

## บทที่ 2

### เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

#### 2.1 ลักษณะทั่วไปของมะม่วง

มะม่วง มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Mangifera indica* Linn. อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae เป็นไม้ผลเขตร้อน ไม้ผลัดใบที่ปลูกกันอย่างแพร่หลายทั่วทุกภาคของประเทศไทย มีถิ่นกำเนิดในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (วิจิตร, 2533)

#### 2.2 พันธุ์มะม่วง

พันธุ์มะม่วงสามารถแบ่งออกตามสายพันธุ์ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ มะม่วงกลุ่มอินเดีย (Indian type) และกลุ่มอินโดจีน (Indo-Chinese type)

1) มะม่วงกลุ่มสายพันธุ์อินเดีย เป็นมะม่วงที่มีถิ่นกำเนิดทางตอนเหนือของประเทศ ปากีสถาน สหรัฐอเมริกา และเม็กซิโก ลักษณะที่สำคัญ คือ เมื่อเพาะเมล็ดจะให้ต้นกล้า 1 ต้นต่อเมล็ดและเป็นต้นกล้าลูกผสมกลายพันธุ์ไม่ตรงตามต้นแม่ มะม่วงในกลุ่มนี้มีสีสะดุดตามากกว่าสายพันธุ์อินโดจีน เช่น สีแดง สีม่วงและสีส้ม เนื้อผลมีกลิ่นแรง

2) มะม่วงกลุ่มสายพันธุ์อินโดจีน เป็นมะม่วงที่มีถิ่นกำเนิดอยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ประเทศไทย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ ลักษณะที่สำคัญ คือ เมล็ดที่เพาะจะให้ต้นกล้าได้มากกว่า 1 ต้นต่อเมล็ดและต้นกล้าที่ได้ส่วนมากจะตรงตามต้นแม่ ผลมะม่วงมีสีเขียวหรือสีเหลือง เนื้อผลมีกลิ่นไม่แรง (วิจิตร, 2533)

#### 2.3 มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

มะม่วงพันธุ์นี้เกิดจากการกลายพันธุ์โดยวิธีการเพาะเมล็ดมะม่วงพันธุ์สามปี (วิจิตร, 2533) นิยมบริโภคได้ทั้งผลดิบและสุก รวมทั้งนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ เป็นมะม่วงพันธุ์ทะวายที่ออกดอกและติดผลตลอดทั้งปี ลักษณะทั่วไป คือ ต้นเป็นพุ่มปานกลาง เจริญเติบโตได้ดี มีใบรูป

หอกแถมรูปไข่ สีเขียวเข้ม ผลมีขนาดใหญ่น้ำหนักประมาณ 300-400 กรัมต่อผล รูปทรงคล้ายรูปไข่ ส่วนหัวใหญ่ แต่ปลายเรียวเล็ก เปลือกผลหนา มีเมล็ดบาง เนื้อมาก ลักษณะเนื้อละเอียดมีสีเหลืองทอง ไม่มีเสี้ยน มีกลิ่นจี๊ดเล็กน้อย อายุการเก็บเกี่ยวภายหลังดอกบานประมาณ 110-120 วัน มะม่วงพันธุ์นี้ปลูกมากในจังหวัดเชียงใหม่และศรีสะเกษ (ธวัชชัยและศิวพร, 2542) สามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศ เมื่อผลดิบมีรสเปรี้ยว เนื้อแข็งแน่น เมื่อผลสุกมีรสชาติหวาน สีเหลืองเข้ม ไม่มีเสี้ยน ของแข็งที่ละลายน้ำได้ประมาณ 16% (ศิวพร, 2539) จุดเด่นของมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ คือทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่กั้นดาร ได้ดี และให้ผลผลิตตลอดปี

#### 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของผลมะม่วง

มะม่วงเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรต เส้นใยอาหาร วิตามินและแร่ธาตุต่างๆ เช่น แคลเซียม และโพแทสเซียม (Larrauri *et al.*, 1996) ในเนื้อผลมะม่วงดิบประกอบด้วยสตาร์ช 58% น้ำตาลรีดิวิง 2.9% โปรตีน 5.7% เพกทิน 0.8% ไขมัน 0.3% และแทนนิน 1.1% คือน้ำหนักแห้ง (Kaur *et al.*, 2004) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาความแก่อ่อน สายพันธุ์ พื้นที่ปลูก และการดูแลระหว่างการเพาะปลูก ส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่

1) คาร์โบไฮเดรต เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในผลไม้ที่ให้รสชาติ คุณค่าทางโภชนาการ และเกี่ยวข้องกับเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยว คาร์โบไฮเดรตในผลไม้อยู่ในรูปของอาหารสะสม เช่น สตาร์ช น้ำตาล และเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างเซลล์ที่ให้ความแข็งแรง ได้แก่ เซลลูโลส และสารประกอบเพกทินต่างๆ (จริงแท้, 2544)

ก. สตาร์ช มะม่วงเป็นผลไม้ที่มีสตาร์ชสะสมอยู่เป็นส่วนประกอบหลักทั้งขณะที่ยังเป็นผลดิบและสุก เมื่อผลมะม่วงเริ่มสุกสตาร์ชจะเกิดการไฮโดรไลซิสเป็นน้ำตาล ทำให้สตาร์ชมีปริมาณลดลง สำหรับปริมาณอะมัยโลสที่พบในเนื้อผลมะม่วงสายพันธุ์ต่างๆ มีดังนี้ โตตาปური (Totapuri) 16.3% ดังกรา (Langra) 14.0% คัพปี (Kuppi) 11.3% แดสฮีฮารี (Dashehari) 9.7% และคัวซา (Chausa) 9.1% (Kaur *et al.*, 2004)

ข. น้ำตาล ในผลไม้ไม่มีน้ำตาลหลักอยู่ 3 ชนิด คือ ซูโครส กลูโคส และฟรุกโทส ส่วนใหญ่พบสะสมอยู่ในแวคิวโอล อัตราส่วนของน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดในผลไม้จะแตกต่างกันไป ทำให้ผลไม้แต่ละชนิดมีความหวานต่างกัน ฟรุกโทสมีความหวานมากที่สุด รองลงมา คือ ซูโครสและกลูโคส

ตามลำดับ ซึ่งน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดนี้สามารถเปลี่ยนรูปกันได้โดยอาศัยเอนไซม์หลายชนิด เช่น เอนไซม์อินเวอร์เทสจะเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนซูโครสเป็นกลูโคสและฟรุกโทส (จริงแท้, 2544) โดยเอนไซม์อินเวอร์เทสจะเพิ่มมากขึ้นในระหว่างการสุกของผลมะม่วง (Castrillo *et al.*, 1992)

น้ำตาลรีดิวซิงที่พบมากในผลมะม่วง ได้แก่ กลูโคส และฟรุกโทส (Sharaf *et al.*, 1989) ระหว่างการสุกของผลมะม่วงจะมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้น โดยน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นในช่วงการสุก ได้แก่ ซูโครส และฟรุกโทส (Castrillo *et al.*, 1992)

ค. คาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ เพกทิน คาร์โบไฮเดรตทั้ง 3 ประเภทนี้ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับรสชาติของผลไม้โดยตรง แต่มีความสำคัญต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส โดยเมื่อผลไม้เริ่มสุกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่โมเลกุลของสารต่างๆ ในผนังเซลล์ โดยเพกทินจะเปลี่ยนรูปจากโปรโตเพกทิน (protopectin) ซึ่งเป็นเพกทินชนิดที่ไม่ละลายน้ำเป็นเพกทินชนิดที่ละลายน้ำได้ เนื่องจากถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 2 ชนิด ได้แก่ โพลีกาแลกตูโรเนส (polygalacturonase; PG) และเพกทินเอสเตอเรส (pectin esterase; PE) (จริงแท้, 2544 ; Muda *et al.*, 1995)

2) โปรตีน ผลไม้ไม่ใช่แหล่งที่สำคัญของโปรตีน เนื่องจากในผลไม้มีปริมาณโปรตีนอยู่น้อย ผลไม้ทั่วไปมีปริมาณโปรตีนน้อยกว่า 1% ซึ่งเป็นโปรตีนสำหรับการทำงาน หรือเป็นเอนไซม์เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีต่างๆ ที่เรียกว่า functional protein เช่น เอนไซม์อะมัยเลสที่ไฮโดรไลซ์สตาร์ชให้เป็นน้ำตาลกลูโคส เอนไซม์อินเวอร์เทสที่เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนซูโครสเป็นกลูโคสและฟรุกโทส เช่น มีรายงานว่า ในระหว่างการสุกของผลมะม่วงมีกิจกรรมของเอนไซม์อะมัยเลส (Fuchs *et al.*, 2003) และอินเวอร์เทส (Castrillo *et al.*, 1992) และเอนไซม์ที่ย่อยสลายโมเลกุลของเพกทินเพิ่มสูงขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบเอนไซม์คะตะเลสและเปอร์ออกซิเดสในผลมะม่วงด้วย (วิจิตร, 2529)

ภายหลังการเก็บเกี่ยวปริมาณกรดอะมิโนค่อนข้างคงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย กรดอะมิโนที่พบมากในผลมะม่วงพันธุ์คัวชา ได้แก่ ไกลซีน ซีรีน และกลูตามิก (Khan and Robinson, 1993)

3) ไขมัน ในผลไม้มีไขมันน้อยมากเช่นเดียวกับโปรตีน โดยทั่วไปผลไม้มีปริมาณไขมันอยู่น้อยกว่า 1% จากผลการทดลองของ Larrauri *et al.* (1996) พบว่า ในเนื้อมะม่วงพันธุ์ศรีโธโล มีปริมาณไขมัน 0.1-0.12% โดยไขมันในผลไม้มีอยู่ 3 รูปแบบ คือ อาหารสะสม สารปกคลุมผิว

และองค์ประกอบของเซลล์เมมเบรน โดยไขมันในรูปอาหารสะสมที่มีอยู่นั้นส่วนใหญ่เป็นพวก ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) และสารประกอบลิพิดที่เป็นส่วนปกคลุมผิวของผลมะม่วง ได้แก่ แวกซ์ (wax) คิวทิน (cutin) และซูเบอร์อิน (suberin) โดยผิวชั้นนอกสุดเป็นส่วนที่มีแว็กซ์ปกคลุม ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภท คือ ลักษณะเป็นพื้นราบเรียบ หรือลักษณะเป็นเส้น (filament) ยื่นออกมาทำให้เกิดลักษณะนวลขึ้นบนผิว ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการคายน้ำและป้องกันการทำลายจากโรคต่างๆ

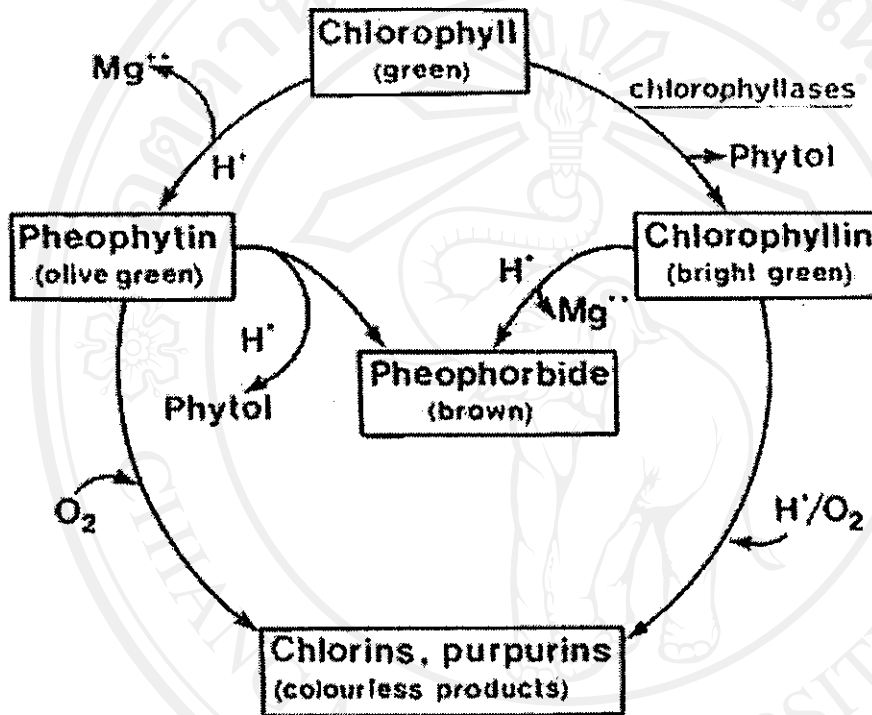
ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันของมะม่วงพันธุ์เคนซิงตัน ไพร์ด (Kensington Pride) พบว่า กรดไขมันที่พบมากในผลมะม่วง ได้แก่ กรดปาล์มิติก (palmitic acid) กรดปาล์มิโทเลอิก (palmitoleic acid) กรดโอเลอิก (oleic acid) กรดลินโอเลอิก (linoleic acid) และกรดลินโอเลนิก (linolenic acid) ซึ่งในระหว่างการสุกเนื้อผลมะม่วงจะมีปริมาณกรดไขมันเพิ่มขึ้น ชนิดของกรดไขมันที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการสุกของมะม่วง ได้แก่ กรดคาโปรอิก (caproic acid) กรดลอริก (lauric acid) กรดไมริสติก (myristic acid) กรดปาล์มิติก กรดปาล์มิโทเลอิก และกรดโอเลอิก (Lalel *et al.*, 2003)

4) กรดอินทรีย์ กรดอินทรีย์สะสมอยู่ในแวคิวโอลที่มีปริมาณมากและมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพทางด้านรสชาติของผลไม้ โดยกรดอินทรีย์เป็นสารเริ่มต้นในการสังเคราะห์กลิ่นของผลไม้ (Lalel *et al.*, 2003) ปริมาณกรดอินทรีย์ในผลมะม่วงลดลงตามระยะเวลาการสุกที่เพิ่มขึ้น (Mizrach *et al.*, 1999) โดยทั่วไปเมื่อผลไม้ยังเป็นผลอ่อนอยู่จะมีปริมาณกรดอินทรีย์สูง ทำให้มีค่าพีเอชต่ำ ไม่เหมาะต่อการเจริญของจุลินทรีย์ และเมื่อผลไม้สุกมีปริมาณกรดลดลงทำให้รสชาติดีขึ้น ปริมาณของกรดอินทรีย์ที่พบมากในผลมะม่วง คือ กรดซิตริก ส่วนกรดชนิดอื่นๆ ที่พบ คือ กรดมาลิก ออกซาลิก และซัคซินิก เป็นต้น (Mitra and Baldwin, 1997)

5) สารสี สารสีที่สำคัญในผลมะม่วงมีหลายชนิด ซึ่งสีของผลมะม่วงมีการเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบของสารสีเหล่านี้ ได้แก่

ก. คลอโรฟิลล์ เป็นสารที่ให้สีเขียวในผลไม้ สามารถละลายได้ดีในไขมัน และมีหน้าที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง โมเลกุลของคลอโรฟิลล์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวมีอะตอมของแมกนีเซียมล้อมรอบด้วยวงแหวนของคาร์บอนและไนโตรเจน เรียกว่า วงแหวนพอร์ไฟริน (porphyrin ring) และส่วนหางที่เป็นโซ่ยาว (long chain) ของไฮโดรคาร์บอน เรียกว่า ฟิโทล (phytol) โมเลกุลของคลอโรฟิลล์มีการสร้างขึ้นและสลายตัวอยู่ตลอดเวลา ในระหว่างการเสื่อมสลาย (senescence) คลอโรฟิลล์จะมีการสลายตัวทำให้สูญเสียสีเขียว แสดงให้เห็นถึงคุณภาพ

ที่เหมาะสมต่อการบริโภค ซึ่งเป็นข้อดีกับผลไม้ที่บริโภคผลสุก เมื่อผลไม้เริ่มสุกสีเขียวของคลอโรฟิลล์จะหายไปและมีสีเหลืองหรือสีแดงของแคโรทีนอยด์ปรากฏขึ้นแทน (จริงแท้, 2544) ปฏิกริยาการสลายตัวของคลอโรฟิลล์แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาการสลายตัวของคลอโรฟิลล์แบบต่างๆ

(ที่มา: Wills *et al.*, 1981)

ข. แคโรทีนอยด์ เป็นกลุ่มของสารสีที่พบในพืช ให้สีเหลือง สีส้ม หรือสีแดง มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในไขมันและตัวทำละลายอินทรีย์ แคโรทีนอยด์เป็นสารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว มีคาร์บอน 40 อะตอม ตัวอย่างของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ ได้แก่ แคโรทีน (carotene) ไลโคพีน (lycopene) และแซนโทฟิลล์ (xanthophyll) เป็นต้น แคโรทีน จัดเป็นโปรวิตามินเอ (provitamin A) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนให้เป็นวิตามินเอได้ในร่างกายของคนและสัตว์ ส่วนไลโคพีนและแซนโทฟิลล์ไม่มีสมบัติดังกล่าว แคโรทีนอยด์พบมากในผลไม้ที่มีสีเขียว โดยอยู่ในคลอโรพลาสต์ร่วมกับคลอโรฟิลล์ แต่จะไม่ปรากฏให้เห็น เนื่องจากถูกสารสีเขียวของ

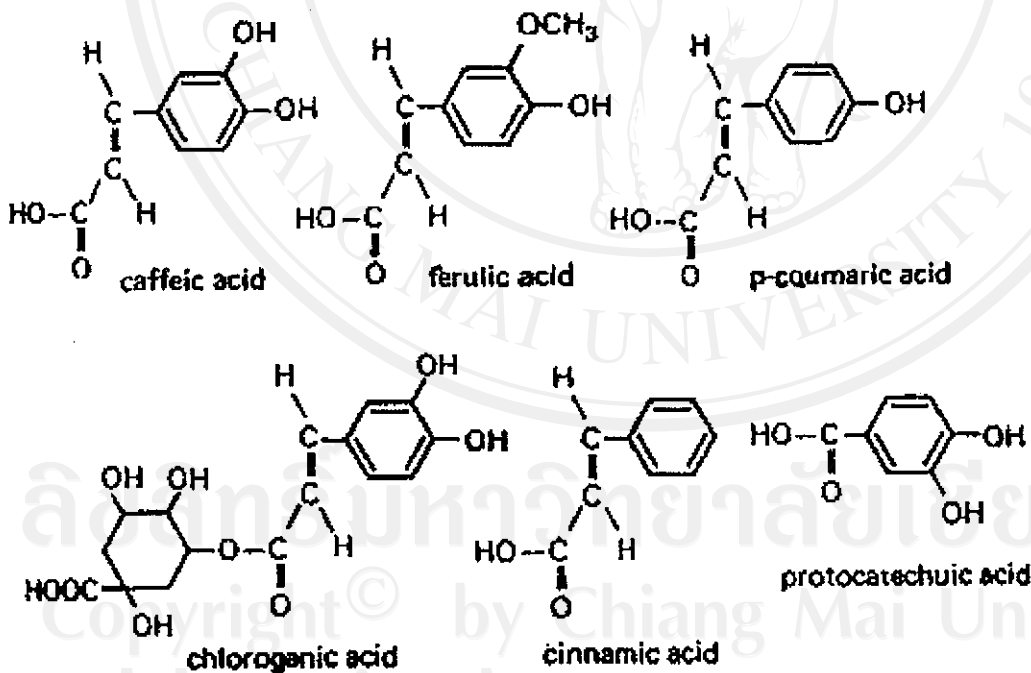
คลอโรฟิลล์บดบังไว้ และสีของแคโรทีนอยด์จะปรากฏให้เห็นเมื่อสีเขียวของคลอโรฟิลล์สลายตัวไประหว่างกระบวนการสุกของผลไม้ ถึงแม้ว่าแคโรทีนอยด์จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว แต่แคโรทีนอยด์มีสมบัติเป็นสารสีที่ค่อนข้างเสถียรเมื่ออยู่ภายในเซลล์ (จริงแท้, 2544; นิธิยา, 2545) ในระหว่างการสุกของผลมะม่วงจะมีการสังเคราะห์สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น เช่น เบต้า-แคโรทีน ( $\beta$ -carotene) ไวโอลาแซนทิน (violaxanthin) และซิส-ไวโอลาแซนทิน (cis-violaxanthin) ดังนั้นผลมะม่วงสุกจึงมีปริมาณแคโรทีนอยด์และแคโรทีนมากกว่าผลมะม่วงดิบ (Mercadante and Rodriguez-Amaya, 1998) ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ในผลไม้ของประเทศอิสราเอลพบว่า มะม่วงมีปริมาณแคโรทีนอยด์ 156 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง โดยมีปริมาณเบต้า-แคโรทีนสูงสุด และสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ที่พบมากในผลมะม่วง ได้แก่ แซนโทฟิลล์ นีโอแซนทิน (neoxanthin) ไวโอลาแซนทิน ลูทีน (lutein) และซีแซนทิน (zeaxanthin) (Ben-Amotz and Fisher, 1998)

6) สารประกอบฟีนอล ได้แก่ สารประกอบที่มีหมู่ฟีนอลเป็นองค์ประกอบสำคัญและมีหมู่เคมีอื่นๆ เข้ามาเกาะที่ตำแหน่งต่างๆ เช่น กรดซินนามิก (cinnamic acid) กรดคาเฟอิก (caffeic acid) กรดคลอโรจีนิก (chlorogenic acid) แอนโทไซยานิน (anthocyanin) และแทนนิน (tannin) มีสมบัติเป็นสารอินทรีย์ที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน aromatic สามารถละลายในน้ำได้ ที่พบในพืชมักจะรวมอยู่กับโมเลกุลของน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลที่พบในผักและผลไม้แสดงดังรูปที่ 2.2 การสังเคราะห์สารประกอบฟีนอลและปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแสดงดังรูปที่ 2.3 สารประกอบฟีนอลนอกจากมีสมบัติให้สีแล้ว ยังมีสมบัติในการเป็นสารต้านทานโรคด้วย โดยสารประกอบฟีนอลบางชนิดสามารถป้องกันและยับยั้งการเจริญของเชื้อราบางชนิดได้ และยังมีความสำคัญต่อคุณภาพทางด้านรสชาติ โดยรสฝาดของผลไม้ขึ้นอยู่กับปริมาณและการรวมกันเป็น โมเลกุลใหญ่ (polymerization) สารประกอบฟีนอลที่ให้รสฝาดมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 500-3,000 ดาลตัน โดยจะไปรวมตัวกับโมเลกุลของโปรตีนในปาก ทำให้รับรสฝาดได้ เมื่อผลไม้สุกสารประกอบฟีนอลจะรวมตัวกันเป็น โมเลกุลใหญ่ทำให้ละลายน้ำได้ลดลงและมีความฝาดลดลง สารประกอบฟีนอลที่พบในผลมะม่วง ได้แก่ gallic acid, gallotannin, mangiferin, quercetin, isoquercitrin และ ellagic acid ซึ่งปริมาณสารประกอบฟีนอลที่เปลือกมีมากกว่าในส่วนของเนื้อผล (EI Ansari *et al.*, 1969) โดยมีปริมาณแตกต่างกันไปตามชนิดของพันธุ์ (Sharma *et al.*, 2001) แสดงดังตารางที่ 2.1

สารประกอบของฟีนอลที่มีอยู่ในผลไม้ อาจทำให้เกิดสีน้ำตาลได้เมื่อเซลล์ของผลไม้ถูกกระทบกระเทือน หรือมีบาดแผล เช่น เมื่อปอกเปลือกผลไม้แล้วปล่อยให้สัมผัสกับอากาศ เนื้อของ

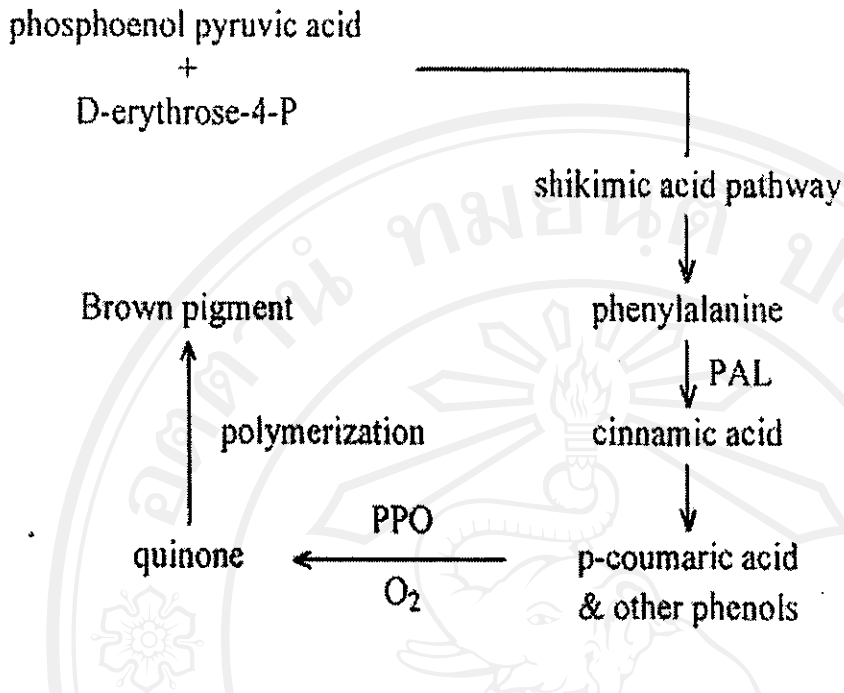
ผลไม้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ซึ่งเกิดจากการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส ที่ไปเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยน โมเลกุลของสารประกอบฟีนอลเป็นควิโนน (quinone) แล้วรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ขึ้นและมีสีน้ำตาล (จริงแท้, 2544)

7) สารระเหย กลิ่นของผลไม้เป็นลักษณะเฉพาะของผลไม้แต่ละชนิด เกิดจากสารระเหยที่มีอยู่หลายชนิด เช่น อัลดีไฮด์ (aldehyde) คีโตน (ketone) แลคโตน (lactone) และกรดอินทรีย์บางชนิด ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น พบในปริมาณน้อย ส่วนใหญ่มีโมเลกุลขนาดเล็ก มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 250 ดาลตัน โดยปกติเมื่อผลไม้สุกจะมีปริมาณและชนิดของสารระเหยมากขึ้น (จริงแท้, 2544) ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยของผลมะม่วงพันธุ์เคนซิงตันไพร์ด ด้วยวิธี gas chromatography พบว่ามีสารระเหยจำนวน 61 ชนิด ส่วนใหญ่เป็นสารพวกเทอร์พีน (terpene) และเอสเทอร์ (ester) และมีการเปลี่ยนแปลงสารระเหยเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการสุกของผลมะม่วง (Lalel *et al.*, 2003)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ

(ที่มา: จริงแท้, 2544)



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอลและปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล  
(ที่มา: จริงแท้, 2544)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลในผลมะม่วงพันธุ์ต่างๆ

พันธุ์	สารประกอบฟีนอล (มิลลิกรัม/กรัม)
เซนเซชัน (Sensation)	15.20
เอลดอน (Eldon)	13.21
ทอมมี่ แอทกินส์ (Tommy Atkins)	8.52
แดสฮีฮารี (Dashehari)	18.33
กัวซา (Chausa)	9.32
แอมราพาลี (Amrapali)	12.13
มัลลิกา (Mallika)	14.81
บุคาราน (Bhadauran)	22.65

(ที่มา: Sharma *et al.*, 2001)



8) แร่ธาตุ มะม่วงเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง แร่ธาตุที่พบมาก ได้แก่ โพแทสเซียม แคลเซียม ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียม ส่วนที่พบในปริมาณน้อย ได้แก่ เซเลเนียม ทองแดง สังกะสี และแมงกานีส (United States Department of Agriculture, 1998) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

9) วิตามิน ผลไม้เป็นแหล่งวิตามินที่สำคัญ โดยวิตามินที่พบมาก ได้แก่ แคลโรทีน วิตามินบีชนิดต่างๆ และวิตามินซี ปริมาณวิตามินในผลไม้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของผลไม้ (ตารางที่ 2.3) (จริงแท้, 2544)

ก. วิตามินเอ ในผลไม้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคโรทีน ซึ่งเป็นสารสีในกลุ่มของแคโรทีนอยด์ ปริมาณของแคโรทีนอยด์ในผลไม้ขึ้นอยู่กับอายุในการเก็บเกี่ยว ในระหว่างการสุกของผลมะม่วงจะมีการสังเคราะห์แคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น ผลมะม่วงสุกมีปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่าผลมะม่วงที่สุกบางส่วนและผลมะม่วงดิบ ตามลำดับ (Mercadante and Rodriguez-Amaya, 1998) ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ Bhaskarachary *et al.* (1995) ที่รายงานปริมาณแคโรทีนอยด์ในผลไม้ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ข. วิตามินบี ทำหน้าที่เป็นโคเอนไซม์ของปฏิกิริยาต่างๆ ภายในเซลล์พืช วิตามินบีที่พบ ได้แก่ วิตามินบีหนึ่ง (thiamin) วิตามินบีสอง (riboflavin) และไนอะซิน (niacin) ผลการวิเคราะห์ผลมะม่วงจากบอมเบย์พบปริมาณวิตามินบีชนิดต่างๆ ดังนี้ วิตามินบีหนึ่ง 40.80-130.50 ไมโครกรัม วิตามินบีสอง 69.39-198.20 ไมโครกรัม และไนอะซิน 1.38-6.27 ไมโครกรัม (วิจิตร, 2529)

ค. วิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) ในผลไม้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ reduced ascorbic acid ภายหลังการเก็บเกี่ยวอาจมีการสูญเสียวิตามินซีเกิดขึ้น ทั้งนี้เกิดจากการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด เช่น แอสคอร์บิกออกซิเดส เพอร์ออกซิเดส และโพลีฟีนอลออกซิเดส และอาจเกิดการออกซิเดชันจากปัจจัยภายนอก เช่น ออกซิเจน แสง และมีโลหะไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 2.2 คุณค่าทางโภชนาการในเนื้อมะม่วงดิบส่วนที่บริโภคได้ปริมาณ 100 กรัม

คุณค่าทางโภชนาการ	ปริมาณ	หน่วย
น้ำ	81.71	กรัม
พลังงาน	65	กิโลแคลอรี
โปรตีน	0.51	กรัม
ไขมันทั้งหมด	0.27	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	17	กรัม
ใยอาหาร	1.80	กรัม
เกลือ	0.50	กรัม
แคลเซียม	10	มิลลิกรัม
เหล็ก	0.13	มิลลิกรัม
แมกนีเซียม	9	มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	11	มิลลิกรัม
โพแทสเซียม	156	มิลลิกรัม
โซเดียม	2	มิลลิกรัม
สังกะสี	0.04	มิลลิกรัม
ทองแดง	0.11	มิลลิกรัม
แมงกานีส	0.03	มิลลิกรัม
เซเลเนียม	0.60	ไมโครกรัม
วิตามินซี	27.7	มิลลิกรัม
ไทอามีน	0.06	มิลลิกรัม
ไรโบฟลาวิน	0.06	มิลลิกรัม
ไนอะซิน	0.58	มิลลิกรัม
โฟเลต	14	ไมโครกรัม
วิตามินบีหก	0.13	มิลลิกรัม
วิตามินบีสิบสอง	0	ไมโครกรัม
วิตามินเอ	3894	หน่วยสากล
วิตามินอี	1.12	มิลลิกรัม

(ที่มา : United States Department of Agriculture, 1998)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณแคโรทีนเทียบเป็นวิตามินเอ วิตามินบี และวิตามินซีในผลไม้บางชนิด

ผลไม้	วิตามินเอ (I.U.)	ปริมาณวิตามิน (มิลลิกรัม/100 กรัม)		
		วิตามินบีหนึ่ง	วิตามินบีสอง	วิตามินซี
กล้วยหอม	190	0.05	0.06	10
ฝรั่ง	280	0.05	0.05	242
มะม่วง	4800	0.05	0.05	35
มะละกอ	1750	0.04	0.04	56
สับปะรด	4450	0.08	0.08	204
ทับทิม	น้อยมาก	0.03	0.03	4
ส้มเขียวหวาน	420	0.06	0.02	31

(ที่มา: จริงแท้, 2544)

ตารางที่ 2.4 ปริมาณแคโรทีนย่อยระหว่างการสุกของผลมะม่วงพันธุ์ทอมมีแอทกินส์

แคโรทีนย่อย (ไมโครกรัม/กรัม)	ระยะการสุก		
	มะม่วงดิบ	มะม่วงสุกบางส่วน	มะม่วงสุก
เบต้า-แคโรทีน	2.0	4.0	5.8
ไวโอลาแซนทิน	6.9	18.0	22.0
ซีส-ไวโอลาแซนทิน	3.3	9.0	14.0

(ที่มา: Mercadante and Rodriguez-Amaya, 1998)

ตารางที่ 2.5 ปริมาณแคโรทีนอยด์และเบต้า-แคโรทีนในผลไม้ชนิดต่างๆ

ผลไม้	แคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัม/100 กรัม)	เบต้า-แคโรทีน (มิลลิกรัม/100 กรัม)
อินทผลัม	3.68	2.95
มะม่วง	2.21	1.71
มะละกอ	2.76	1.05
ส้ม	2.25	0.17
เชอร์รี่	0.49	0.14
ขนุน	0.51	0.16
ฝรั่ง	0.05	0.001

(ที่มา: Bhaskarachary *et al.*, 1995)

## 2.5 การแช่เยือกแข็งผลไม้

การเก็บรักษาผลไม้โดยการแช่เยือกแข็งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เป็นผลจากการพัฒนากรรมวิธีและเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการแช่เยือกแข็ง ตลอดจนภาชนะบรรจุ ทำให้การแช่เยือกแข็งสามารถรักษาคุณภาพของผลไม้ โดยเฉพาะในด้านสี ลักษณะเนื้อสัมผัส กลิ่นและรสชาติได้ดีกว่าการแปรรูปด้วยวิธีกรรมอื่นๆ รวมทั้งยังคงมีลักษณะปรากฏใกล้เคียงกับผลไม้สดมาก และสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน การแช่เยือกแข็งสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้ผลไม้เสื่อมเสีย ลดการทำงานของเอนไซม์และปฏิกิริยาทางเคมีที่ไม่พึงประสงค์ได้ การลดอุณหภูมิให้ต่ำร่วมกับการลดปริมาณน้ำในอาหารลงโดยเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็ง ทำให้ปริมาณน้ำที่จุลินทรีย์จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีน้อยลง

การแช่เยือกแข็ง หมายถึง การทำให้อาหารมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (freezing point) ส่วนใหญ่นิยมแช่เยือกแข็งจนอาหารมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า เนื่องจากผักและผลไม้สดภายหลังการเก็บเกี่ยวเซลล์ยังคงมีชีวิตอยู่ จึงมีการหายใจเกิดขึ้นตลอดเวลาและมีความร้อนส่วนหนึ่งคายออกมา การแช่เยือกแข็งจะหยุดการหายใจและเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ได้ (นิธิยา, 2544)

จุดเยือกแข็งของอาหาร คือ อุณหภูมิที่มีผลึกน้ำแข็งเล็กๆ ในปริมาณที่สมดุลกับน้ำที่อยู่รอบๆ และก่อนที่จะเกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นจะต้องมีนิวเคลียส (nucleus) ของโมเลกุลน้ำก่อน จึงมีการเกิดนิวเคลียสหรือที่เรียกว่า นิวคลีเอชัน (nucleation) ก่อนการเกิดผลึกน้ำแข็ง (crystal growth)

นิวเคลียสมี 2 แบบ คือ แบบโฮโมจีเนียส (homogeneous) จะเกิดขึ้นในน้ำบริสุทธิ์เท่านั้น ไม่เกี่ยวข้องกับการแช่เยือกแข็งอาหาร และแบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous) ซึ่งเป็นการเกิดนิวเคลียสรอบๆ อนุภาคที่แขวนลอยหรือที่ผนังเซลล์ โดยทั่วไปจะเกิดเฮเทอโรจีเนียสนิวเคลียสขึ้นในอาหารระหว่างการเย็นยิ่งยวด โดยระยะเวลาของการเย็นยิ่งยวดขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอัตราการกำจัดความร้อนออกไป อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงจะทำให้เกิดนิวเคลียสจำนวนมาก โมเลกุลน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังนิวเคลียสที่มีอยู่เพื่อสร้างนิวเคลียสขึ้นมาใหม่ ดังนั้น การแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก และอัตราการโตของก้อนผลึกน้ำแข็งจะถูกควบคุมได้ด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อน โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผลึกน้ำแข็งที่กำลังโตขึ้น ขณะเดียวกันความเข้มข้นของตัวถูกละลายก็จะเพิ่มขึ้นระหว่างการแช่เยือกแข็ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ความหนืด และ redox potential ของของเหลวส่วนที่ยังไม่แข็งตัว ขณะที่อุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ ตัวถูกละลายแต่ละชนิดอาจถึงจุดอิ่มตัว และบางชนิดก็อาจตกผลึกได้ อุณหภูมิที่เกิดผลึกของตัวถูกละลายแต่ละชนิดจะสมดุลกับของเหลวส่วนที่ไม่แข็งตัว และส่วนที่เป็นน้ำแข็ง เรียกว่า อุณหภูมิยูเทกติก (eutectic temperature) ตัวอย่างเช่น ตัวถูกละลายที่เป็นกลูโคสจะมีอุณหภูมิยูเทกติกเป็น -5 องศาเซลเซียส ซูโครสเป็น -14 องศาเซลเซียส โซเดียมคลอไรด์เป็น -21.13 องศาเซลเซียส และแคลเซียมคลอไรด์เป็น -55 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม การหาค่าอุณหภูมิยูเทกติกสำหรับสารละลายแต่ละชนิดในอาหารทำได้ยาก เนื่องจากอาหารเป็นของผสม ดังนั้น จึงใช้ อุณหภูมิยูเทกติกสุดท้าย (final eutectic temperature) ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิยูเทกติกที่ต่ำที่สุดของตัวทำละลายในอาหารชนิดนั้นๆ ดังนั้น การเกิดผลึกน้ำแข็งในปริมาณมากที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่ออาหารมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิยูเทกติกสุดท้าย ซึ่งโดยทั่วไปการแช่เยือกแข็งจะไม่มีการกระทำจนถึงอุณหภูมินี้ จึงทำให้มีน้ำบางส่วนเหลืออยู่ในอาหาร ในรูปของของเหลว หรือส่วนที่ไม่แข็งตัวเป็นผลึกน้ำแข็ง (วิล, 2544; นิธิยา, 2544; Khadatkar *et al.*, 2004)

เมื่อน้ำบริสุทธิ์แข็งตัวจะมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้นประมาณ 9% ทำให้อาหารที่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งมีปริมาตรเพิ่มขึ้น อัตราการขยายตัวของอาหารแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่

- 1) ปริมาณความชื้นในอาหาร อาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีปริมาณน้ำมากจะขยายตัวได้มาก
- 2) การเรียงตัวของเซลล์ เนื้อเยื่อพืชมีช่องว่างอากาศระหว่างเซลล์ (intercellular air space) ซึ่งจะช่วยให้ปริมาตรของพืชที่แช่เยือกแข็งไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

- 3) ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย หากตัวถูกละลายมีความเข้มข้นสูงจะลดจุดเยือกแข็งให้ต่ำลง ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้แช่เยือกแข็งทางการค้า อาจจะทำให้อาหารยังไม่แข็งตัวหรือขยายตัว
- 4) อุณหภูมิของเครื่องแช่เยือกแข็ง เป็นตัวกำหนดปริมาณของน้ำที่ไมแข็งตัวและระดับของการขยายตัว ส่วนประกอบที่กลายเป็นผลึก ได้แก่ น้ำแข็ง ไขมัน และสารละลาย จะหดตัวเมื่อถูกทำให้เย็นลง จึงทำให้ปริมาตรของอาหารลดลง

ระหว่างการแช่เยือกแข็ง ความร้อนจะถูกพาจากภายในออกสู่ผิววนอกของชิ้นอาหารและถูกกำจัดออกไปด้วย freezing medium ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อน ได้แก่

- ก. ความสามารถในการนำความร้อนของอาหาร
- ข. บริเวณพื้นที่ผิวของอาหารที่ถ่ายเทความร้อนได้
- ค. ระยะทางที่ความร้อนเดินทางออกมาจากอาหาร
- ง. ความแตกต่างของอุณหภูมিরะหว่างอาหารกับ freezing medium
- จ. ความเป็นฉนวน (insulating effect) ของ boundary film ของอากาศรอบๆ อาหาร หากอาหารบรรจุอยู่ในภาชนะจะมีตัวขวางกั้นการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น (นิธิยา, 2544; วิไล, 2543)

## 2.6 การเตรียมวัตถุดิบก่อนการแช่เยือกแข็ง

การเตรียมวัตถุดิบก่อนนำผลิตภัณฑ์ไปแช่เยือกแข็งจะต้องกระทำอย่างถูกต้องเพราะมีความสำคัญที่เกี่ยวข้องไปถึงคุณภาพของอาหารที่แช่เยือกแข็ง สำหรับขั้นตอนการเตรียมจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัตถุดิบที่นำมาแช่เยือกแข็งและคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัตถุดิบ

การเตรียมผลไม้มือเพื่อการแช่เยือกแข็งต้องเลือกพันธุ์ที่เหมาะสม มีความเหมาะสมที่จะบริโภคสด ขั้นตอนการเตรียมผลไม้มือก่อนแช่เยือกแข็ง มีดังนี้

- 1) การคัดวัตถุดิบ (sorting/inspection) วัตถุดิบที่จะนำมาใช้จะต้องเลือกให้มีคุณภาพเหมาะสม เช่น เลือกวัตถุดิบที่มีคุณภาพดีไม่มีตำหนิหรือเน่าเสีย ขนาด และระยะการสุกเท่าๆ กันจึงนำไปแช่เยือกแข็ง
- 2) การล้างทำความสะอาด (cleaning/washing) เป็นการกำจัดเอาสิ่งสกปรกที่ผิวของวัตถุดิบออก และยังช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ผิววนอกได้น้อยลงได้อีกด้วย

- 3) ปอกเปลือก (peeling) แยกเอาส่วนเปลือก หรือส่วนที่บริโภคไม่ได้ ออก นอกจากนี้ การปอกเปลือกออกยังช่วยทำให้อัตราการแช่เยือกแข็งเร็วขึ้น เนื่องจากการปอกเปลือก หรือเอาส่วนที่บริโภคไม่ได้ ออก จะช่วยลดความต้านทานของอัตราการแช่เยือกแข็ง
- 4) การลดขนาด (cutting/shredding) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดเหมาะสมก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง หรือก่อนที่จะผ่านไปยังขั้นตอนอื่นๆ
- 5) การทำลายเอนไซม์เพื่อรักษาสี กลิ่น และเนื้อสัมผัส นิยมทำโดยการลวก (blanching) โดยจุ่มลงในน้ำร้อนหรือน้ำที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส ช่วงระยะเวลาหนึ่ง ตามความเหมาะสม

## 2.7 รูปแบบของการแช่เยือกแข็ง

วิธีการแช่เยือกแข็งสามารถแบ่งตามอัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งได้เป็น 2 แบบ คือ

1) การแช่เยือกแข็งแบบช้า (slow freezing) เป็นวิธีการแช่เยือกแข็งที่ใช้เวลานานในการทำ ให้ผลไม้งอกเกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 3-72 ชั่วโมง อุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งประมาณ -10 ถึง -15 องศาเซลเซียส การแช่เยือกแข็งแบบนี้ผลึกน้ำแข็ง ที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อผลไม้จะมีขนาดใหญ่ และดันผนังเซลล์ของผลไม้ ทำให้เกิดการบอบช้ำและ ฉีกขาด ซึ่งจะทำให้ผลไม้แช่เยือกแข็งมีคุณภาพดีลดลง หลังจากที่ผลึกน้ำแข็งหลอมละลายแล้ว เนื้อผลไม้จะละลายและของเหลวภายในเซลล์จะไหลออกมา แต่มีข้อดีก็คือ สามารถทำได้ง่าย และประหยัดค่าใช้จ่าย เหมาะสำหรับการแช่เยือกแข็งผลไม้ที่ผ่านการแปรรูปแล้ว หรือผลไม้ที่ใช้เป็น วัตถุดิบในการแปรรูป ตัวอย่างวิธีการแช่เยือกแข็งแบบนี้ ได้แก่ การแช่เยือกแข็งในห้องแช่เยือกแข็ง เป็นต้น

2) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (quick freezing) เป็นวิธีการนำผลไม้มาผ่านอุณหภูมิในช่วง ที่สามารถทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งในปริมาณมากโดยใช้ระยะเวลาสั้น ซึ่งเวลาไม่ควรเกิน 30 นาที การแช่เยือกแข็งวิธีนี้ผลึกน้ำแข็งในผลไม้จะมีขนาดเล็กละเอียด จึงไม่ทำให้เซลล์ของผลไม้บอบช้ำ เสียหายมาก เป็นวิธีที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรม แต่การแช่เยือกแข็งแบบเร็วต้องเสียค่าใช้จ่าย ในการดำเนินการสูง ตัวอย่างวิธีการแช่เยือกแข็งแบบนี้ ได้แก่ การแช่เยือกแข็งโดยใช้ลมเย็นพ่น (air blast freezing) การแช่เยือกแข็งโดยใช้เพลทสัมผัส (plate freezing) และการแช่เยือกแข็งโดยใช้ สารไนโตรเจน (cryogenic freezing) เป็นต้น (วิไล, 2543; Khadatkhar *et al.*, 2004)

การแช่เยือกแข็งที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรมแช่เยือกแข็งผักและผลไม้ ได้แก่ การ แช่เยือกแข็งแบบเร็วที่ใช้ลมเย็นพ่น ส่วนการแช่เยือกแข็งโดยใช้สารไนโตรเจนเป็นการแช่เยือกแข็ง

แบบรวดเร็วมาก (ultra rapid freezing) เครื่องแช่เยือกแข็งประเภทนี้แบ่งเป็นแบบต่างๆ ตามสภาพของสารทำความเย็นหรือ ไครโอเจน เมื่อความร้อนถูกดูดซับออกจากอาหารแช่เยือกแข็ง ไครโอเจนจะสัมผัสกับอาหารและเคลื่อนย้ายพลังงานจากอาหารในรูปของความร้อนแฝงของการระเหย หรือการระเหิด เพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงและเกิดการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว สารทำความเย็นที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ ไนโตรเจนเหลวหรือคาร์บอน ไดออกไซด์เหลวหรือแข็ง (วิไล, 2543)

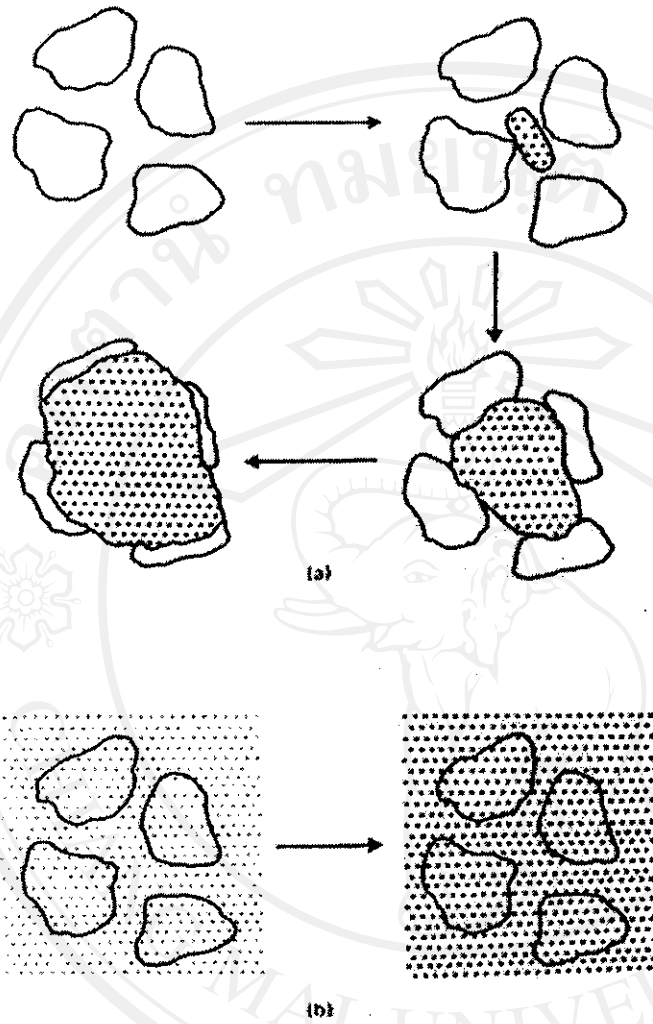
## 2.8 ผลของกระบวนการแช่เยือกแข็งอาหาร

ผลกระทบของการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพอาหารคือ เกิดความเสียหายเนื่องจากผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น การแช่เยือกแข็งมีผลต่อสี กลิ่น รสชาติ หรือคุณค่าทางโภชนาการน้อยมาก การสูญเสียดังกล่าวอาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการเตรียมหรือในระหว่างการแช่เยือกแข็ง การแช่เยือกแข็งทำให้มีลักษณะมีความคงตัวขึ้น แม้ว่าโปรตีนอาจจะตกตะกอนจากสารละลายได้

เซลล์พืชและสัตว์มีความทนทานต่อความเสียหายจากการแช่เยือกแข็งแตกต่างกัน เนื้อสัตว์มีโครงสร้างเส้นใยที่ยืดหยุ่นกว่าเซลล์พืช จึงแยกออกจากกันมากกว่าและจะแตกในระหว่างการแช่เยือกแข็ง เนื้อสัมผัสจึงไม่เกิดการเสียหายรุนแรง โครงสร้างเซลล์ที่แข็งแรงมาก เช่น ผักและผลไม้ จะได้รับความเสียหายจากผลึกน้ำแข็งมากกว่าโครงสร้างเซลล์ที่แข็งแรงน้อย ขนาดความเสียหายขึ้นกับขนาดของผลึกน้ำแข็งและอัตราการถ่ายเทความร้อน ชนิดและคุณภาพของวัตถุดิบและวิธีการจัดการก่อนการแช่เยือกแข็งมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์มาก เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากวิธีแช่เยือกแข็ง การเก็บรักษาระหว่างการแช่เยือกแข็งและวิธีหลอมละลายน้ำแข็ง (วิไล, 2543)

อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็งมีอิทธิพลต่อเซลล์เนื้อเยื่อพืชแสดงดังรูปที่ 2.4 การแช่เยือกแข็งอย่างช้าจะทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดโต ช่องว่างระหว่างเซลล์เสียรูปร่างและทำให้เซลล์ใกล้เคียงแตก ผลึกน้ำแข็งจะมีความดันไอน้ำต่ำกว่าบริเวณภายในเซลล์ น้ำจากเซลล์จึงเคลื่อนที่ไปยังผลึกที่เติบโตใหญ่ เซลล์จึงสูญเสียน้ำและได้รับความเสียหายต่อไป เนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูงขึ้น ในการละลายน้ำแข็งในอาหารนี้ เซลล์จะไม่กลับมามีรูปร่างและความแข็งแรงเหมือนเดิม อาหารจะนิ่มและสารต่างๆ ในเซลล์จะไหลออกจากเซลล์เสียหายหรือที่เรียกว่า น้ำไหลซึม ส่วนการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว ผลึกน้ำแข็งทั้งในเซลล์และในช่องว่างระหว่างเซลล์จะมีขนาดเล็ก จึงเกิดความเสียหายทางกายภาพเพียงเล็กน้อย และไม่เกิดความแตกต่างของความดัน เซลล์จึงสูญเสียน้ำน้อยมาก เนื้อสัมผัสของอาหารจึงยังคงดีอยู่ (วิไล, 2543)





- (a) การแช่เยือกแข็งแบบช้า  
 (b) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

รูปที่ 2.4 ลักษณะของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งแตกต่างกัน  
 (ที่มา: Fellow, 1997)

## 2.9 การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง

ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งสามารถเก็บรักษาไว้ได้เป็นเวลานาน โดยยังคงมีคุณภาพดีหากเก็บรักษาอย่างถูกวิธี ซึ่งการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งนั้นเกี่ยวข้องกับปัจจัยที่สำคัญ 2 ปัจจัย คือ

1) **อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา** ถ้าเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งไว้ที่อุณหภูมิต่ำมากเท่าใดก็จะทำให้อายุการเก็บรักษา และคุณภาพของผลิตภัณฑ์มากยิ่งขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิต่ำมากๆ จะช่วยรักษาสภาพความสมดุลของการแช่เยือกแข็งได้ดี สามารถระงับการเจริญของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาเคมีที่อาจจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงได้

2) **การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา** อุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษามีผลอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผลึกน้ำแข็งที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างได้ง่าย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา อุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษาเพิ่มสูงขึ้น ผลึกน้ำแข็งบางส่วนจะละลาย และจะถูกดึงให้เกาะติดกับผลึกน้ำแข็งในส่วนที่ไม่ละลาย และหากอุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษาลดลงอีกครั้งหนึ่ง ก็จะทำให้ผลึกน้ำแข็งในส่วนที่ละลายแข็งตัวใหม่ ทำให้เกิดการเพิ่มขนาดและเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกน้ำแข็ง ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์จะผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมาอย่างถูกวิธี แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา จะทำให้ผลึกน้ำแข็งที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่ทั้งหมด ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ไม่แตกต่างไปจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบช้า ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษาให้คงที่ตลอดเวลา จึงนับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก

## 2.10 ผลของการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็ง

ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง ถ้าลดอุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษาให้ต่ำลง อัตราการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางชีวเคมีก็จะลดต่ำลงเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษาภายหลังการแช่เยือกแข็งนี้ไม่ได้เป็นการทำลายเอนไซม์หรือจุลินทรีย์ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า คือ ระหว่าง -4 ถึง -10 องศาเซลเซียส จะมีผลในการทำลายจุลินทรีย์มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า คือ ระหว่าง -15 ถึง -30 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์ต่างชนิดกันจะมีความทนทานต่ออุณหภูมิแตกต่างกันด้วย เซลล์ของยีสต์ รา และแบคทีเรียแกรมลบ เช่น *Coliform* และ *Salmonella* sp. จะถูกทำลายได้ง่าย ส่วนแบคทีเรียแกรมบวก เช่น *Staphylococcus aureus* และ *Enterococci* sp. และสปอร์ของเชื้อราจะมีความทนทานมากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ อุณหภูมิ

ถ้าไม่มีผลต่อสปอร์ของแบคทีเรียโดยเฉพาะ *Bacillus* sp., *Clostridium* sp. เช่น *C. botulinum* ดังนั้นต้องควบคุมด้วยก๊าซออกซิเจน ภาวะความเป็นกรด หรือรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (วิไล, 2543; นิธิยา, 2544)

สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาอาหารแช่เยือกแข็งทั่วไป คือ ประมาณ -18 องศาเซลเซียส จะมีการสูญเสียคุณภาพทั้งที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมี และอาจเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ด้วย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายรอบๆ ผลึกน้ำแข็งสูงขึ้น ทำให้ water activity ลดลง (ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส มีค่า water activity ประมาณ 0.82 ในอาหารที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ) นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช และ redox potential ด้วย เมื่อผลึกน้ำแข็งทำให้เซลล์เมมเบรนฉีกขาด จะทำให้เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวถูกละลายที่เข้มข้นได้มากขึ้น ถ้าไม่มีการทำลายของเอนไซม์เสียก่อน (วิไล, 2543; นิธิยา, 2544)

## 2.11 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีระหว่างการเก็บรักษาผลไม้แช่เยือกแข็ง

### 1) การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

ก. เนื้อสัมผัส การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็งจะเกิดขึ้นระหว่างการแช่เยือกแข็งและระหว่างการเก็บรักษา ขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง ชนิด ขนาดของผลไม้ และขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็ง หากอัตราการแช่เยือกแข็งช้า ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ จะไปทำลายผนังเซลล์ของเนื้อผลไม้ให้เสียหายมาก หากอัตราการแช่เยือกแข็งเร็ว ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก ผนังเซลล์ของเนื้อผลไม้จะเสียหายน้อย การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็งระหว่างการเก็บรักษานั้น เนื่องจากเกิด recrystallization คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงของจำนวน ขนาด รูปร่าง และการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งขึ้นใหม่ หลังจากน้ำในผลิตภัณฑ์แข็งตัวสมบูรณ์แล้ว ทำให้ผลิตภัณฑ์มีผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่เกิดขึ้น ส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ และจากผลการทดลองของ Maestrelli *et al.* (2003) พบว่าการเก็บรักษาผลไม้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 เดือน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส ทำให้มีความแน่นเนื้อลดลง เช่นเดียวกับราสเบอร์รี่และสตอเบอร์รี่ที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -23 องศาเซลเซียส (Han *et al.*, 2004)

ข. สี การสลายตัวของสารสีและเกิดสีน้ำตาลระหว่างการเก็บรักษาผลไม้แช่เยือกแข็ง เนื่องจากหลายสาเหตุด้วยกัน การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชของผลไม้ระหว่างการเก็บรักษามีสาเหตุเนื่องจากส่วนประกอบทางเคมีจะมีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไป เมื่อค่าพีเอชของเซลล์พืชเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่อสารสี เช่น ทำให้สีของแอนโทไซยานินเปลี่ยนแปลงไป (นิธิยา, 2544) การเก็บรักษาในน้ำสตอร์เบอริแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 เดือน พบว่า มีการสูญเสียปริมาณแอนโทไซยานิน (Torreggiani *et al.*, 1999) ระหว่างการเก็บรักษาสารสีคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์จะเกิดการสลายตัวขึ้น อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือถูกเอนไซม์ในผลไม้ทำลาย และการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอล และจากการทำงานของเอนไซม์ในเนื้อผลไม้ ได้แก่ เปอร้ออกซิเดสและโพลีฟีนอลออกซิเดสขณะเก็บรักษา จากผลการทดลองของ Maestrelli *et al.* (2003) รายงานว่า ในระหว่างการเก็บรักษาผลมะเขือยาวแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 เดือน ค่า  $L^*$  และ  $b^*$  มีแนวโน้มลดลง ผลการวิเคราะห์ค่าสีของผลถึงขั้นแช่แข็งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบรวดเร็ว และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ไม่ทำให้ค่าสีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงมากนัก (สุภรัตน์, 2544) และเมื่อมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 และ 90 วินาที แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน ผลการทดลองพบว่า ค่า  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  และ  $H^\circ$  ลดลง เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น (รุจิภรณ์, 2546)

## 2) การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

ก. การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ สารอาหารประเภทวิตามินและส่วนประกอบทางเคมีที่ละลายได้ในน้ำจะสูญเสียไปในขั้นตอนการล้าง หรือการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเตรียมผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง ระหว่างการแช่เยือกแข็ง และระหว่างการเก็บรักษา โดยน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายของส่วนประกอบทางเคมีในเนื้อผลไม้จะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำแข็ง ทำให้ส่วนประกอบทางเคมีเกิดการตกตะกอนหรือเสียดสภาพ และมีการสูญเสียส่วนประกอบทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากในเนื้อผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเกิดขึ้น ทำให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบทางเคมี และเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ภายในเนื้อผลไม้ ถึงแม้ว่าจะเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิต่ำก็ตาม (นิธิยา, 2544) Hamburg parsley และ leafy parsley ที่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิ 96-98 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที ภายหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 9 เดือน มีปริมาณเบต้า-แคโรทีนมากกว่าชุดควบคุมที่ไม่ได้ผ่านการลวกก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง และการเก็บรักษา parsley ที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส พบว่า

สูญเสียเบต้า-แคโรทีนน้อยกว่า parsley ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเท่ากัน ส่วน parsley ที่ผ่านการลวกสูญเสียวิตามินซีมากกว่าหูดควบคุมที่ไม่ได้ผ่านวิธีการลวก (Lisiewska and Kmiecik, 1997) เช่นเดียวกับการเก็บรักษามะเขือเทศและผักชีฝรั่งที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 เดือน สูญเสียเบต้า-แคโรทีนและส่วนประกอบทางเคมีอื่นๆ น้อยกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส (Lisiewska and Kmiecik, 2000; Lisiewska *et al.*, 2004) การเก็บรักษาต้นหอมแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 และ -30 องศาเซลเซียส สามารถรักษาคุณภาพไว้ได้เป็นเวลา 3 และ 6 เดือน ตามลำดับ การนำต้นหอมไปลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 94-96 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที ก่อนการแช่เยือกแข็ง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 เดือน วิตามินซี เบต้า-แคโรทีน และคลอโรฟิลล์ในต้นหอม มีปริมาณลดลง 29, 20 และ 21% ตามลำดับ และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส สามารถรักษาวิตามินซีได้ดีมาก (Lisiewska and Kmiecik, 1999) เมื่อมะม่วงสุกพันธุ์ โชคอนันต์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส พบว่ามีปริมาณแคโรทีนและแคโรทีนอยด์ลดลงช้ากว่าหูดควบคุม (รุจิภรณ์, 2546)

ข. การเปลี่ยนแปลงของรสชาติและกลิ่น เนื่องจากส่วนประกอบทางเคมีของผลไม้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป จึงมีผลกระทบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรสชาติและกลิ่นของผลไม้ตามไปด้วย ส่งผลให้ผลไม้มีกลิ่นและรสชาติผิดปกติ โดยกลิ่นของผลไม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้ (Alice and Whitaker, 1974)

ปัญหาที่สำคัญของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของผลไม้แช่เยือกแข็ง คือ การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ วิตามิน การสลายตัวของสารสี และการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อผลไม้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากเอนไซม์ในเนื้อผลไม้ ได้แก่ เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสและโพลีฟีนอลออกซิเดส การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทั้งสองชนิดนี้ จะช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจะช่วยป้องกันการสูญเสียแคโรทีนอยด์ในเนื้อมะม่วงได้ ซึ่งมีรายงานว่า การเก็บรักษามะเขือเทศหั่นชิ้นแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 และ -30 องศาเซลเซียส สามารถยับยั้งเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้ โดยกิจกรรมของเอนไซม์มีแนวโน้มลดลงในช่วงเวลาเก็บรักษา 3 เดือนแรก หลังจากนั้นแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน และกิจกรรมของเอนไซม์ค่อยๆ ลดลงจนหมด เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน (Lisiewska and Kmiecik, 2000)

## 2.12 ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษาผลไม้แช่เยือกแข็ง

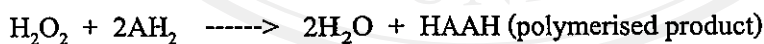
### 1) ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ (enzymatic browning)

ทำให้ลักษณะทางประสาทสัมผัสลดลง เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของสี รสชาติ เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการ เกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสและโพลีฟีนอลออกซิเดสที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อผลไม้

#### ก. เอนไซม์เปอร์ออกซิเดส (peroxidase; POD)

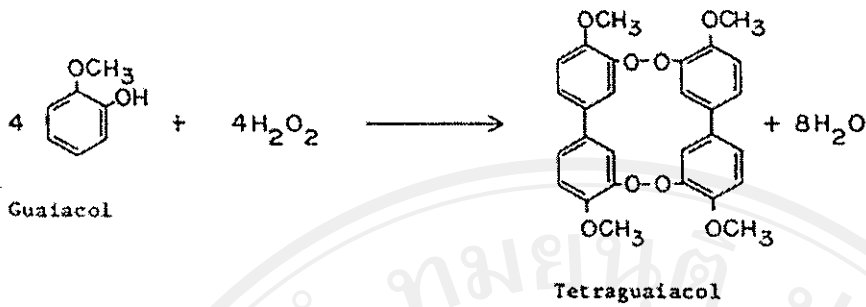
เอนไซม์นี้มีชื่อตามระบบ คือ donor: hydrogen-peroxide oxidoreductase; EC 1.11.1.7 จัดอยู่ในกลุ่มของเอนไซม์ออกซิโดรีดักเตส โดยเป็นเอนไซม์ที่มีธาตุเหล็กเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างของโมเลกุล สามารถออกซิไดส์สารประกอบฟีนอลในสภาพที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เอนไซม์นี้สามารถกระตุ้นให้กลับทำงานได้อีก (reactivate) ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งส่งผลให้ผลไม้มีกลิ่นและรสชาติที่ผิดปกติ (Alice and Whitaker, 1974) และกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสยังเพิ่มขึ้นในระหว่างการสุกของผลไม้ (Haard, 1973) ดังนั้นกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสสามารถเป็นตัวชี้บ่งการสุกและการเสื่อมสภาพของผลไม้ได้ (Gorin and Heiderma, 1976)

ตัวอย่างปฏิกิริยาหลักของ Peroxidation ได้แก่ (ปราณี, 2543)



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาหลักของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในหลอดทดลอง (*in vitro*) ที่มีสับสเตรตเป็นสารประกอบฟีนอล (A) เช่น พารา-ครีโซล (*p*-cresol) กัวอะคอล (guaiacol) เรโซลีนอล (resorcinol) และอะนิลีน (aniline) เป็นต้น

ตัวอย่างของปฏิกิริยาการออกซิไดส์สารกัวอะคอล ซึ่งเป็นสารให้ไฮโดรเจน ในขณะที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อสารทำปฏิกิริยากับเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส จะได้ผลิตภัณฑ์คือเตตระกัวอะคอล (tetraguaiacol) ซึ่งมีสีน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 2.5

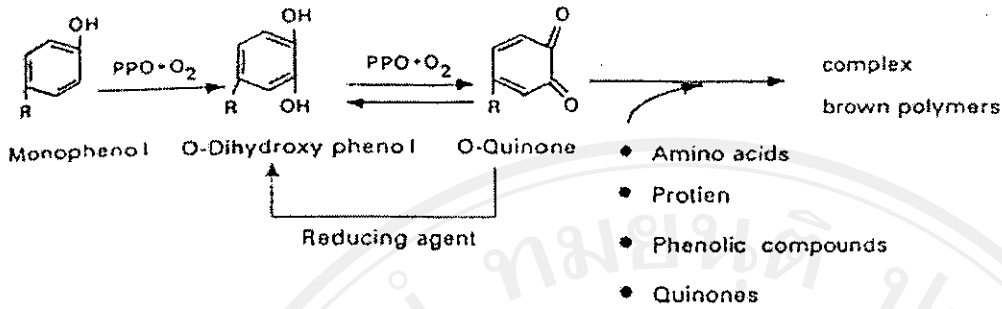


รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์สารก่ออะคอลลของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในสภาพที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ที่มา: ปราณี, 2543)

#### ข. เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase; PPO)

เอนไซม์นี้มีชื่อตามระบบ คือ *o*-diphenol oxygen oxidoreductase; EC 1.10.3.1 จัดอยู่ในกลุ่มของเอนไซม์ออกซิโดรีดักเตส เป็นกลุ่มของเอนไซม์ที่มีโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ และมีชื่อสามัญต่างๆ กัน เช่น ไทโรซิเนส (tyrosinase) โพลีฟีนอลเลส (polyphenolase) ฟีนอลเลส (phenolase) แคทีคอลออกซิเดส (catechol oxidase) ครีโซเลส (cresolase) และแคทีคอลเลส (catecholase) เป็นต้น (ปราณี, 2543) เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเป็นเอนไซม์ที่มีโลหะทองแดงเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของโมเลกุล (Martinez and Whitaker, 1995)

เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อผลไม้ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอล โดยสารประกอบโมโนฟีนอลจะเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation) ในภาวะที่มีออกซิเจนได้เป็นออร์โท-ไดฟีนอล (*o*-diphenol) และจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้เป็นออร์โท-ควิโนน (*o*-quinone) ซึ่งสารออร์โท-ควิโนนที่ได้จะมีความไวในการเกิดการรวมกันเป็นโมเลกุลใหญ่กับสารต่างๆ ได้เป็นสารพอลิเมอร์ที่มีสีน้ำตาลและมีโครงสร้างซับซ้อน (Mayer and Harel, 1979) แสดงดังรูปที่ 2.6 ส่วนสารประกอบฟีนอลที่ถูกออกซิไดส์โดยเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส ได้แก่ แคเทชิน (catechins) เอสเทอร์ของกรดซินนามิก (cinnamic acid esters) 3,4-ไฮดรอกซีฟีนิล-อะลานีน (3,4-hydroxyphenylalanine; DOPA) และไทโรซีน (tyrosine) ซึ่งค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสอยู่ในช่วง 5-7 เอนไซม์นี้ไม่คงตัว ถูกทำลายได้ด้วยความร้อน และถูกยับยั้งได้ด้วยกรดแฮไลด์ กรดฟีนอลิก ซัลไฟต์ ทีเลดิงเอเจนต์ (chelating agents) และรีดิวซิงเอเจนต์ (นิธิยา, 2544)



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส  
(ที่มา: McEvily *et al.*, 1992)

### 2.13 วิธียับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์

การยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ทำได้หลายวิธี ดังนี้

1) การลวก เนื่องจากเอนไซม์ถูกทำลายได้ด้วยความร้อน ดังนั้น การลวกจึงสามารถทำลายเอนไซม์ได้ แต่วิธีนี้ไม่นิยมนำมาใช้กับผลไม้ที่จะนำมาบริโภค เพราะมีผลทำให้เนื้อเยื่อผลไม้มีลักษณะนิ่มลง วิธีนี้เหมาะสำหรับผลไม้ที่ต้องการนำไปแปรรูป ตัวอย่างการใช้วิธีการลวกยับยั้งเอนไซม์ ได้แก่ การลวกเนื้อมะม่วงสุกโดยใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ 50% และเมื่อเพิ่มเวลาลวกเป็นเวลา 5 นาที สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ได้มากกว่า 90% (Arogba, 2000) การให้ความร้อนแก่กล้วยที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้ และที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 วินาที สามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้ 6% เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 1-2 วัน แต่ภายหลังเก็บรักษาเป็นเวลา 5 วัน กิจกรรมของเอนไซม์เพิ่มขึ้นเป็น 10% (Burnette, 1977) และการให้ความร้อนแก่เนื้อมะม่วงสุกผ่านครึ่งผลที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที สามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้มากกว่า 50% (รุจิภรณ์, 2546)

2) การแช่น้ำเชื่อมหรือน้ำตาล น้ำเชื่อมหรือน้ำตาลสามารถใช้เป็นสารป้องกันไม่ให้ก๊าซออกซิเจนแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลได้ นอกจากนี้ น้ำเชื่อมยังมีผลดีต่อรสชาติ และเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็ง เพราะน้ำตาลจะทำให้ผลไม้มีรสหวานเพิ่มขึ้น รักษาการ



เปลี่ยนแปลงของรสชาติและทำให้เนื้อสัมผัสแน่นขึ้น ตัวอย่างเช่น การเติมน้ำตาลทรายลงในผลสตรอเบอร์รี่ก่อนการแช่เยือกแข็ง แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส พบว่า สามารถป้องกันปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ (Wrolstad *et al.*, 1990)

3) การปรับค่าพีเอช ค่าพีเอชที่เหมาะสมกับกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสอยู่ระหว่าง 5-7 ดังนั้นการปรับค่าพีเอชโดยการใส่กรดซิตริก กรดมาลิก และกรดฟumaric ให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 4 หรือต่ำกว่า ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ จึงสามารถลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในน้ำผลไม้และผลไม้ชนิดต่างๆ ได้ (Martinez and Whitaker, 1995)

4) สารประกอบซัลไฟด์ สารนี้มีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมการเกิดสีน้ำตาล สารประกอบซัลไฟด์ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมหรือโพแทสเซียมไบซัลไฟด์และเมแทไบซัลไฟด์ ใช้เติมลงในผลไม้เพื่อวัตถุประสงค์ในการยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์และไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ ควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ เป็นสารฟอกสี วัตถุกันเสีย และเป็นสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน เป็นต้น (Saper and Hicks, 1989) โดยสารเหล่านี้จะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลถูกขัดขวาง อย่างไรก็ตาม Food and Drug Administration (FDA) รายงานว่า การบริโภคอาหารที่มีสารประกอบซัลไฟด์จะก่อให้เกิดการแพ้ได้ จึงจำกัดการใช้ซัลไฟด์ในผักและผลไม้ และต้องปิดฉลากบอกปริมาณสารประกอบซัลไฟด์ที่มีอยู่ หากมีปริมาณมากกว่า 10 ส่วนต่อล้านส่วน (ppm) ขึ้นไป

5) กรดแอสคอร์บิก เป็นสารที่นำมาใช้แทนซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีที่สุด ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค ไม่ก่อให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ ราคาไม่แพงและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค สามารถยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะสามารถรีดิวซ์สารควิโนนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารโพลีฟีนอลได้ เช่น การใช้สารละลายกรดแอสคอร์บิก ความเข้มข้น 0.8-1.6% แช่เนื้อแอปเปิล เป็นเวลา 90 นาที ช่วยชะลอปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อแอปเปิลให้ช้าลงได้ (Saper and Ziolkowski, 1987)

6) กรดซิตริก เนื่องจากกรดแอสคอร์บิกมีราคาแพง จึงมีการนำกรดชนิดอื่นมาใช้ทดแทน เช่น กรดซิตริกเป็นกรดที่พบได้ในผลไม้ทั่วไปอยู่แล้ว จึงมีการนำมาช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ โดยกรดซิตริกทำหน้าที่เป็นคีเลตดิเจนเอนต์ ในการจับกับโลหะทองแดงซึ่งเป็น

ส่วนประกอบของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Martinez and Whitaker, 1995) มีผลทำให้เอนไซม์ทำงานได้ช้าลง ตัวอย่างการใช้กรดซิตริกยับยั้งเอนไซม์ ได้แก่ การใช้สารละลายกรดซิตริก 100 มิลลิโมลต่อลิตร สามารถยับยั้งกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในผลลิ้นจี่ได้ 80% และการใช้สารละลายกลูตาไทโอน 10 มิลลิโมลต่อลิตรและกรดซิตริก 100 มิลลิโมลต่อลิตร ให้ผลดีกว่าการใช้กลูตาไทโอนหรือกรดซิตริกเพียงอย่างเดียว (Jiang and Fu, 1998) การใช้สารละลายผสมแคลเซียมคลอไรด์ 250 กรัมต่อลิตรและกรดซิตริก 1 กรัมต่อลิตร สามารถลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในผักกาดหอมได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ihl *et al.*, 2003) การใช้สารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 10.0% สามารถป้องกันปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของผักกาดหอมหั่นชิ้น (Castaner *et al.*, 1996) การแช่เนื้อมะม่วงสุกพันธุ์โชคอนันต์ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1.0% เป็นเวลา 90 วินาที พบว่า กิจกรรมการทำงานของเปอร์ออกซิเดสเหลืออยู่เท่ากับ 70.40, 85.88 และ 57.60% ตามลำดับ (รุจิภรณ์, 2546) และการแช่ห่อพันธุ์ elberta ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 1.0% เป็นเวลา 1 นาที สามารถยับยั้งกิจกรรมของโพลีฟีนอลออกซิเดสได้ 30% และเมื่อแช่ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 3.0% เป็นเวลา 1 และ 2 นาที สามารถยับยั้งกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ได้ 39% และ 42% ตามลำดับ (Vamos-Vigyazo, 1995)

7) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เป็นสารที่นำมาใช้กับผักและผลไม้ โดยจะจับกับสารประกอบเพกทิน ทำให้โครงสร้างเนื้อเยื่อภายในแน่น มีเนื้อสัมผัสดีขึ้น และใช้ในการป้องกันปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล โดยทำหน้าที่เป็นกิลเลตต์เจนนัดจับกับโลหะเหล็กและทองแดง ซึ่งเป็นคะตะลิสต์เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนสี นอกจากนั้นแคลเซียมไอออนยังสามารถยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ (Severini *et al.*, 2003) การใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์กับผลไม้นิยมใช้ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0.5-2.0% (General Chemical Industrial Products, 2004) ตัวอย่างเช่น การจุ่มสาเกหั่นชิ้นในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.0% และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ พบว่า สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ได้ (Ronsen and Kader, 1989) การใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.3% สามารถลดการเกิดสีน้ำตาลในเห็ด (*Agaricus bisporus*) แต่ไม่มีผลในการยับยั้งกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Kukura *et al.*, 1998) และ การใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นระหว่าง 0.18-1.40 โมลาร์ สามารถลดกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในกล้วยได้ (Burnette, 1977) การลวกชิ้นมันฝรั่งในสารละลายกรดแลคติกความเข้มข้น 1.5% ที่มีแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 4 นาที สามารถลด

การเกิดสีน้ำตาลได้ (Severini *et al.*, 2003) การแช่ชิ้นเนื้อมะม่วงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 2.0% ช่วยรักษาเนื้อสัมผัสที่ดีของมะม่วง (Salunkhe and Desai, 1984) และการแช่ชิ้น แคนตาลูปในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.0 และ 2.5% เป็นเวลา 1 นาที พบว่า ชิ้นแคนตาลูปมีเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น แต่การแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.5% ทำให้มีรสขมไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Luna-Guzman and Burrett, 2000)

8) สารยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลอื่นๆ เช่น สารประกอบอนินทรีย์จำพวกเฮไลด์สามารถยับยั้ง เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ เช่น โซเดียมคลอไรด์ และสังกะสีคลอไรด์ เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูงในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์ กรดแอสคอร์บิก และกรดซิตริก (PMP Fermentation Products, Inc, 1999) การใช้สารละลายผสม โซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ สามารถลดการเกิดสีน้ำตาลใน ถั่ว (cowpea) (Onigbinde and Ojeabulu, 1999) มีการใช้ ethylenediamine tetraacetic acid (EDTA) เป็นสารยับยั้งการออกซิเดชันของกรดแอสคอร์บิก และลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในน้ำองุ่น (Kanner and Shapira, 1989)