนไซม์เพกตินเมทิลเอสเทอร์
PNL (pectin lyase)	คือ เอนไซม์เพกตินไลเอส
PL (pectate lyase)	คือ เอนไซม์เพกเตตไลเอส
PG (polygalacturonase)	คือ เอนไซม์พอลิแกล็กทูโรเนส
R1/R2	คือ ส่วนเริ่มต้น/ส่วนท้ายของสายเพกติน
ΔT	คือการให้ความร้อน

ที่มา : Jolie *et al.* (2012)

เพกตินที่ค่าพีเอชที่สูงขึ้น (≥ 4.5) และที่อุณหภูมิสูง (>80 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นสภาวะที่พบบ่อยระหว่างกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน ปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเมอร์ของเพกตินจะเกิดขึ้นในสภาวะที่ค่อนข้างเป็นกลาง ข้อกำหนดของปฏิกิริยาการจัดชนิดปีตา คือพอลิเมอร์ต้องมีหมู่เมทิลเอสเทอร์ (methyl ester) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 (C-6) ซึ่งการมีหมู่นี้ช่วยให้หมู่ H-5 ให้มีความเป็นกรดพอที่จะถูกย้ายออกโดยเบส อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น เนื่องจากไฮดรอกซิลไอออน (hydroxyl ion) เป็นตัวเริ่ม (initiate) ปฏิกิริยา (Sila *et al.*, 2009)

เนื่องจากปฏิกิริยาการจัดชนิดปีตาขึ้นอยู่กับปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของเพกทิน ในเนื้อเยื่อพืช ดังนั้นถ้าสามารถกำหนดระดับการเกิดเมทิลเอสเทอร์ (degree of methylesterification) ของเพกทินได้จะสามารถควบคุมปฏิกิริยาการจัดชนิดปีตาได้ การกำหนดระดับการเกิดเมทิลเอสเทอร์ของเพกทินสามารถทำได้โดยอาศัยพันธุวิศวกรรมโดยการกระตุ้นการทำงานของ PME ที่มีอยู่ภายในเนื้อเยื่อพืช (endogenous) หรือที่เติมจากภายนอก (exogenous) ลงไป

2.3 การเก็บรักษาผลสตรอเบอรี่สดด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง

สตรอเบอรี่เป็นผลไม้ชนิด non-climacteric จึงต้องเก็บเกี่ยวขณะที่ผลสุกพร้อมบริโภค ทำให้มีอายุการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวค่อนข้างสั้น ประกอบกับฤดูกาลผลิตของผลสตรอเบอรี่มีเฉพาะช่วงฤดูหนาว ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมต้องเก็บรักษาผลสตรอเบอรี่ไว้ในรูปแช่เยือกแข็ง หลังจากนั้นจึงนำผลสตรอเบอรี่มาหาลอมละลายก่อนนำไปแปรรูป

การแช่เยือกแข็งผลไม้เป็นวิธีการเก็บรักษาและถนอมอาหารที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันเนื่องจากสามารถทำได้ง่าย ขั้นตอนไม่ยุ่งยาก แต่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีและสามารถคงคุณภาพของผลไม้ได้เป็นเวลานาน ซึ่งภายหลังการเก็บรักษาพบว่าคุณภาพทางด้านรสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการไม่แตกต่างกับเมื่อเริ่มต้นเก็บรักษา และให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเก็บรักษาด้วยวิธีอื่น เนื่องจากกระบวนการเก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิต่ำสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ การเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีลดลง และชะลอกิจกรรมต่างๆ ภายในเซลล์ได้ (Delgado and Sun, 2000)

การแช่เยือกแข็งไม่ได้เป็นการทำลายเอนไซม์หรือจุลินทรีย์ นอกจากนี้จุลินทรีย์ต่างชนิดกันจะมีความทนทานต่ออุณหภูมิต่ำได้แตกต่างกันด้วย เซลล์ของยีสต์ รา และแบคทีเรียแกรมลบจะถูกทำลายได้ง่ายที่สุด ส่วนแบคทีเรียแกรมบวกและสปอร์ของราจะมีความทนทาน ดังนั้นจึงนิยมลวกผลไม้ หรือล้างด้วยสารฆ่าเชื้อก่อนการแช่เยือกแข็ง (วิไล, 2547) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็งโดยทั่วไปจะเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งจะช่วยชะลอการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการและรักษาคุณภาพของอาหารไว้ได้

การเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็งเป็นเวลานานไม่มีผลต่อคุณภาพของอาหาร หากสามารถรักษาระดับของอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาได้อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับอุณหภูมิจะเกิดในระหว่างขั้นตอนกระบวนการผลิตที่ใช้ระบบทำความเย็น หรือระหว่างเก็บรักษา ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็ง เนื่องจากการเก็บรักษาในสภาวะที่อุณหภูมิไม่คงที่ จะทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ (recrystallization) ซึ่งเกิดจากการก่อผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นใหม่และจะไปทำลายเนื้อเยื่อ ทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็ง

(Canet *et al.*, 2005) ถ้ามีความร้อนเข้าไปในเครื่องแช่เยือกแข็ง ผิวหน้าของอาหารจะอุ่นขึ้นเล็กน้อย และทำให้น้ำแข็งละลายเป็นบางส่วน ผลึกน้ำแข็งที่ละลายจะทำให้ความดันไอเพิ่มมากขึ้น ความชื้นจึงเคลื่อนที่ไปบริเวณที่มีความดันต่ำกว่าเป็นผลทำให้อาหารแห้งจากการสูญเสียไอน้ำ เมื่ออุณหภูมิลดลงอีกไอน้ำจะไม่สร้างนิวเคลียสใหม่ แต่จะรวมตัวกับผลึกที่มีอยู่แล้วทำให้ผลึกนั้นใหญ่ขึ้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงลดลง

2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเนื้อเยื่อผลไม้ระหว่างการแช่เยือกแข็ง

ภายในเนื้อเยื่อพืชประกอบไปด้วยเซลล์ที่มีโครงสร้างของผนังเซลล์ห่อหุ้มไว้ จึงทำให้เซลล์แต่ละเซลล์แบ่งแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน และทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเซลล์ภายในเนื้อเยื่อ ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดการแบ่งชั้นได้เป็นภายนอกเซลล์และภายในเซลล์ ดังนั้นการทำให้เซลล์ของสารละลายต่างๆ จึงขึ้นอยู่กับสมบัติของผนังเซลล์ หากผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์มีประสิทธิภาพในการทำงานดี จะมีสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและน้ำเท่านั้นที่สามารถซึมผ่านได้ (Reid and Barrett, 2005) กระบวนการแช่เยือกแข็งแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการ ได้แก่

2.4.1 กระบวนการแช่เยือกแข็งที่อัตราเร็วต่ำ

กระบวนการแช่เยือกแข็งที่อัตราเร็วต่ำจะทำให้เกิดการก่อผลึกของน้ำแข็งภายนอกเซลล์และส่งผลให้เกิดกระบวนการออสโมซิสของน้ำจากภายในเซลล์ออกมาพร้อมกับน้ำภายนอกเซลล์ และก่อผลึกเป็นน้ำแข็ง ทำให้อาหารละลายภายในเซลล์มีความเข้มข้นสูงขึ้น เนื่องจากจากการแช่เยือกแข็งผลไม้ที่อัตราเร็วต่ำ มีการก่อผลึกน้ำแข็งอย่างช้าๆ จึงมีเวลามากพอที่น้ำจากภายในเซลล์จะเคลื่อนย้ายออกมาภายนอกเซลล์ ส่งผลให้เซลล์เกิดการหดตัวและเยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลาย ซึ่งผนังเซลล์ที่ถูกทำลายนี้จะทำให้น้ำที่เคลื่อนย้ายออกจากเซลล์ไม่สามารถกลับเข้าสู่เซลล์ได้ ในการละลายน้ำแข็งของผลไม้ เซลล์จะไม่กลับมามีรูปร่างและโครงสร้างดั้งเดิม ผลไม้จะนิ่มและและสารอาหารต่างๆ ภายในเซลล์จะไหลออกจากเซลล์ที่เสียหาย (Reid and Barrett, 2005)

ผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นภายในเนื้อเยื่อ หรือภายในองค์ประกอบส่วนใดของเซลล์นั้นขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง การกระจายตัวของความร้อนสู่บรรยากาศ อุณหภูมิของตัวอย่างและลักษณะของเซลล์ (Skrupskis *et al.*, 2008) กระบวนการแช่เยือกแข็งและการหลอมละลายมีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผลไม้ โดยอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งที่ต่ำ (ต่ำกว่า 1 องศาเซลเซียสต่อนาที) จะมีผลต่อการเสียดสีของไมโครไฟบริลโปรตีน ภายหลังการหลอมละลายผลไม้แช่เยือกแข็งจะทำให้มีปริมาณการสูญเสียของเหลวสูง (Zaritzky, 2006) ซึ่งสาเหตุมา

จากเนื้อเยื่อของผลไม้ถูกทำลายและเกิดความแตกต่างของขนาดผลึกน้ำแข็งที่อยู่ระหว่างช่องว่างภายในเนื้อเยื่อ

2.4.2 กระบวนการแช่เยือกแข็งที่อัตราเร็วสูง

การแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็วสามารถลดปัญหาการเสียหายของไมโครไฟบริลโปรตีนได้ โดยมีการดึงความร้อนและการก่อผลึกของน้ำแข็งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก และสารละลายภายนอกเซลล์ที่ยังไม่ก่อผลึกเป็นน้ำแข็งมีความเข้มข้นสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ยังคงมีความสมดุลของสารละลายเนื่องจากการก่อผลึกน้ำแข็งของสารละลายภายในเซลล์ด้วยเช่นกัน จึงเป็นการลดปัญหาการเคลื่อนย้ายของน้ำระหว่างเซลล์ (Delgado and Rubiolo, 2005; Holzwarth *et al.*, 2012; Van Buggenhout *et al.*, 2009)

การแช่เยือกแข็งผลไม้บางชนิดที่มีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูง จะเกิดการแตกของผลิตภัณฑ์ หรือที่เรียกว่า freeze-cracking โดยมีสาเหตุมาจากการแข็งตัวของอาหารภายนอกอย่างรวดเร็ว จึงไปกั้นไม่ให้บริเวณเนื้อส่วนกลางแข็งตัว ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของสารจากภายในเมื่อแรงดันจากภายในผลไม้มากกว่าความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์จึงทำให้เกิด freeze-cracking ได้ (Hung, 1997; Sun, 2006)

Delgado and Rubiolo (2005) ได้ทำการทดลองแช่เยือกแข็งผลสตรอเบอรี่ด้วยอัตราเร็วแตกต่างกันและนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าการแช่เยือกแข็งแบบเร็วเนื้อเยื่อของผลสตรอเบอรี่จะไม่ถูกทำลายมากเท่ากับการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่เนื้อเยื่อถูกทำลายและเกิดการเหี่ยวของเซลล์ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 นอกจากนี้ยังพบว่าการแช่เยือกแข็งผลสตรอเบอรี่แบบเร็วได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบชิมในด้านคุณภาพทางด้านสี เนื้อสัมผัส กลิ่น และรูปลักษณะทั้งผล มากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้า (Sahari *et al.*, 2004)

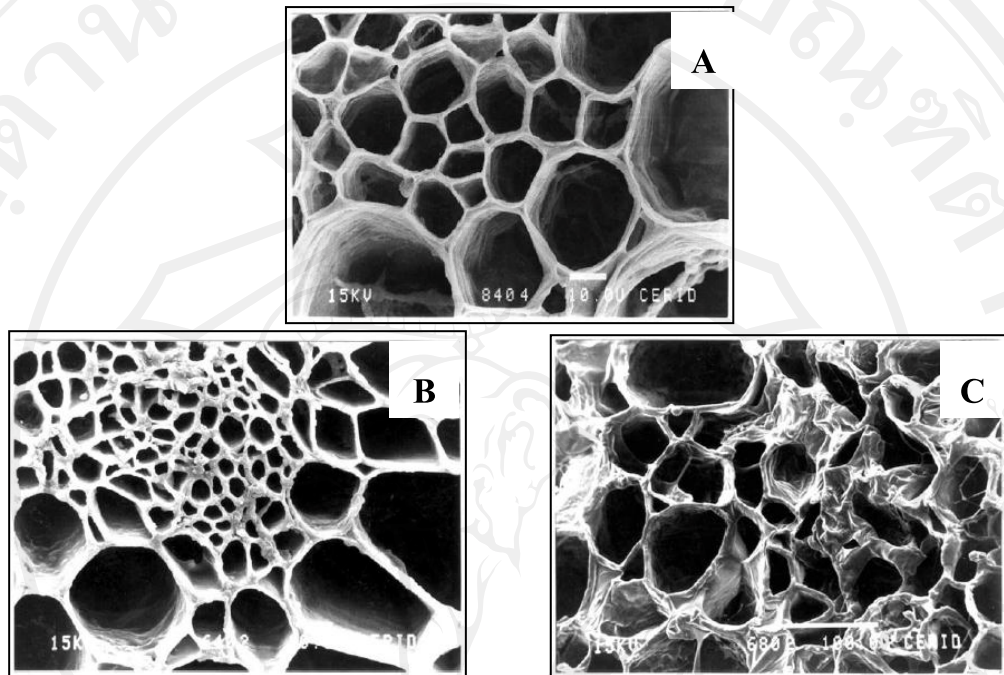
2.5 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลไม้แช่เยือกแข็งระหว่างการเก็บรักษาและหลอมละลาย

2.5.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

ก. การเปลี่ยนแปลงสี

การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อผลไม้มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารสีที่เป็นองค์ประกอบภายในเนื้อผล เช่น แอนโทไซยานิน คลอโรฟิลล์ และแคโรทีนอยด์ ซึ่งสารสีที่พบในสตรอเบอรี่ คือ แอนโทไซยานินซึ่งเป็นสารที่ให้สีแดง และละลายได้ดีในน้ำ โดยปริมาณแอนโทไซยานินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระหว่างการสุกของผลสตรอเบอรี่ การแช่เยือกแข็งไม่ได้เป็นการทำลายเอนไซม์ในผลไม้ ดังนั้นแอนโทไซยานินอาจเกิดการสูญเสียระหว่างการ

หลอมละลาย เนื่องจากกิจกรรม เอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น เอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenoloxidases : PPO) (จริงแท้, 2550)



ภาพที่ 2.4 ลักษณะเนื้อเยื่อของผลสตรอเบอรี่ที่ถ่ายโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

- (A) ผลสตรอเบอรี่สด
- (B) ผลสตรอเบอรี่ที่แช่เยือกแข็งแบบเร็ว
- (C) ผลสตรอเบอรี่ที่แช่เยือกแข็งแบบช้า

ที่มา : Delgado and Rubiolo (2005)

การเก็บรักษาและแช่เยือกแข็งผลสตรอเบอรี่ ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน มีปริมาณแอนโทไซยานินในผลสตรอเบอรี่ที่หลอมละลายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแอนโทไซยานินของผลสตรอเบอรี่สด แต่ผลสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็งมีปริมาณแอนโทไซยานินเพิ่มมากขึ้นกว่าผลสด อาจเนื่องมาจากการเสียสภาพของโครงสร้างเซลล์ขณะทำการแช่เยือกแข็งและการหลอมละลาย จึงทำให้แอนโทไซยานินถูกสกัดออกมาภายนอกเซลล์ได้มากขึ้นกว่าเดิม (Scibisz and Mitek, 2007) ซึ่งสอดคล้องกับการสกัดแอนโทไซยานินจากผลสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็งที่ทำการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีปริมาณแอนโทไซยานินมากกว่าผลสตรอเบอรี่ที่ทำการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว เนื่องมาจากการแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ซึ่งไป

ทำลายเซลล์ได้มากกว่า (Sahari *et al.*, 2004) สำหรับการรักษ ปริมาณแอนโทไซยานินในระหว่าง การแช่เยือกแข็งของผลราสเบอร์รี่ ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ปริมาณกรดอินทรีย์ ความเข้มข้นของน้ำตาล และปริมาณของแอนโทไซยานินเมื่อเริ่มต้นก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง (De Ancos *et al.*, 2000) อุณหภูมิในการเก็บรักษามีผลต่อสีของผลสตรอเบอรี่ โดยการเก็บผลสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็งที่ อุณหภูมิ -12, -18 และ -24 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน พบว่าที่อุณหภูมิ -24 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียแอนโทไซยานินน้อยที่สุดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก (Sahari *et al.*, 2004)

การเปลี่ยนแปลงสีของผลสตรอเบอรี่ภายหลังการหลอมละลายที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่า a^* เพิ่มขึ้นจากช่วง 22.3-25.3 เป็น 31.8 -41.3 และไม่พบความแตกต่างเมื่อหลอมละลายที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือการหลอมละลายที่ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และการหลอมละลายโดยใช้ไมโครเวฟเป็นเวลา 10 นาที (Holzwarth *et al.*, 2012) การเปลี่ยนแปลงค่า a^* เกิดจากการเคลื่อนตัวของสารสีจากศูนย์กลาง ของผลสตรอเบอรี่ไปยังผนังเซลล์เนื่องจากผนังเซลล์ถูกทำลาย (Ngo *et al.*, 2007)

ข. การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัส

ผลไม้มีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักผล น้ำและ ส่วนประกอบทางเคมีภายในผลไม้เหล่านี้จะเหนียวทำให้เกิดการแข็งตัวของผนังเซลล์ในระหว่าง การแช่เยือกแข็ง ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างและลักษณะเนื้อสัมผัส หากใช้การแช่เยือกแข็งแบบช้าจะทำให้ อัตราเร็วในการแข็งตัวช้าและมีการกระจายตัวของผลึกน้ำแข็งน้อย น้ำแข็งจะเกาะกันเป็น กลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลายและเกิดการสูญเสียความต่งภายในเซลล์ของผลไม้ ภายหลังการหลอมละลายเนื้อผลไม้แช่เยือกแข็งจะสูญเสียของเหลวและมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ทางประสาทสัมผัส เช่น ความกรอบและความฉ่ำน้ำ ซึ่งจะส่งผลทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสอ่อนนิ่ม กว่าผลไม้สดก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง (Buggenhout *et al.*, 2006) ดังนั้นควรใช้วิธีการแช่เยือกแข็งที่มี อัตราเร็วสูง เพราะเนื้อผลไม้มีความอ่อนนิ่มและสูญเสียคุณภาพได้ง่าย การใช้วิธีแช่เยือกแข็งที่มี ประสิทธิภาพจะช่วยลดการเสียสภาพของเซลล์และเนื้อเยื่อได้ โดยภายหลังการลดอุณหภูมิจะเกิด การเคลื่อนย้ายของน้ำภายในเซลล์น้อยมาก ลดการแตกของผนังเซลล์ส่งผลให้ผลไม้แช่เยือกแข็ง และภายหลังการหลอมละลายมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดี (Zaritzky, 2006)

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นขณะทำการหลอมละลายคือน้ำแข็งที่ผิวหน้าของอาหารจะละลาย กลายเป็นชั้นน้ำ ในการละลายน้ำแข็งในอาหารหรือในน้ำมีการแพร่ของความร้อนต่ำกว่าน้ำแข็ง จะทำให้อัตราการนำความร้อนของผิวหน้าสู่น้ำแข็งด้านในของอาหารลดลง การหลอมละลายของ อาหารแช่เยือกแข็งจึงใช้เวลานานกว่าการแช่เยือกแข็งอาหาร ในระหว่างการหลอมละลายผลไม้ แช่เยือกแข็งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ ซึ่งผลไม้ที่ทำการแช่เยือกแข็ง

ด้วยอัตราเร็วต่ำ ภายหลังการหลอมละลายจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเกิดการตกผลึกใหม่ (recrystallization) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร ทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์เกิดการเสียสภาพ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ ซึ่งนำไปสู่การรั่วซึมของของเหลว (Zaritzky, 2006) และได้มีการนำวิธีระบบความดันสูงมาใช้ในการหลอมละลาย ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพโดยมีอัตราเร็วในการหลอมละลายสูง (Lebail *et al.*, 2002) มีงานวิจัยที่เปรียบเทียบวิธีการหลอมละลาย ผลสตรอบอรี่ 5 วิธี คือ การหลอมละลายที่อุณหภูมิห้อง (22 องศาเซลเซียส) การหลอมละลายในอ่างน้ำ (water bath) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส การหลอมละลายด้วยเครื่องรักษาอุณหภูมิ (cryostat) ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส การหลอมละลายในตู้เย็น ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และการหลอมละลายด้วยระบบความดันสูง (high-pressure induced thawing, HPIT) พบว่าการหลอมละลายด้วยวิธี HPIT มีปริมาณการสูญเสียของเหลวต่ำที่สุด แต่การหลอมละลายผลสตรอบอรี่แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิห้องให้ค่าความแน่นเนื้อมากกว่าการหลอมละลายในอ่างน้ำและวิธี HPIT (Buggenhout *et al.*, 2006)

2.5.2. การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

ก. ปริมาณน้ำในผลไม้แช่เยือกแข็ง

เมื่อทำการแช่เยือกแข็งผลไม้ในน้ำภายในผลไม้จะเกิดการแข็งตัวเป็นผลึกน้ำแข็ง และเมื่อน้ำผลไม้เริ่มมาหลอมละลาย พบว่าปริมาณน้ำที่มีภายในผลไม้ลดลง เนื่องจากผลึกน้ำแข็งจะละลายและไหลออกจากเซลล์บริเวณที่โครงสร้างเซลล์เสียหายจากการแช่เยือกแข็ง ทำให้ปริมาณน้ำที่มีในผลไม้ลดลง โดยปริมาณน้ำที่สูญเสียออกจากผลสตรอบอรี่จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ เนื่องจากแต่ละสายพันธุ์มีลักษณะและความแข็งแรงของผนังเซลล์แตกต่างกัน (Buggenhout *et al.*, 2006) วิธีการที่ใช้แช่เยือกแข็งผลไม้มีผลต่อการสูญเสียน้ำออกจากผลไม้ภายหลังการหลอมละลายเช่นกัน โดยการแช่เยือกแข็งแบบช้าจะทำให้ผลสตรอบอรี่ภายหลังการหลอมละลายมีปริมาณน้ำสูญเสียออกมามากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว เนื่องจากทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ไปทำลายผนังเซลล์ (Delgado and Rubiolo, 2005; Holzwarth *et al.*, 2012; Van Buggenhout *et al.*, 2009)

การหลอมละลายต่างวิธีมีผลต่อการสูญเสียน้ำผลการเปรียบเทียบวิธีการหลอมละลายผลสตรอบอรี่ 4 วิธี คือ หลอมละลายที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลอมละลายที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลอมละลายที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และหลอมละลายโดยไม่โครเวฟเป็นเวลา 10 นาที พบว่า การหลอมละลายที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงมีการสูญเสียน้ำออกจากผลไม้ น้อยที่สุดคือ 9.1 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือหลอมละลายที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส หลอมละลายโดยไม่โครเวฟ และ

หลอมละลายที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส สูญเสียน้ำออกจากผลไม้เท่ากับ 11.6, 16.8 และ 17.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มเวลาในการหลอมละลายเป็น 48 ชั่วโมง พบว่าการหลอมละลายที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 22.6 เปอร์เซ็นต์ และการหลอมละลายที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สูญเสียน้ำเพิ่มขึ้น 16.8 เปอร์เซ็นต์ แต่การหลอมละลายที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 24 ชั่วโมง สูญเสียน้ำออกจากผลสตรอเบอรี่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Holzwarth *et al.*, 2012)

ผลการศึกษาการสูญเสียของเหลวของผลสตรอเบอรี่ภายหลังการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -25, -18 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงทุกๆ 48 ชั่วโมง โดยอยู่ในช่วง -25 ถึง -18 องศาเซลเซียส ภายหลังการเก็บรักษา เป็นเวลา 24 สัปดาห์ พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิมั่วเสมอ -25 องศาเซลเซียส ผลสตรอเบอรี่สูญเสียของเหลวน้อยที่สุด ในขณะที่การเก็บรักษาที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทุกๆ 48 ชั่วโมง สูญเสียของเหลวมากที่สุด (Pukszta and Palich, 2007) เนื่องจากเกิดการตกผลึกใหม่ ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและไปทำลายผนังเซลล์ของผลสตรอเบอรี่

ข. ปริมาณกรดและค่าพีเอชในผลไม้แช่เยือกแข็ง

การเก็บรักษาผลไม้โดยการแช่เยือกแข็งช่วยลดการสูญเสียปริมาณกรดระหว่างการเก็บรักษาได้ดี การเก็บรักษาผลสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -12, -18 และ -24 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดที่มีในผลสตรอเบอรี่ลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น และพบว่าการเก็บผลสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำ ยังมีการสูญเสียปริมาณกรดน้อย โดยการเก็บรักษาผลสตรอเบอรี่ที่อุณหภูมิ -12 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือนมีปริมาณกรดทั้งหมดลดลงจาก 1.22 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 1.08 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณกรดแอสคอรบิกลดลงจาก 52 เหลือเพียง 18.5 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม แต่การเก็บรักษาผลสตรอเบอรี่ที่อุณหภูมิ -24 องศาเซลเซียส มีปริมาณกรดทั้งหมดเหลือ 1.14 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณกรดแอสคอรบิกเท่ากับ 47.4 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และมีการเพิ่มขึ้นของพีเอชเพียงเล็กน้อย ส่วนวิธีการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกันคือการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว ไม่มีผลต่อปริมาณกรดและค่าพีเอชในผลสตรอเบอรี่ (Sahari *et al.*, 2004) การแช่เยือกแข็งผลสตรอเบอรี่และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 เดือน มีปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้คงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บ (Suutarinen *et al.*, 2002)

ค. ปริมาณน้ำตาลในผลไม้แช่เยือกแข็ง

การเก็บรักษาผลไม้ด้วยการแช่เยือกแข็งไม่มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำตาลในผลไม้ เช่นการแช่เยือกแข็งผลสตรอเบอรี่และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 เดือน มีปริมาณน้ำตาลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับผลสตรอเบอรี่สด แต่การจุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสที่มีแคลเซียมคลอไรด์ก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 เดือน ทำให้มีปริมาณน้ำตาลซูโครสสูงขึ้น 25-45 เปอร์เซ็นต์ (Suutarinen *et al.*, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองแช่เยือกแข็งผลสตรอเบอรี่และเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือนปริมาณน้ำตาลในผลสตรอเบอรี่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับผลสตรอเบอรี่ก่อนการแช่เยือกแข็ง แต่เมื่อจุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสหรือคลุกผลสตรอเบอรี่กับน้ำตาลซูโครสก่อนการแช่เยือกแข็งจะทำให้ผลสตรอเบอรี่ภายหลังการแช่เยือกแข็งมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น (Waldemar *et al.*, 2000)

ง. ปริมาณเพกทินในผลไม้แช่เยือกแข็ง

ผลการศึกษาปริมาณเพกทินในผลสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -8, -18, -40 และ -80 องศาเซลเซียส และนำออกมาวิเคราะห์ปริมาณเพกทินหลังภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 1 วัน และ 6 สัปดาห์ พบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิแตกต่างกันไม่มีผลต่อปริมาณเพกทินภายในผลสตรอเบอรี่ และไม่มีผลต่อความแน่นเนื้อของผลสตรอเบอรี่ แต่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -8 องศาเซลเซียส มีความไม่คงที่และอาจก่อให้เกิดการตกผลึกใหม่ได้ (Buggenhout *et al.*, 2006)

2.5.3. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านจุลินทรีย์

การแช่เยือกแข็งอาหาร ไม่ได้เป็นการทำลายจุลินทรีย์ แต่เป็นการยืดอายุการเก็บรักษา โดยหยุดยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำจะช่วยหยุดยั้งเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ นอกจากนี้การก่อผลึกน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่ำมาก ทำให้ระดับความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น ซึ่งสภาวะดังกล่าวเป็นพิษต่อจุลินทรีย์เพราะมีการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตาม กระบวนการแช่เยือกแข็งไม่สามารถทำลายจุลินทรีย์ให้หมดไปได้ ยังคงมีจุลินทรีย์บางส่วนที่มีชีวิตรอด ซึ่งจะก่อปัญหาภายหลังการหลอมละลาย การปนเปื้อนของจุลินทรีย์อาจมาจากแหล่งปลูกของผลไม้ กระบวนการแปรรูป คนงาน หรือจากผลไม้ชนิดอื่นๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการอยู่รอดของจุลินทรีย์ต่างๆ มีทั้งปัจจัยภายนอกคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาการเก็บรักษา อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง และอัตราเร็วในการหลอมละลาย ส่วนปัจจัยภายในคือ โครงสร้างของอาหาร ชนิดของจุลินทรีย์ และลักษณะทางกายภาพของจุลินทรีย์ (Hui *et al.*, 2004) สำหรับมาตรฐานของอาหาร

แช่เยือกแข็งที่กำหนดโดยสถาบันอาหารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ และ FAO/WHO ซึ่งได้กำหนดปริมาณจุลินทรีย์ในอาหารแช่เยือกแข็งมีได้ไม่เกิน 10^6 โคโลนีต่อกรัม

สาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลสตอเบอรี่เกิดการเน่าเสียมักเกิดจากเชื้อรา ได้แก่ โรคเน่าราสีเทา (gray mold) ซึ่งเกิดจากเชื้อ *Botrytis cinerea* (Ge *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2012a; Marquenie *et al.*, 2002; Vandendriessche *et al.*, 2012; Villa-Rojas *et al.*, 2012) และโรคผลเน่าซึ่งเกิดจากเชื้อ *Rhizopus* sp. (Romanazzi *et al.*, 2013; Vu *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2010) การเข้าทำลายผลไม้ของเชื้อราจะปลดปล่อยเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายเพกทิน นอกจากนี้ยังพบว่ามี การตรวจพบเชื้อ *E. coli* O157:H7 และ *Salmonella* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบที่ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ (วิไล, 2549) ในผลสตอเบอรี่แช่เยือกแข็ง เนื่องจากเป็นเชื้อที่ทนต่อกรดและสามารถอยู่รอดในสภาวะที่เป็นกรดได้ (Huang *et al.*, 2012b; Ma *et al.*, 2010; Oyarz *et al.*, 2003)

นอกจากนี้การห่อมละลายผลไม้แช่เยือกแข็งยังส่งผลต่อคุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ด้วย (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005) เนื่องจากจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหารแช่เยือกแข็งจะเป็นสาเหตุทำให้ อาหารเน่าเสียภายหลังการห่อมละลายได้ ดังนั้นจึงควรระมัดระวังการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในอาหารระหว่างขั้นตอนการห่อมละลาย โดยการบรรจุผลไม้ภายหลังการแช่เยือกแข็งในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิดก่อนนำไปเก็บรักษา หรือควรมีการลดจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้นจากวัตถุดิบก่อนการแช่เยือกแข็งหรือก่อนการห่อมละลาย โดยการจุ่มผลไม้ในสารฆ่าเชื้อหรือแช่ในน้ำร้อน

2.6 การลดปริมาณน้ำโดยวิธีออสโมซิส (Osmotic dehydration)

กระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันเป็นกระบวนการลดปริมาณน้ำออกจากผลไม้ได้วิธีหนึ่ง โดยการแช่ผลไม้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงหรือสารละลายที่มีปริมาณน้ำอิสระต่ำ จะทำให้เกิดกระบวนการออสโมซิส เนื่องจากมีความแตกต่างของแรงดันออสโมซิสระหว่างเซลล์ผลไม้และสารละลายออสโมซิส เกิดแรงขับ (driving force) ทำให้มีการถ่ายเทมวลสาร คือเกิดการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์ผลไม้ไปยังสารละลาย และมีการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายจากสารละลายซึมเข้าสู่ในผลไม้ ทำให้ผลไม้มีปริมาณน้ำลดลง (water loss) และปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น (solid gain) (Dermesonlouoglou *et al.*, 2007) ตัวอย่างเช่น ผลมะเขือเทศสด 100 กรัม แช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 65 องศาบริกซ์ เมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลจะสูญเสีย น้ำ 37 กรัม และมีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น 13.2 กรัม (Dit-udom-po and Pittarate, 2007)

การลดปริมาณน้ำโดยวิธีออสโมซิสนิยมใช้ในการรักษาความแน่นเนื้อของผลไม้ทั้งก่อนและหลังการแช่เยือกแข็ง ผลการทดลองแช่ผลสตอเบอรี่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 65 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นนำไปแช่เยือกแข็ง และเก็บรักษาเป็นเวลา 3 วัน เมื่อนำมา

หลอมละลายและประเมินคุณภาพ พบว่าผลสตรอเบอรี่ที่แช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำและค่าพีเอชมากกว่าผลสตรอเบอรี่ที่ไม่ได้แช่ในสารใดก่อนการแช่เยือกแข็ง (Haminiuk *et al.*, 2004) ข้อดีของการลดปริมาณน้ำโดยวิธีออสโมซิสก่อนการแช่เยือกแข็งคือ เป็นการลดน้ำอิสระ ซึ่งจะช่วยลดความเสียหายของผนังเซลล์และทำให้มีการเรียงองค์ประกอบใหม่ขณะแช่เยือกแข็ง (Suutarinen *et al.*, 2000a)

การหลอมละลายผลไม้แช่เยือกแข็งโดยวิธีนี้จะช่วยรักษาโครงสร้างของผนังเซลล์ผลไม้ไว้ได้ระหว่างการหลอมละลาย และขณะที่หลอมละลาย น้ำภายในเซลล์ของผลไม้จะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ไปสู่สารละลายซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่า และน้ำตาลภายในสารละลายจะเคลื่อนที่เข้าสู่เซลล์ของผลไม้ ซึ่งจะช่วยพุงโครงสร้างของเซลล์ไว้ไม่ให้เกิดการยุบตัว โดยพบว่ายิ่งสารละลายที่ใช้แช่ผลไม้มีความเข้มข้นสูง จะทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลน้ำตาลเข้าไปยังเซลล์ของผลไม้ได้เร็วยิ่งขึ้น (Castelló *et al.*, 2010; Suutarinen *et al.*, 2000a)

การเหี่ยวของเซลล์ผลไม้เกิดขึ้นได้หากปริมาณน้ำภายในเซลล์เคลื่อนย้ายออกมากจากเซลล์มากเกินไป โดยปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของน้ำออกจากเซลล์ผลไม้ ได้แก่

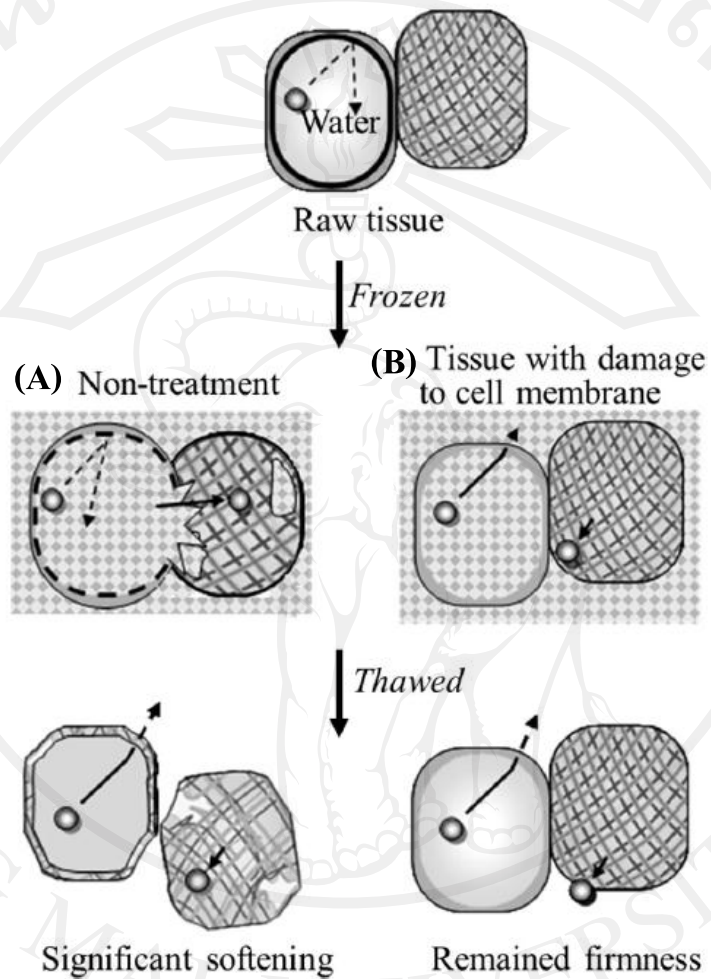
- ก. ระยะเวลาในการหลอมละลาย หากใช้เวลานานจะทำให้ น้ำแพร่อกจากเซลล์ได้มาก
- ข. ความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งหากมีความเข้มข้นสูงเกินไปจะทำให้ น้ำแพร่อกจากเซลล์ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นมากเกินไป ทำให้เซลล์เหี่ยวและสูญเสียลักษณะที่ดีของอาหารไปด้วย (Ferrando and Spiess, 2003)
- ค. อุณหภูมิของสารละลายมีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร เช่น การถ่ายเทมวลสารของเนื้อแก้วมังกรระหว่างการลดปริมาณน้ำโดยวิธีออสโมซิส โดยนำเนื้อแก้วมังกรแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิของสารละลาย 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่าการแช่เนื้อแก้วมังกรในสารละลายน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ของแข็งเพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์การสูญเสีย น้ำมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (Chalermchat and Boonprasom, 2008)
- ง. กรรมวิธีที่ใช้ เช่น การปั่น การจุ่ม และการใช้ระบบสุญญากาศ มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของผลไม้โดยวิธีนี้เช่นกัน เช่นการแช่ผลสตรอเบอรี่ในสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ ซึ่งผสมด้วยแคลเซียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้ทั้งการจุ่มและระบบสุญญากาศ จนกระทั่งในผลสตรอเบอรี่มีความเข้มข้น 15 และ 20 องศาบริกซ์ จากนั้นเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 วัน พบว่าผลสตรอเบอรี่ที่มีความแน่นเนื้อมากที่สุด คือที่แช่ในสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ ซึ่งผสมด้วยแคลเซียมคลอไรด์

1 เปอร์เซ็นต์ และใช้ระบบสุญญากาศจนกระทั่งผลสตรอเบอรี่มีความเข้มข้น 20 องศาบริกซ์ (Castelló *et al.*, 2010) การแช่ผลสตรอเบอรี่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 65 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างการจุ่มและระบบสุญญากาศ พบว่าการใช้ระบบสุญญากาศทำให้น้ำเชื่อมมีการจัดเรียงที่ดีกว่าแบบจุ่ม (Moreno *et al.*, 2000)

- จ. ลักษณะและรูปร่างของวัตถุดิบมีผลเช่นกัน เช่นการจุ่มผลสตรอเบอรี่รูปแบบต่างๆ ได้แก่ ผลสตรอเบอรี่ทั้งผล ผลสตรอเบอรี่ผ่าครึ่ง ผลสตรอเบอรี่หั่นชิ้นความหนา 5 และ 10 มิลลิเมตร ทำการแช่สตรอเบอรี่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส 50 เปอร์เซ็นต์ (w/v) เป็นเวลา 20, 35, 50 , 75, 100 และ 155 ชั่วโมง พบว่าสตรอเบอรี่หั่นชิ้นความหนา 5 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลในเนื้อสตรอเบอรี่มากที่สุด เนื่องจากมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อเนื้อสตรอเบอรี่มากกว่าตัวอย่างอื่นๆ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบภายในเนื้อสตรอเบอรี่สูงในช่วงแรก และลดลงเมื่อเวลาในการแช่เพิ่มมากขึ้น (Viberg and Sjöholm, 1998)

การป้องกันไม่ให้น้ำเข้าเซลล์ของผลไม้เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลไม้เกิดการอ่อนนิ่มลงภายหลังการแช่เยือกแข็งและหลอมละลาย โดยเมื่อผลไม้สดถูกแช่เยือกแข็ง ในช่วงเริ่มแรกของการแช่เยือกแข็ง การเกิดผลึกน้ำแข็งจะเกิดเฉพาะบางส่วนของผลไม้เท่านั้น อาจเกิดเฉพาะกับบางเซลล์หรือภายนอกเซลล์ ซึ่งทำให้เซลล์ที่อยู่ข้างเคียงที่ยังไม่ถูกแช่เยือกแข็งมีความเข้มข้นของแข็งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลึกน้ำแข็งจะมีความดันไอลดต่ำกว่าบริเวณภายในเซลล์ น้ำจากเซลล์จึงเคลื่อนที่ไปยังผลึกน้ำแข็ง (ภาพที่ 2.5A) ดังนั้นความแตกต่างระหว่างความดันไอของเซลล์จึงเป็นสาเหตุให้เกิดปรากฏการณ์พลาสโมไลซิส (plasmolysis) คือปรากฏการณ์ที่เซลล์สูญเสียน้ำ โปรโทพลาสซึมจะค่อยๆ หดตัวและรวมตัวเป็นก้อน เยื่อหุ้มเซลล์ค่อยๆ หดเข้ามา ทำให้เซลล์เหี่ยว (Ando *et al.*, 2012)

การลดปริมาณน้ำโดยวิธีออสโมซิสทำให้เซลล์เกิดความเสียหายบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ ซึ่งไม่เพียงแต่มีผลช่วยลดแรงดันเต่ง (turgor pressure) เท่านั้น แต่จะมีความแน่นเนื้อของผลไม้ ก็จะทำให้ความแข็งแรงของผนังเซลล์ลดลง เมื่อความแข็งแรงของผนังเซลล์ลดลงก่อนการแช่เยือกแข็ง น้ำภายในเซลล์จะสามารถแพร่ผ่านกันได้โดยง่าย ส่งผลให้การขยายและแตกออกของเซลล์ไม่เกิดขึ้น เนื่องจากภายในเซลล์มีปริมาณน้ำอยู่น้อย ดังนั้นความแน่นเนื้อของผลไม้จะยังคงถูกรักษาไว้ภายหลังการแช่เยือกแข็งและหลอมละลาย (ภาพที่ 2.5B)



ภาพที่ 2.5 ลักษณะเซลล์ของผลไม้

เส้นสีดำคือเยื่อหุ้มเซลล์ พื้นที่สีเทาคือภายนอกเยื่อหุ้มเซลล์ และพื้นที่สีขาวคือผนังเซลล์

(A) ผลไม้ที่ไม่ได้แช่สารละลายใดก่อนการแช่เยือกแข็ง

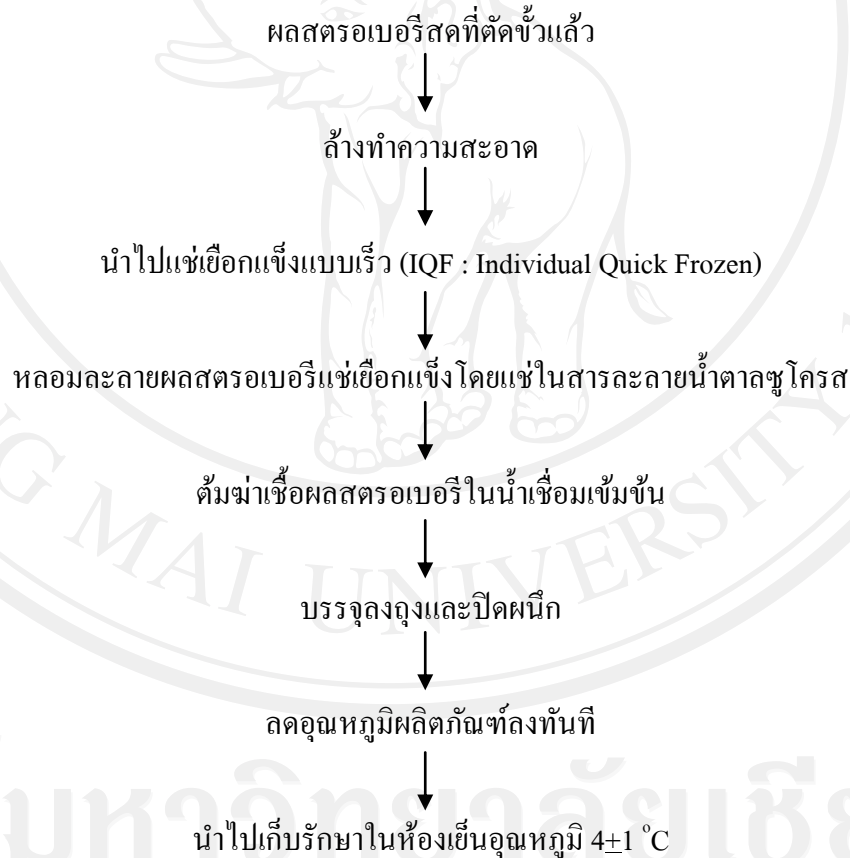
(B) ลดปริมาณน้ำโดยวิธีออสโมซิสก่อนการแช่เยือกแข็ง

ที่มา : Ando *et al.* (2012)

2.7 การแปรรูปผลสตรอบอรี่เป็นสตรอบอรี่ในน้ำเชื่อมเข้มข้น

สตรอบอรี่สามารถบริโภคได้ทั้งผลสดและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มความหลากหลายให้กับผู้บริโภค ได้แก่ แยมสตรอบอรี่ น้ำสตรอบอรี่เข้มข้น สตรอบอรี่อบแห้ง สตรอบอรี่กวน ไวน์สตรอบอรี่ และผลสตรอบอรี่ในน้ำเชื่อมเข้มข้น นอกจากนี้ยังใช้เป็น ส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ เช่น ลูกอม โยเกิร์ต และผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เป็นต้น

การแปรรูปผลสตรอบอรี่แช่เยือกแข็งให้อยู่ในรูปของผลสตรอบอรี่ในน้ำเชื่อมเข้มข้น เป็นอีกทางเลือกสำหรับการแปรรูป เนื่องจากสามารถส่งขายเพื่อนำไปเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อื่นได้ เช่น โยเกิร์ต ผลสตรอบอรี่ในน้ำเชื่อมเข้มข้น ซึ่งมีขั้นตอนการแปรรูปดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 กระบวนการผลิตสตรอบอรี่ในน้ำเชื่อมเข้มข้น

ที่มา : บริษัท ลานนาเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด (2554)

2.8 การปรับปรุงคุณภาพและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปจากผลไม้

โครงสร้างที่ทำให้เซลล์ของพืชมีความแข็งแรงคือผนังเซลล์ของพืช เนื่องจากเป็นชั้นที่อยู่ด้านนอกสุดของเซลล์พืช มีบทบาทสำคัญในการยึดเซลล์เข้าด้วยกันให้เป็นเนื้อเยื่อ ผนังเซลล์พืชประกอบด้วยโมเลกุลของเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์มีลักษณะเป็นสายเรียงตัวตามยาวเป็นกลุ่มๆ ต่อกันแบบหลวมๆ เชื่อมโยงกันเป็นตาข่าย ภายในช่องระหว่างสายมีสารกลุ่มลิกนิน คิวทิน ซูเบอริน และเพกทินแทรกอยู่ รวมเรียกว่า ไมโครไฟบริล ซึ่งมีเซลลูโลส 2,000 โมเลกุล (จริงแท้, 2550)

การใช้ความร้อนและการแช่เยือกแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างการแปรรูปเป็นสาเหตุทำให้ผนังเซลล์ หรือเมทริกซ์ที่ซับซ้อนเหล่านี้ถูกทำลาย กระบวนการแปรรูปพืชที่ใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและองค์ประกอบของเพกทิน (Thongsook, 2010) การเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของวัตถุดิบ ขั้นตอนและสถานะในการผลิต ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงหรือรักษาคุณภาพและเนื้อสัมผัสของผลไม้

2.8.1 การรักษาความแน่นเนื้อของผลไม้

การรักษาความแน่นเนื้อของผลไม้และผลิตภัณฑ์อาหารที่แปรรูปจากผลไม้นิยมใช้วิธีลวกที่อุณหภูมิต่ำร่วมกับการแช่ในสารละลายแคลเซียมไอออน ซึ่งเป็นสารที่ให้ความกรอบและทำให้มีเนื้อแน่นขึ้น (firming agents) เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (calcium salts) สารไฮโดรคอลลอยด์ (gelling hydrocolloids) และเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสในอาหารแปรรูปจากพืช (Sila *et al.*, 2008)

ก. แคลเซียมไอออน

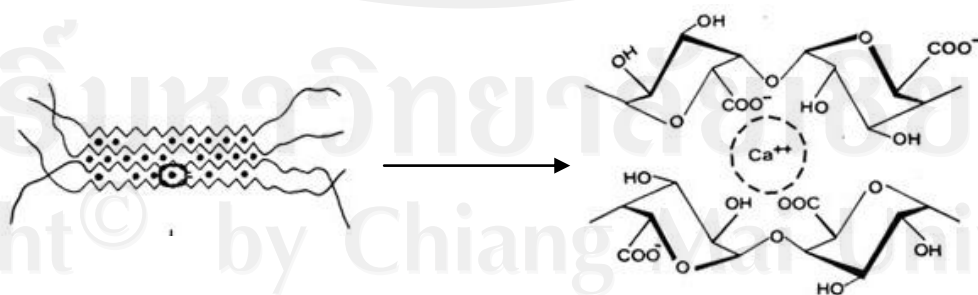
แคลเซียมไอออนจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบเพกทินบริเวณมิดเดิลลามেলা (middle lamella) และผนังเซลล์ โมเลกุลของพอลิกลาแล็กทูโลน (polygalacturonide) หรือเพกทินยึดเกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ผ่านแขนงของโมเลกุลซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลที่เป็นกลาง (neutral sugar) ได้แก่ อะราบินอกาแล็กแทน (arabinogalactan) และกาแล็กแทน (galactan) นอกจากนั้น บนแกนโมเลกุลของเพกทินยังมีหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic) อิสระ ซึ่งแคลเซียมไอออนสามารถสร้างพันธะระหว่างกลุ่มของหมู่คาร์บอกซิลิกได้ โดยทำให้เกิดการเชื่อมโยง (cross link) ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลบนสายพอลิกลาแล็กทูโลนกับประจุของแคลเซียมไอออน โดยแคลเซียมไอออนทำหน้าที่ดึงหมู่คาร์บอกซิลบนสายพอลิกลาแล็กทูโลนสายหนึ่งให้จับกับหมู่คาร์บอกซิลของสายพอลิกลาแล็กทูโลนสายหนึ่ง เกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า กล่องไข่ (egg box) (ภาพที่ 2.7) เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมเพกเตต ซึ่งไม่ละลายในน้ำและช่วยให้

ผนังเซลล์มีความเสถียรคงที่อยู่มาก (Vicente *et al.*, 2007) นอกจากนี้แคลเซียมไอออนยังช่วยลดการละลายของเพกทินได้ (Lara *et al.*, 2004) ดังนั้นหากขาดแคลเซียมไอออนแล้วโครงสร้างของผนังเซลล์จะอ่อนแอลงทำให้เนื้อผลไม้อ่อนนุ่ม ในทางปฏิบัติพบว่าทำให้แคลเซียมไอออนกับผลไม้ทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวจะช่วยทำให้ผลไม้รักษาความแน่นเนื้อไว้ได้นานกว่าปกติ นอกจากนี้กระบวนการสุกต่างๆ จะช้าลงด้วย (จริงแท้, 2550)

การใช้แคลเซียมไอออนมักใช้ลดการสูญเสียเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการให้ความร้อน พบว่าได้ผลดีกับผักและผลไม้หลายชนิด (ตารางที่ 2.4) อย่างไรก็ตาม การใช้แคลเซียมไอออนที่ความเข้มข้นสูงอาจทำให้เกิดรสชาติที่ไม่พึงประสงค์แก่ผู้บริโภคได้

แคลเซียมคลอไรด์จัดเป็นเกลือที่มีธาตุหมู่ 7 (halide salt) เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล จึงสามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสและเอนไซม์เพอรอกซิเดสได้ โดยแคลเซียมคลอไรด์ไอออนสามารถรวมตัวกับหมู่ทองแดง ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส และเหล็กที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของเอนไซม์เพอรอกซิเดส จึงทำให้ความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดลดลง นอกจากนี้การแตกตัวของแคลเซียมคลอไรด์ยังมีผลต่อระดับความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย ซึ่งจะไปมีผลต่อโครงสร้างของเอนไซม์และอาจทำให้เอนไซม์ตกตะกอนได้ แคลเซียมคลอไรด์ยังสามารถนำมาใช้เป็นสารเพิ่มความแน่นเนื้อในผลไม้สด ผลไม้สดหั่นชิ้น ผลไม้แช่เยือกแข็ง และผลไม้ที่ต้องผ่านกระบวนการต่างๆ (Tangtua, 2009)

แคลเซียมโพรพิโอเนต (calcium propionate) แคลเซียมกลูโคเนต (calcium gluconate) และแคลเซียมแล็กเตต (calcium lactate) มีประโยชน์ในการปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสได้เช่นเดียวกับการใช้แคลเซียมคลอไรด์ นอกจากนี้ยังไม่ทำให้เกิดรสขมและกลิ่นรสแปลกปลอมตกค้าง และการใช้เกลือชนิดอื่นยังช่วยหลีกเลี่ยงการก่อตัวของสารก่อมะเร็ง (เช่น chloramines และ trihalomethanes) ซึ่งเกี่ยวข้องกับคลอไรด์ (Thongsook, 2010)



ภาพที่ 2.7 โครงสร้าง egg box model

ที่มา : Tho *et al.* (2005)

ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลไม้เมื่อใช้แคลเซียมไอออน

1. ปริมาณเพกทินในผลไม้ เนื่องจากเพกทินเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ เมื่อรวมผลไม้ลงในสารละลายเกลือแคลเซียม แคลเซียมไอออนจะสร้างพันธะกับหมู่คาร์บอกซิลในโมเลกุลของสารประกอบเพกทิน จึงทำให้โครงสร้างของผนังเซลล์มีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นผลไม้ชนิดใดที่มีปริมาณเพกทินมากจะสามารถใช้การปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลไม้ด้วยแคลเซียมไอออนได้ดี (Duvetter *et al.*, 2009)
2. ระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือแคลเซียม สารละลายเกลือแคลเซียมที่มีความเข้มข้นสูงจะช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลไม้ได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมไอออนที่จะเข้าไปสร้างพันธะกับหมู่คาร์บอกซิลในโมเลกุลของสารประกอบเพกทินมากขึ้น แต่ทั้งนี้ความเข้มข้นของสารละลายเกลือแคลเซียมที่มากเกินไป จะไม่สามารถปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลไม้ให้ดีขึ้นได้ เนื่องจากยังขึ้นอยู่กับปริมาณเพกทินในเนื้อผลไม้ด้วย ในทางตรงกันข้ามอาจทำให้เกิดผลเสียโดยทำให้เกิดความเป็นพิษ (phytotoxicity) ซึ่งแสดงบนผิวของผลไม้ เช่น สีผิวเปลี่ยน เกิดหลุม ซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและความแน่นเนื้อของผลไม้ (Chen *et al.*, 2011; Manganaris *et al.*, 2007)
3. ชนิดของเกลือแคลเซียม เนื่องจากเกลือแคลเซียมที่ใช้ในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลไม้มีหลายชนิด และแต่ละชนิดจะมีความจำเพาะเจาะจงต่อผลไม้แตกต่างกัน มีงานวิจัยมากมายที่แสดงให้เห็นว่าการใช้เกลือแคลเซียมแต่ละชนิดในการปรับปรุงผลไม้ชนิดเดียวกัน แต่ให้ผลแตกต่างกัน (Aguayo *et al.*, 2008; Guan and Fan, 2010; Luna-Guzmán and Barrett, 2000; Manganaris *et al.*, 2007; Silveira *et al.*, 2011)
4. กรรมวิธีที่ใช้ เช่น การพ่น การจุ่ม และการใช้ระบบสุญญากาศ การพัฒนาเทคนิคการซึมผ่านโดยใช้สุญญากาศ ทำให้สามารถนำแคลเซียมไอออน เข้าไปภายในรูพรุนของโครงข่ายของเนื้อผลไม้ที่มีอากาศอยู่ภายใน เช่น สตรอเบอร์รี่ได้ โดยพบว่าการจุ่มผลสตรอเบอร์รี่ในสารละลายผสมของเพกทินเมทิลเอสเทอร์สกับแคลเซียมคลอไรด์ภายใต้ความดันสุญญากาศ เป็นเวลา 5 นาที ก่อนจะนำไปแช่เยือกแข็งด้วยวิธีโครโอจีนิก ช่วยป้องกันการสูญเสียคุณภาพทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของผลสตรอเบอร์รี่ในระหว่างการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็ง (Buggenhout *et al.*, 2006) อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ใช้ไม่ได้ผลกับวัสดุที่มีผิวที่ไม่ยอมให้ซึมผ่าน (impermeable skin) หรือขาดช่องว่างภายใน เช่น เชอร์รี่ บลูเบอร์รี่ ถั่ว และข้าวโพด

5. อุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ในการจุ่มผลไม้ เนื่องจากเกลือแคลเซียมแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิที่ละลายได้ดีแตกต่างกัน แต่ส่วนใหญ่มักจะละลายได้ดีที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง ประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส เมื่อเกลือแคลเซียมสามารถละลายได้ดีจะส่งผลให้สามารถแตกตัวเป็นแคลเซียมไอออนได้ดีด้วย (Aguayo *et al.*, 2008; García *et al.*, 1996)
6. ระยะเวลาในการแช่ผลไม้ในสารละลายเกลือแคลเซียม เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการแช่ผลไม้ลงในสารละลายเกลือแคลเซียมจะทำให้เพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไอออนและสารประกอบเพกทิน แต่ระยะเวลาในการจุ่มที่นานเกินไปจะสร้างผลเสียให้กับเนื้อผลไม้ เนื่องจากน้ำจากสารละลายเกลือแคลเซียมจะแพร่เข้าสู่ผลไม้ด้วย และเป็นสาเหตุที่ทำให้เนื้อผลไม้อ่อนนุ่มได้ (Han *et al.*, 2004)

ตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างผลงานวิจัยการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้

ข. เอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส (pectin methyl esterase : PME)

การใช้เอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสที่มีอยู่ภายในเนื้อผลไม้ หรือการเติมเข้าไปจากภายนอกการกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสที่อยู่ภายในวัตถุดิบมักใช้กับอาหารที่มาจากพืช ส่วนการเติมจากภายนอกมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณเอนไซม์ที่มีภายในเนื้อเยื่อจากที่มีอยู่แล้วหรือทดแทนเอนไซม์ที่เสียสภาพไป โดยเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสที่เข้ามาจากทั้งพืชและจุลินทรีย์ (ราและแบคทีเรีย) แต่สารยับยั้งเอนไซม์ (pectinmethylesterase inhibitor) ที่พบในผักและผลไม้บางชนิดมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสลดลง ดังนั้นจึงนิยมใช้เอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสจากจุลินทรีย์มากกว่าเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสจากพืช เพราะว่ามีประโยชน์ในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสได้มากกว่า นอกจากนี้ยังไม่ถูกยับยั้งโดยสารยับยั้งเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส (Duvetter *et al.*, 2005)

การนำเอนไซม์จากภายนอกเติมลงไปเพื่อเปลี่ยนลักษณะของเนื้อเยื่อเรียกว่าการซึมผ่านด้วยเอนไซม์ (enzyme infusion) มีวิธีการทำให้เกิดการแทรกซึมได้หลายแบบ ได้แก่

1. การแพร่ออสโมติกแบบไม่ใช้พลังงาน (passive osmotic diffusion) โดยข้อจำกัดของวิธีการนี้มี 2 ประการคือ ความเป็นรูพรุนของผนังเซลล์ และขนาดของโมเลกุลที่ทำการซึมผ่าน (infusion) ยิ่งโปรตีนมีโมเลกุลขนาดใหญ่การเคลื่อนที่เข้าไปในช่องว่างระหว่างเซลล์จะยิ่งทำได้ยากขึ้น (Thongsook, 2010)

2. การซึมผ่านโดยอาศัยความดัน (pressure-assisted infusion) การใช้วิธีนี้กับสารละลายเอนไซม์ ได้ผลดีสำหรับผักและผลไม้ที่มีเนื้อเยื่อซึ่งมีที่ว่างภายในจำนวนมาก เมื่ออยู่ภายใต้ความดันสูง แก๊สที่อยู่ในโพรงอากาศในผักและผลไม้จะถูกอัดและเข้าไปอยู่ในที่ว่างด้านในเนื้อเยื่อ และโพรงอากาศในเนื้อเยื่อจะถูกแทนที่ด้วยสารละลายเอนไซม์เมื่อความดันกลับเข้าสู่สภาวะปกติ แก๊สกลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิมของเหลวจำนวนมากจะถูกดันออกมาจากเนื้อเยื่อ (Thongsook, 2010)
3. การซึมผ่านโดยอาศัยสุญญากาศ (vacuum-assisted infusion) วิธีนี้มีกลไกการซึมเช่นเดียวกับวิธีการซึมโดยอาศัยความดัน และจะให้ผลดีสำหรับผักและผลไม้เนื้อเยื่อที่มีที่ว่างภายในจำนวนมาก ภายใต้สภาวะสุญญากาศในขณะที่ตัวอย่างแช่อยู่ในสารละลายเอนไซม์ อากาศจะถูกดึงออกไปจากเนื้อเยื่อผักผลไม้ เมื่อกลับเข้าสู่ความดันบรรยากาศ สารละลายเอนไซม์จะเข้าสู่ที่ว่างในเนื้อเยื่อ ข้อดีของวิธีการนี้คือสุญญากาศจะทำให้อากาศภายในออกไปหมด ดังนั้นสารละลายเอนไซม์จึงสามารถเข้าไปแทนที่ที่อยู่ในเนื้อเยื่อภายหลังการแช่ได้มากขึ้น (Baker and Wicker, 1996; Thongsook, 2010)

ค. ไฮโดรคอลลอยด์

การซึมผ่านของสารก่อเจล (gelling agent) ในอาหารที่มาจากพืชช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัส โดยการสร้างสะพานเชื่อมระหว่างเซลล์ในรูพรุน หรือช่วยเติมเต็มโครงข่ายภายในผนังเซลล์ หรือการสร้างพันธะระหว่างไฮโดรคอลลอยด์ที่เติมลงไปกับองค์ประกอบในผนังเซลล์ อย่างไรก็ตามเจลที่เข้าไปอยู่ในระหว่างเซลล์จะสามารถช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสได้ต่อเมื่อโครงสร้างมีความเป็นรูพรุนสูงและการดูดซึมตัวถูกละลายมีปริมาณสูง โดยเฉพาะเมื่อการถ่ายเทมวลสารถูกจำกัดโดยความหนืดที่สูงของสารละลายเจล (Sila *et al.*, 2008) ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ของเทคนิคนี้ คือการใช้กัมแซนแทน (xanthan gum) ในเห็ดกระดุม (button mushroom หรือ *Agaricus bisporus*) ก่อนขั้นตอนการลวกและบรรจุกระป๋อง พบว่าช่วยปรับปรุงน้ำหนักสุทธิและรสชาติของผลิตภัณฑ์สดทำได้ดีเป็นอย่างดี (Gormley and Walshe, 1986)

ตารางที่ 2.4 การปรับปรุงคุณภาพของผลไม้ชนิดต่างๆโดยแคลเซียมไอออน

อันดับ	ตัวอย่าง	ขั้นตอนการทดลอง	ผลการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
1	ผลสตรอเบอรี่หั่นชิ้น (สายพันธุ์ Pajaro และ G-3) ผลสาลิหั่นชิ้น (สายพันธุ์ Bartlett)	จุ่มผลสตรอเบอรี่และผลสาลิในสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 หรือ 1.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 60 วินาที เก็บรักษาที่ อุณหภูมิ 2.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	ความแน่นเนื้อของผลสตรอเบอรี่หั่นชิ้นและผลสาลิหั่น ชิ้นจะยังคงสภาพได้ดีที่สุดเมื่อจุ่มในสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์	(Rosen and Kader, 1989)
2	ผลสตรอเบอรี่ (สายพันธุ์ Cardinal)	จุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายแคลเซียมแกล็ก- เทต ความเข้มข้น 1.0 หรือ 2.0 เปอร์เซ็นต์ เป็น เวลา 8 นาทีโดยใช้ร่วมกับเทคนิคสุญญากาศ จากนั้นนำไปแช่เยือกแข็ง นำไปใส่กระป๋อง และเติมน้ำเชื่อมความเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ ต้มฆ่าเชื้อโดยใช้ไอน้ำร้อน เป็นเวลา 14 นาที แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 เดือน	การจุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายแคลเซียมแกล็กเทต 1 เปอร์เซ็นต์ ก่อนการแช่เยือกแข็งทั้งภายหลังการ หาลอมละลายและการต้มฆ่าเชื้อผลสตรอเบอรี่มีความ แน่นเนื้อมากกว่าชุดควบคุมที่ไม่ได้จุ่มสารใด และช่วย ลดการสูญเสียของเหลว จากผลสตรอเบอรี่ภายหลังการ หาลอมละลาย นอกจากนี้เมื่อนำไปทดสอบชิมพบว่าไม่ มีผลต่อผลสตรอเบอรี่ด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัส	(Main <i>et al.</i> , 1986)
3	ผลสตรอเบอรี่ (สายพันธุ์ Tudla)	จุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายแคลเซียมคลอ- ไรด์ความเข้มข้น 1.0, 2.0 หรือ 4.0 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 25 หรือ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน	การจุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการเพิ่ม ปริมาณแคลเซียมเพื่อจะควบคุมการเน่าเสียและคง สภาพความแน่นเนื้อและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ในน้ำ นอกจากนี้ยังไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพทาง	(García <i>et al.</i> , 1996)

ตารางที่ 2.4 การปรับปรุงคุณภาพของผลไม้ชนิดต่างๆโดยแคลเซียมไอออน (ต่อ)

อันดับ	ตัวอย่าง	ขั้นตอนการทดลอง	ผลการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
4	ผลสตรอเบอรี่ (สายพันธุ์ Puget, Reliance และ Totem) ผลราสเบอร์รี่ (สายพันธุ์ Tullmeen)	จุ่มผลไม้ลงในสารละลายไคโทซาน หรือ สารละลายไคโทซานที่ผสมด้วย กลูโคโนล 5 เปอร์เซนต์ (เป็นส่วนผสมระหว่างแคลเซียม แล็กเตตและกลูโคเนต) หรือวิตามินอี 2 เปอร์เซนต์ เป็นเวลา 10 วินาที 2 ครั้ง จากนั้นนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 สัปดาห์ ส่วนผลสตรอเบอรี่สายพันธุ์ Totem นำไปแช่เยือกแข็ง แล้วเก็บที่อุณหภูมิ -23 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน	ประสิทธิภาพและการใช้อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ทำให้แคลเซียมสามารถเข้าไปในผลสตรอเบอรี่ได้มากขึ้น กรณีผลไม้ที่เก็บที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส การจุ่มในสารละลายไคโทซานที่ผสมด้วยวิตามินอี ทำให้ผลไม้มีคุณภาพดีที่สุด โดยจะช่วยลดการเน่าเสียเนื่องจากเชื้อรา และช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักด้วย ส่วนผลสตรอเบอรี่แช่เยือกแข็งภายหลังการหลอมละลายพบว่าการจุ่มในสารละลายไคโทซานช่วยลดการสูญเสียของเหลวจากผลสตรอเบอรี่ได้และช่วยคงสภาพความแน่นเนื้อได้ โดยเฉพาะการจุ่มในสารละลายไคโทซานที่ผสมด้วยเกลือแคลเซียม	(Han <i>et al.</i> , 2004)
5	ผลสตรอเบอรี่ (สายพันธุ์ Pájaro)	จุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 เปอร์เซนต์ เป็นเวลา 15 นาที หรือใช้วิธีสุญญากาศ 5 นาที จากนั้นนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน	การใช้แคลเซียมช่วยชะลอการสุกของผลสตรอเบอรี่ และช่วยเพิ่มความทนทานต่อเชื้อรา นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างสายเพกทินซึ่งทำให้ช่วยคงสภาพของผนังเซลล์ไว้ได้	(Lara <i>et al.</i> , 2004)

ตารางที่ 2.4 การปรับปรุงคุณภาพของผลไม้ชนิดต่างๆโดยแคลเซียมไอออน (ต่อ)

อันดับ	ตัวอย่าง	ขั้นตอนการทดลอง	ผลการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
6	ผลสตรอเบอรี่ (สายพันธุ์ Camarosa)	จุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายไคโทซาน แอซีเทตซึ่งมีแคลเซียมกลูโคเนตผสมอยู่ 0.5 หรือ 0.75 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	การจุ่มในสารละลายไคโทซาน แอซีเทต ช่วยลดการเน่าเสียเนื่องจากเชื้อราได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดอัตราการทำลายจากการสูญเสียน้ำหนัก ความแน่นเนื้อ และสีผิว และการเพิ่มแคลเซียมกลูโคเนตจะช่วยเพิ่มความแน่นเนื้อให้กับผลสตรอเบอรี่	(Hernández-Muñoz <i>et al.</i> , 2008)
7	ผลสตรอเบอรี่ (สายพันธุ์ Belgian elsanta และ Spanish san miguel)	จุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายซึ่งประกอบด้วยเพกทินเมทิลเอสเทอร์ 100 U/mL และแคลเซียมคลอไรด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อโดยใช้ความร้อนและความดัน	การจุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายซึ่งประกอบด้วยเพกทินเมทิลเอสเทอร์ และแคลเซียมคลอไรด์ ช่วยรักษาความแน่นเนื้อของผลสตรอเบอรี่ได้มากกว่าผลสตรอเบอรี่ที่ไม่ได้จุ่มในสารใด	(Duvetter <i>et al.</i> , 2005)
8	ผลสตรอเบอรี่ (สายพันธุ์ Shijixiang)	จุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายแคลเซียม-คลอไรด์ความเข้มข้น 1.0 หรือ 4.0 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 วัน	การจุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีความแน่นเนื้อไม่แตกต่างกับผลสตรอเบอรี่ที่ไม่ได้จุ่มในสารใด แต่การจุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ผลสตรอเบอรี่มีคุณภาพดีที่สุด เนื่องจากช่วยลดอัตราการเน่าเสีย และการสูญเสียน้ำหนัก ส่วนการจุ่มผลสตรอเบอรี่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 4 เปอร์เซ็นต์ ช่วยลดการสูญเสียของเหลวได้ แต่ทำให้	(Chen <i>et al.</i> , 2011)

ตารางที่ 2.4 การปรับปรุงคุณภาพของผลไม้ชนิดต่างๆโดยแคลเซียมไอออน (ต่อ)

อันดับ	ตัวอย่าง	ขั้นตอนการทดลอง	ผลการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
			เกิดความเป็นพิษ (phytotoxicity) ระหว่างการเก็บรักษา ผลสตอเบอรี่ ได้ศึกษาความยาวของสายเพกทินที่ละลายได้ในน้ำ เพกทินที่ละลายได้ในคิเลต และเพกทินที่ละลายได้ในโซเดียมคาร์บอเนตลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลสตอเบอรี่เน่าขึ้น แต่แคลเซียมคลอไรด์ช่วยลดการแตกสลายของสายเพกทิน	
9	ผลแตงเทศ (สายพันธุ์ Honey dew)	จุ่มผลแตงเทศลงในสารละลายคลอรีนซึ่งมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ผสมอยู่ แล้วนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	ผลแตงเทศมีอายุการเก็บรักษาได้นานมากขึ้น เนื่องจากการจุ่มในสารละลายคลอรีนจะช่วยกำจัดจุลินทรีย์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ช่วยลดอัตราการหายใจลดการผลิตเอทิลีน และช่วยรักษาความแน่นเนื้อ	(Bai <i>et al.</i> , 2000)
10	ผลแตงเทศหั่นชิ้น (สายพันธุ์ Reticulatus)	จุ่มผลแตงเทศหั่นชิ้นลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หรือแคลเซียมแล็กเตต ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 1 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน	เกลือแคลเซียมทั้ง 2 ชนิดช่วยรักษาความแน่นเนื้อของผลแตงเทศไว้ได้ แต่เกลือแคลเซียมแล็กเตตไม่ทำให้เกิดรสขมในแตงเทศ	(Luna-Guzmán and Barrett, 2000)

ตารางที่ 2.4 การปรับปรุงคุณภาพของผลไม้ชนิดต่างๆโดยแคลเซียมไอออน (ต่อ)

อันดับ	ตัวอย่าง	ขั้นตอนการทดลอง	ผลการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
11	ผลแดงเทศหั่นชิ้น (สายพันธุ์ Reticulatus)	จุ่มผลแดงเทศหั่นชิ้นลงในสารละลายแคลเซียมเล็กน้อย ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 3 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน	ผลแดงเทศหั่นชิ้นที่จุ่มในสารละลายแคลเซียมเล็กน้อย ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีอัตราการหายใจและอัตราการสูญเสียความชื้นต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และภายหลังการเก็บรักษา 24 ชั่วโมง แคลเซียมไอออนทำปฏิกิริยากับผนังเซลล์ของผลแดงเทศ โดยสร้างการเชื่อมต่อระหว่างสายเพกทิน	(Lamikanra and Watson, 2004)
12	เนื้อสาลี่หั่นชิ้น (สายพันธุ์ Pathernakh)	จุ่มเนื้อสาลี่หั่นชิ้นในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 75 วัน	การจุ่มเนื้อสาลี่หั่นชิ้นในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ ช่วยลดการสูญเสียน้ำหนัก และลดการเกิดสีน้ำตาลที่แกนผล เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่จุ่มในน้ำเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงความแน่นเนื้อด้วย	(Mahajan and Dhatt, 2004)
13	เนื้อแอปเปิล (สายพันธุ์ Fuji)	จุ่มเนื้อแอปเปิลหั่นชิ้นแบบลูกเต๋าในสารละลายผสมที่มีแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ กรดแอสคอร์บิก ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ และกรดโพธิ์ฟอนิก ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 3 นาที	ช่วยรักษาคุณภาพทางด้านสี เนื้อสัมผัส และปริมาณของเพกทินในระหว่างการเก็บรักษาด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง เป็นเวลา 16 วัน ซึ่งผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบชิมที่ได้รับการฝึกฝนให้คะแนนของการยอมรับโดยรวมไม่แตกต่างกันในระหว่างการเก็บรักษา เป็นเวลา 8 วัน	(Varela <i>et al.</i> , 2007)

ตารางที่ 2.4 การปรับปรุงคุณภาพของผลไม้ชนิดต่างๆโดยแคลเซียมไอออน (ต่อ)

อันดับ	ตัวอย่าง	ขั้นตอนการทดลอง	ผลการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
14	ผักกาดแก้ว (สายพันธุ์ Iceburg)	จุ่มใบผักกาดแก้วลงในสารละลายแคลเซียม เล็กน้อย ความเข้มข้น 15 กรัมต่อลิตร ที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศา- เซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน	ภายหลังการเก็บรักษาใบผักกาดแก้วที่จุ่มในสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ยังคงรักษาความกรอบได้ดีกว่า ชุดควบคุมที่ไม่ได้จุ่มในสารใด	(Martín- Diana <i>et al.</i> , 2007)
15	ผลท้อ (สายพันธุ์ Andross)	จุ่มผลท้อลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมเล็กน้อย หรือแคลเซียมโพธิโอเนต ความเข้มข้น 62.5 หรือ 187.5 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 สัปดาห์	ภายหลังการเก็บรักษา 1 วันปริมาณแคลเซียมที่ผิว เพิ่มขึ้น 2.7 เท่า และปริมาณแคลเซียมในผลเพิ่มขึ้น 74 เปอร์เซ็นต์ และการใช้สารละลายเกลือแคลเซียม ความเข้มข้น 62.5 มิลลิโมลาร์ ให้ประสิทธิภาพดีกว่า ในการรักษาความแน่นเนื้อระหว่างการเก็บรักษา และ การใช้สารละลายเกลือแคลเซียมที่ความเข้มข้นสูง เกินไปจะทำให้เกิดลักษณะอาการเป็นพิษ ซึ่งแสดงบน ผิวของผลไม้ เช่น สีผิวเปลี่ยน เกิดหูลุม ซึ่งจะนำไปสู่ การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและความแน่นเนื้อของ ผลไม้	(Manganaris <i>et al.</i> , 2007)

ตารางที่ 2.4 การปรับปรุงคุณภาพของผลไม้ชนิดต่างๆโดยแคลเซียมไอออน (ต่อ)

อันดับ	ตัวอย่าง	ขั้นตอนการทดลอง	ผลการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
16	ผลแดงเทศ (สายพันธุ์ Amarillo)	จุ่มผลแดงเทศลงในสารละลายแคลเซียม-คลอไรด์ แคลเซียมโพรฟิไอเนต แคลเซียม-คาร์บอเนต หรือแคลเซียมแล็กเทต ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน	การจุ่มในสารละลายแคลเซียมโพรฟิไอเนต และแคลเซียมแล็กเทตช่วยคงสภาพความแน่นเนื้อของผลแดงเทศได้ดีที่สุด รองลงมาคือแคลเซียมคลอไรด์ ยกเว้นการจุ่มในสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งทำให้ความแน่นเนื้อของแดงเทศลดลง การจุ่มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และแคลเซียมแล็กเทตช่วยลดปริมาณแบคทีเรียได้ $2 \log \text{cfu/g}$ และเมื่อจุ่มในสารละลายแคลเซียมโพรฟิไอเนตลดได้ $4 \log \text{cfu/g}$	Aguayo <i>et al.</i> (2008)
17	ผลแอปเปิล (สายพันธุ์ Fuji) ผลสาลี (สายพันธุ์ Flor de Invierno) ผลแดงเทศ (สายพันธุ์ Piel de Sapo)	จุ่มผลไม้ลงในสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมแล็กเทต <i>N</i> -acetyl-L-cysteine กลูตาไทโอน และกรดมาลิกที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที แล้วเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 สัปดาห์	การจุ่มผลไม้ลงในสารละลายผสมช่วยรักษาเนื้อสัมผัสและสีของผลไม้ได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดการเจริญของจุลินทรีย์ได้ด้วย	(Alandes <i>et al.</i> , 2009)
18	ผลแอปเปิลหั่นชิ้น (สายพันธุ์ Granny Smith)	จุ่มผลแอปเปิลหั่นชิ้นลงในสารละลายแคลเซียมโพรฟิไอเนต ความเข้มข้น 0.5, 1, หรือ 2 เปอร์เซ็นต์ หรือสารละลายแคลเซียม	การจุ่มผลแอปเปิลหั่นชิ้นลงในสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมโพรฟิไอเนต 1 เปอร์เซ็นต์ และโซเดียมคลอไรด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ช่วยป้องกันการเกิดสีน้ำตาล	(Guan and Fan, 2010)

ตารางที่ 2.4 การปรับปรุงคุณภาพของผลไม้ชนิดต่างๆโดยแคลเซียมไอออน (ต่อ)

อันดับ	ตัวอย่าง	ขั้นตอนการทดลอง	ผลการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
19	ผลฝรั่ง (สายพันธุ์ Paluma)	โพธิ์ฟิโหนดที่ผสมด้วยโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 5 นาที และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน จุ่มผลฝรั่งที่ผ่าครึ่งและเอาเมล็ดออกแล้วในสารละลายน้ำตาลซูโครสหรือน้ำตาลมอลโทส ความเข้มข้น 60°Brix ที่มีแคลเซียมแล็กเทตผสมอยู่ 15 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 วัน	ที่ผิว ช่วยลดการเจริญของจุลินทรีย์ และช่วยคงสภาพความแน่นเนื้อได้ดี แคลเซียมแล็กเทตช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในผลฝรั่ง ช่วยลดอัตราการหายใจ และช่วยรักษาความแน่นเนื้อของผลฝรั่งไว้ได้ ด้านผลทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าผู้บริโภคไม่ยอมรับเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 13 วันขึ้นไป	(Pereira <i>et al.</i> , 2010)
20	ผลแตงเทศ (สายพันธุ์ Galia)	จุ่มเนื้อผลแตงเทศหั่นชิ้นลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมซิเตรต แคลเซียมแล็กเทต แคลเซียมแอสคอร์เบต แคลเซียมทาร์เทต แคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมโพธิ์ฟิโหนด หรือ แคลเซียมแอซิเตต ความเข้มข้น 0.4 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน	เมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษาผลแตงเทศหั่นชิ้นที่จุ่มในสารละลายแคลเซียมแอสคอร์เบต แคลเซียมคลอไรด์ และแคลเซียมแล็กเทต ช่วยลดอัตราการหายใจของผลไม้ ช่วยเพิ่มปริมาณแคลเซียม และช่วยรักษาความแน่น	(Silveira <i>et al.</i> , 2011)

2.8.2 การใช้สารฆ่าเชื้อ (sanitizer) ที่มีประสิทธิภาพในการล้างผลไม้

โรค Gray mold rot (*Botrytis cinerea*) เป็นโรคที่สำคัญที่สุดที่เกิดกับผลสตรอเบอรี่ การพัฒนาของโรคนี้อาจเกิดขึ้นภายหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งส่วนมากเป็นสาเหตุมาจากการเข้าทำลายของเชื้อราในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว ขณะที่โรคหลังการเก็บเกี่ยวที่พบโดยทั่วไป ได้แก่ Rhizopus rot (*Rhizopus spp.*) และ Leather rot (*Phytophthora cactorum*) ผลที่ชอกช้ำ บิดเบี้ยว สุกเกินไป และมีตำหนิ เป็นปัญหาหลักในช่วงหลังการเก็บเกี่ยวผลสตรอเบอรี่ ปัจจัยที่สำคัญที่จะนำไปสู่ความสำเร็จของการจัดการช่วงก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวสตรอเบอรี่ ได้แก่ ระยะสุกที่เหมาะสม การคัดเลือกและแยกผลที่ตลาดไม่ต้องการออกขณะเก็บเกี่ยว การทำให้เกิดรอยแผลน้อยที่สุดในขณะเก็บเกี่ยว และภายหลังการเก็บเกี่ยวควรรีบนำผลที่เก็บเกี่ยวแล้วเข้าห้องเย็นที่อุณหภูมิใกล้ 0 องศาเซลเซียส โดยเร็วที่สุด (ณรงค์ชัย, 2543)

การใช้สารฆ่าเชื้อในการล้างผลไม้ก่อนทำการแปรรูปมีวัตถุประสงค์เพื่อทำความสะอาดผลผลิต ทำลายหรือลดจำนวนจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย และเป็นอันตรายต่อสุขภาพโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และความปลอดภัยของผู้บริโภค

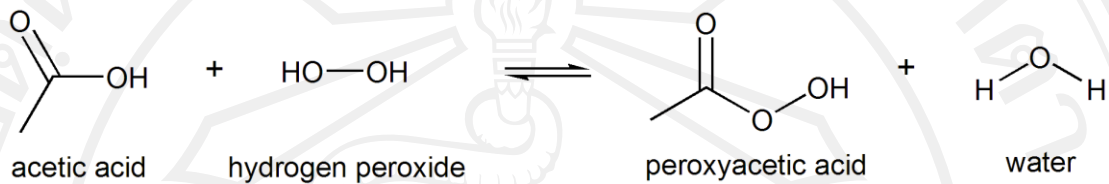
ก. คลอรีนและสารประกอบของคลอรีน

คลอรีนเป็นสารที่นิยมอย่างกว้างขวางเพื่อการฆ่าเชื้อในกระบวนการแปรรูปอาหาร เช่น ฆ่าเชื้อที่อุปกรณ์ และล้างพื้นที่บริเวณการผลิต ในอุตสาหกรรมผลิตผักและผลไม้ นิยมใช้สารละลายคลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อมากที่สุดที่ระดับความเข้มข้นในช่วง 50-200 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 1-2 นาที ทั้งก่อนและภายหลังการตัดแต่ง โดยจะใช้นาในรูปแบบของคลอรีนเหลว หรือสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Beuchat, 2000)

คลอรีนสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ตามธรรมชาติที่มีอยู่ในผักและผลไม้ ทำให้เกิดสารก่อมะเร็ง โดยพบสารในกลุ่มของไตรฮาโลมีเทนและกรดฮาโลแอซิดิก (Artés et al., 2009) ในน้ำทิ้งจากการใช้คลอรีนส่งผลให้มีค่า biological oxygen demand (BOD) อยู่ในระดับสูง ทำให้บางประเทศในทวีปยุโรปไม่อนุญาตให้ใช้คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อในผลิตภัณฑ์บางชนิด จึงมีการหาสารฆ่าเชื้อชนิดอื่นเพื่อทดแทนการใช้คลอรีน โดยยังคงรักษาคุณภาพและอายุการเก็บรักษาได้ดีเช่นเดียวกับการใช้คลอรีน และมีความปลอดภัย โดยสารฆ่าเชื้อที่เป็นทางเลือกใหม่ ได้แก่ กรดเพอร์ออกซีแอซิดิก (peroxyacetic acid:PAA)

ข, กรดเพอร์ออกซีแอซีติก

กรดเพอร์ออกซีแอซีติก เป็นสารในกลุ่มของออร์แกนิกเพอร์ออกไซด์ มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $C_2H_4O_3$ เกิดจากปฏิกิริยาของกรดแอซีติก (CH_3COOH) ซึ่งเป็นกรดหลักในน้ำส้มสายชู และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ทำให้มีโมเลกุลของออกซิเจนเพิ่มขึ้นมาอีก 1 อะตอม ในรูปของเพอร์ออกไซด์อยู่ภายในโมเลกุลของกรดแอซีติก ดังสมการในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาการเกิดกรดเพอร์ออกซีแอซีติก

ที่มา : Wikipedia (2009)

กรดเพอร์ออกซีแอซีติกอยู่ในสถานะของเหลวใส ไม่มีสี ไม่ก่อให้เกิดไฟ มีกลิ่นฉุนของกรดแอซีติก มีสมบัติเป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง โดยจะไปออกซิไดซ์ผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ มีกลไกการทำงาน คืออิเล็กตรอนของกรดจะเข้าไปในจุลินทรีย์ในรูปของเพอร์ออกไซด์ โดยจะไปออกซิไดส์เยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย เอนโดสปอร์ สปอร์ของยีสต์และรา ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญและตายในที่สุด (Soliva-Fortuny and Martín-Belloso, 2003)

กรดเพอร์ออกซีแอซีติกเป็นสารฆ่าเชื้อที่สามารถสัมผัสกับอาหารได้โดยตรง ในน้ำล้างผักและผลไม้ (21CFR 173.315) และในภาชนะที่สัมผัสกับอาหาร (21CFR 178.1010) โดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาประเทศสหรัฐอเมริกา (USFDA) ได้อนุญาตให้ใช้ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 85-300 มิลลิกรัมต่อลิตร หากใช้สัมผัสกับอาหารโดยตรงจะใช้ได้ไม่เกิน 85 มิลลิกรัมต่อลิตร (USFDA, 1997) กรดเพอร์ออกซีแอซีติกได้รับความสนใจมากขึ้นเพื่อนำมาใช้เป็นสารฆ่าเชื้อทดแทนคลอรีน เนื่องจากมีประสิทธิภาพทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคได้ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ และเมื่อสลายตัวจะได้กรดแอซีติก น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน จึงไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (Olmez and Kretzschmar, 2008 ; Artes *et al.*, 2009)

การใช้กรดเพอร์ออกซีแอซีติกเป็นสารฆ่าเชื้อสำหรับผลสดรอบอริ โดยจุ่มผลสดรอบอริลงในสารละลายกรดเพอร์ออกซีแอซีติก ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 5 นาที พบว่าสามารถลดจำนวน *Escherichia coli* O157:H7 และ *Listeria monocytogenes* ได้ (Rodgers *et al.*, 2004) นอกจากนี้สารละลายกรดเพอร์ออกซีแอซีติกยังสามารถใช้ได้ดีกับผลไม้ชนิดอื่น ได้แก่ ผลแอปเปิล (Wisniewsky *et al.*, 2000) ผลมะม่วง (Narciso and Plotto, 2005; Tangtua, 2009) ผลลิ้นจี่ (Phanumong, 2010; Tangtua, 2009) และผลลำไย (Bunnag, 2011)