บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้องและงานวิจัย

2.1 มะม่วง

มะม่วงเป็นพืชในสกุล Mangifera มีประมาณ 600 ชนิด เป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน มีลักษณะเป็นพรรณไม้ที่มีทรงสูง ไม่ผลัดใบ มะม่วงที่นิยมปลูกกันมากในประเทศไทยคือ มะม่วงบ้าน (*Mangifera indica* L.) ซึ่งแบ่งมะม่วงออกได้เป็นอีกหลายสายพันธุ์ ทั้งที่เป็นพันธุ์ดั้งเดิม เช่น น้ำดอกไม้ สามปี และแก้ว เป็นต้น และพันธุ์ที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ เช่น โชคอนันต์ มหาชนก และเฮเดน เป็นต้น และยังสามารถจำแนกมะม่วงตามสายพันธุ์ออกได้เป็น 2 กลุ่มสายพันธุ์ คือ (วิจิตร, 2529; 2536)

- มะม่วงกลุ่มอินเดีย (Indian type) เป็นมะม่วงที่พบในตอนเหนือของประเทศอินเดีย ปากีสถาน สหรัฐอเมริกา และเม็กซิกัน ได้แก่ มะม่วงพันธุ์อัลฟองโซ เออร์วิน และเฮเดน เป็นต้น ซึ่งมะม่วงในกลุ่มนี้จะมีสีสะดุดตามากกว่ากลุ่มอินโดจีน เช่น มีสีแดง ม่วง และส้ม
- มะม่วงกลุ่มอินโดจีน (Indochinese type) เป็นมะม่วงที่มีถิ่นปลูกอยู่ในแนวเส้นศูนย์สูตรได้แก่ ประเทศไทย อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์ ผลมะม่วงมีสีเขียว หรือสีเหลือง

มะม่วงในประเทศไทยสามารถจำแนกชนิดตามการนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็น 3 กลุ่ม คือ (วิจิตร, 2531; 2536)

1. มะม่วงบริโภคผลดิบหรือมะม่วงดิบ ผลมะม่วงในช่วงดิบเนื้อจะมีรสมัน หวานอมเปรี้ยวเมื่อแก่จัด แต่ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์มะม่วงที่พบได้เฉพาะในประเทศไทยเท่านั้น มะม่วงประเภทนี้จึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก อีกทั้งยังไม่เป็นที่นิยมในการบริโภคของชาวต่างชาติด้วย พันธุ์ของมะม่วงกลุ่มนี้ ได้แก่ เขียวเสวย แรด ศาลายา และฟ้าลั่น เป็นต้น

2. มะม่วงบริโภคผลสุก ผลมะม่วงส่วนใหญ่ในช่วงที่ยังไม่สุกเนื้อจะมีรสเปรี้ยว แต่เมื่อผลสุกรสชาติจะหวานหอม และบางพันธุ์เมื่อผลสุกมีรสหวานอมเปรี้ยว ซึ่งเป็นผลมะม่วงที่มีศักยภาพในการส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ พันธุ์มะม่วงไทยกลุ่มนี้ ได้แก่ น้ำดอกไม้ มหาชนก อกร่อง แก้ว โชคอนันต์ และทองคำ เป็นต้น นอกจากจะนำมาบริโภคในรูปผลสุกแล้ว ยังมีการนำผลมะม่วงกลุ่มนี้มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อีกด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3. มะม่วงสำหรับแปรรูป เป็นผลมะม่วงที่นำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิดด้วยกัน เช่น แยมมะม่วง ไวน์มะม่วง น้ำมะม่วง และซอสมะม่วง เป็นต้น พันธุ์มะม่วงที่นิยมนำมาใช้แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นมะม่วงกลุ่มที่บริโภคผลสุก เช่น อกร่อง สามปี และแก้ว เป็นต้น

มะม่วงที่ปลูกเป็นการค้าในประเทศไทยส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มอินโดจีน มีลักษณะพิเศษคือ เปลือกและผิวผลมีสีเหลืองทองหรือเหลืองอมเขียว เมื่อผลสุกมีรสหวานจัดหรือหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย เนื้อนิ่มเก็บรักษาได้ไม่นาน ทำให้ประเทศไทยไม่สามารถพัฒนาสู่ตลาดส่งออกแข่งขันกับต่างประเทศได้ พันธุ์ที่ตลาดต่างประเทศนิยมจะเป็นมะม่วงในกลุ่มอินเดีย มีลักษณะพิเศษ คือ ติดผลดกลักษณะเป็นพวง ผลค่อนข้างกลม ผิวเมื่อสุกจะมีสีแดงจัดหรือเหลืองแดง รสชาติหวานอมเปรี้ยวและมีกลิ่นหอม ซึ่งมะม่วงมหาชนกเป็นมะม่วงพันธุ์ใหม่ที่เกิดจากการผสมข้ามโดยธรรมชาติระหว่างมะม่วงหนังกลางวันซึ่งเป็นมะม่วงในกลุ่มอินโดจีนกับมะม่วงพันธุ์ซันเซทซึ่งเป็นมะม่วงในกลุ่มอินเดีย และมะม่วงพันธุ์มหาชนกมีสมบัติที่ดีของมะม่วงทั้งสองกลุ่มร่วมกัน คือมีผลยาวคล้ายมะม่วงหนังกลางวัน เปลือกหนา เมื่อผลสุกผิวมีสีเหลืองส้มหรือส้มเข้มปนแดง เนื้อมีสีเหลืองทอง มีรสหวานอมเปรี้ยว และมีกลิ่นหอมคล้ายมะม่วงพันธุ์ซันเซท (จุลภาค, 2542; เฉลิมพล, 2543)

2.2 การสุกของผลไม้

การสุกของผลไม้สามารถเกิดขึ้นทั้งที่ติดอยู่บนต้น หรือภายหลังการเก็บเกี่ยวออกจากต้นแล้วก็ได้ และยังสามารถเร่งอัตราการสุกของผลไม้ได้โดยการบ่ม การเปลี่ยนแปลงของผลไม้ระหว่างกระบวนการสุกนั้นเกิดขึ้นได้หลายอย่างพร้อมกัน หรือเกิดในเวลาใกล้เคียงกันซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีดังนี้ (จริงแท้, 2542)

- อัตราการหายใจเพิ่มมากขึ้นแล้วลดลง
- ความเข้มข้นของก๊าซเอทธิลีนภายในผลเพิ่มขึ้นและมีก๊าซเอทธิลีนถูกปล่อยออกมามากขึ้นด้วย
- มีการตอบสนองต่อก๊าซเอทธิลีนได้ง่ายขึ้น
- องค์ประกอบของผนังเซลล์ เช่น สารประกอบพวกเพกตินเปลี่ยนไป ทำให้เนื้อสัมผัสของผลมะม่วงสุกมีความอ่อนตัวและเนื้อนิ่มลง
- การควบคุมการผ่านเข้า-ออกของสารต่างๆ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ลดน้อยลง
- โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ถูกสร้างขึ้น
- RNA และ DNA เปลี่ยนแปลงไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- คลอโรฟิลล์เสื่อมสลาย ทำให้สีเขียวจางลง
- สารสีแอนโทไซยานินและแคโรทีนอยด์ถูกสร้างขึ้น
- โมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตเปลี่ยนแปลงไป เช่น สตาร์ชจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาล หรือน้ำตาลชนิดหนึ่งถูกเปลี่ยนเป็นอีกชนิดหนึ่ง
- กรดอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในเนื้อผลมะม่วงเปลี่ยนไป
- สารระเหยที่ให้กลิ่นและรสชาติถูกสร้างขึ้น
- สารพวกแทนนินรวมตัวเป็นโมเลกุลใหญ่ (polymerization) ทำให้ความฝาดลดลง
- เกิดการสะสมไขบนผิวของผลไม้
- เมล็ดพัฒนาเข้าสู่ความสมบูรณ์ คือเมล็ดแก่ขึ้น
- เกิดการหลุดร่วง (abscission) ออกจากต้น

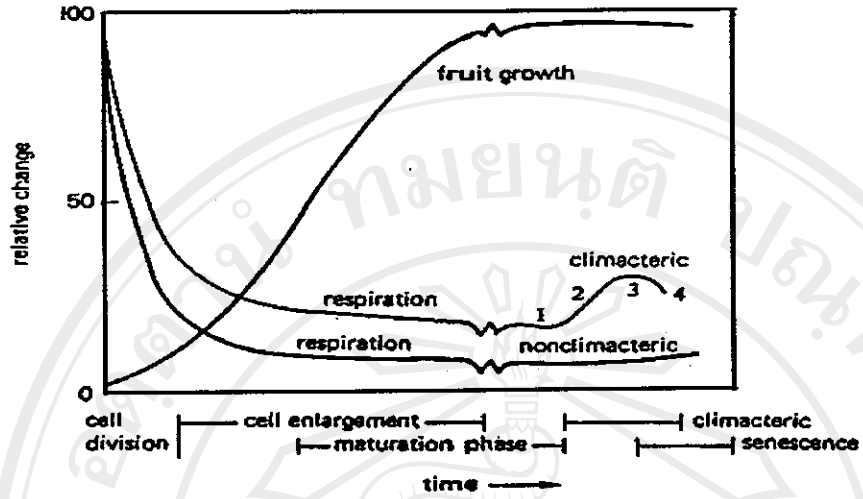
2.3 การเปลี่ยนแปลงระหว่างการสุกของผลไม้

ภายหลังการเก็บเกี่ยวผลไม้ออกจากต้นมาแล้ว ผลไม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการหายใจเกิดขึ้น ซึ่งสามารถจำแนกผลไม้ตามลักษณะการหายใจระหว่างการสุก ออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ (Biale and Young, 1981)

ผลไม้กลุ่ม climacteric คือ กลุ่มของผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูง ขณะที่กำลังเจริญเติบโตค่อยๆ ลดลงเมื่อผลแก่ และมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อผลไม้เริ่มสุก จึงมีรูปแบบของอัตราการหายใจแตกต่างกับผลไม้กลุ่ม non-climacteric ดังนั้นอัตราการหายใจของผลไม้กลุ่มนี้จึงมีความสัมพันธ์กับกระบวนการสุก และการสังเคราะห์ก๊าซเอทธิลีนของผลไม้ (รูปที่ 2.1) ตัวอย่างของผลไม้กลุ่มนี้ ได้แก่ กล้วย มะม่วง ขนุน มะเขือเทศ แอปเปิล มะละกอ และทุเรียน เป็นต้น และผลไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นระหว่างการสุกแตกต่างกัน (รูปที่ 2.2 (ก)) ผลไม้กลุ่มนี้จะต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่จัดแล้วนำไปบ่มให้ผลสุกจึงจะนำมาบริโภคได้ หากปล่อยให้ผลไม้กลุ่มนี้สุกบนต้นจะทำให้ผลไม้สุกที่ได้มีคุณภาพต่ำลงด้วย (จริงแท้, 2542)

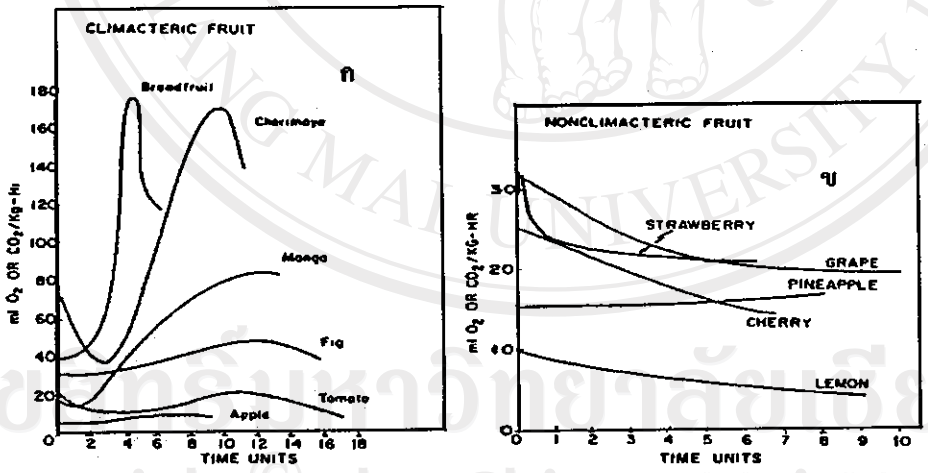
ผลไม้กลุ่ม non-climacteric คือ กลุ่มของผลไม้ที่มีอัตราการหายใจขณะที่กำลังเจริญเติบโตสูง ค่อยๆ ลดลงเมื่อผลแก่เต็มที่ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจระหว่างผลสุก ตัวอย่างของผลไม้กลุ่มนี้ เช่น ชมพู่ ส้ม ลิ้นจี่ ลำไย องุ่น และสับปะรด เป็นต้น (รูปที่ 2.2 (ข)) โดยผลไม้กลุ่มนี้จะต้องปล่อยให้ผลเจริญเติบโต แก่และสุกบนต้น จึงสามารถเก็บเกี่ยวและนำมาบริโภคได้ (จริงแท้, 2542)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบอัตราการหายใจของผลไม้ประเภท climacteric และ non-climacteric ในช่วงของการสุก และแสดงถึง pre-climacteric = 1, climacteric rise = 2, climacteric peak = 3 และ post-climacteric = 4

(ที่มา : จริงแท้, 2542)



รูปที่ 2.2 ลักษณะการหายใจของผลไม้ชนิดต่างๆ ในแต่ละกลุ่ม (ก) กลุ่ม climacteric (ข) กลุ่ม non-climacteric

(ที่มา : Biale and Young, 1981)

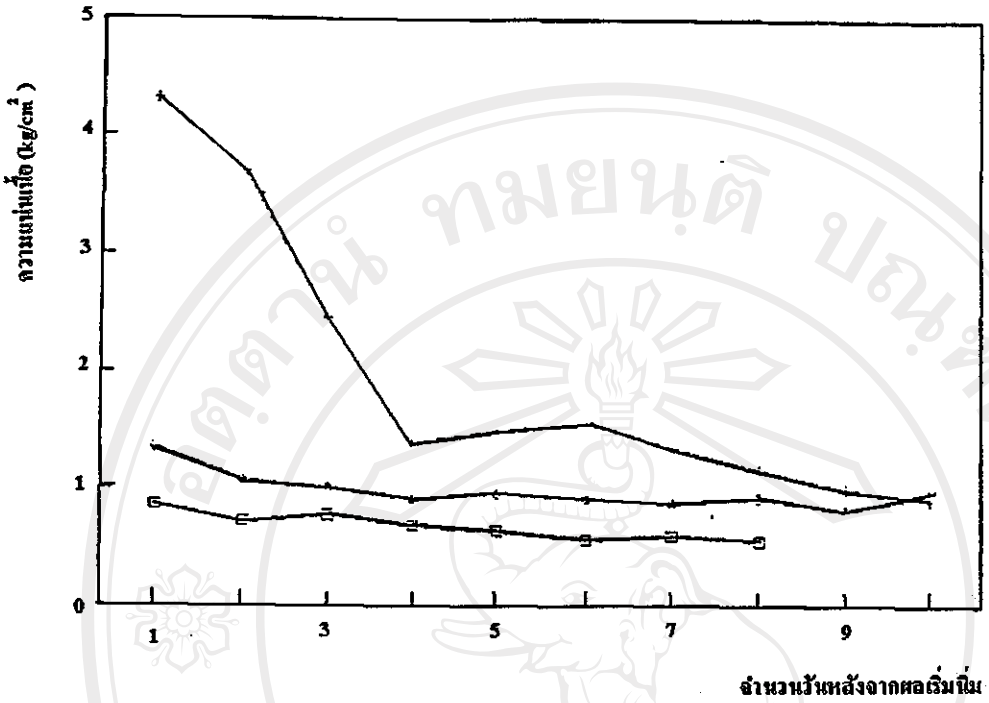
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพระหว่างการสุกของผลมะม่วง

2.4.1 สี ผลไม้บางชนิดสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีเปลือก และ/หรือสีเนื้อในระหว่างการสุกได้ โดยผลไม้ที่อยู่ในระยะแก่จัดเมื่อเก็บรักษาจะมีการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกและสีเนื้อจากสีเขียวไปเป็นสีเหลือง ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์และมีการสร้างแคโรทีนอยด์ซึ่งมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น จึงทำให้เปลือกและเนื้อของผลมะม่วงเปลี่ยนเป็นสีเหลือง การเปลี่ยนแปลงสีของผลมะม่วงแต่ละพันธุ์จะแตกต่างกัน เช่น ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เมื่อผลเริ่มสุกสีเปลือกจะเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีเหลืองเข้ม ส่วนสีเนื้อจะเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเหลืองขุ่น พันธุ์ Harumanis และ Katchamita สีเขียวของเปลือกจะหายไปและกลายเป็นสีเหลืองเมื่อผลสุกเต็มที่ (Seymour *et al.*, 1993) ส่วนพันธุ์เคนท์สีเขียวของเปลือกจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีเหลืองและสีแดงเมื่อผลสุกเต็มที่ ซึ่งการสลายตัวของสารสีในผลไม้นั้นจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยจนสามารถสังเกตได้หรือไม่ ขึ้นอยู่กับว่าในผลไม้นั้นมีสารสีชนิดใด และมีความเข้มข้นมากน้อยเท่าใดด้วย (จริงแท้, 2542) และยังขึ้นอยู่กับปริมาณของเอนไซม์ด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอนไซม์เกี่ยวข้องกับการสลายและสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เช่น เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสและคลอโรฟิลเลสในผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้และทองคำ เมื่อผลมะม่วงสุกปริมาณเอนไซม์คลอโรฟิลเลสลดลง แต่เอนไซม์เพอร์ออกซิเดสเพิ่มขึ้น (ศมาพร, 2545)

2.4.2 ความแน่นเนื้อ เมื่อผลไม้สุกความแน่นเนื้อของผลไม้จะลดลง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของสารต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ โดยเป็นผลมาจากการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์ของผลไม้ ดังนั้นเมื่อระยะการสุกของผลมะม่วงเพิ่มขึ้นความแน่นเนื้อจะลดลง ดังในรูปที่ 2.3 (ธีราพร, 2536) เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารประกอบเพกตินที่ผนังเซลล์จากที่อยู่ในรูปของโปรโตเพกติน (protopectin) ซึ่งไม่ละลายน้ำในผลไม้ดิบ เปลี่ยนเป็นกรดเพกติก (pectic acid) และกรดเพกตินิก (pectinic acid) ซึ่งละลายน้ำได้เมื่อผลไม้สุกโดยมีเอนไซม์โพลีกาแลกตูโรเนส (polygalacturonase; PG) และเพกตินเอสเตอเรส (pectinesterase; PE) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (ธีราพร, 2536; จริงแท้, 2542) เช่นเดียวกับในระหว่างการสุกของผลมะม่วงพันธุ์มหาชนกที่มีปริมาณของสารเพกตินที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น ผลมะม่วงสุกมีความอ่อนตัวลง และมีการเปลี่ยนแปลงของเฮมิเซลลูโลส ทำให้ผลมะม่วงมีเนื้อสัมผัสนิ่มลง (ศมาพร, 2545)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.3 ความแน่นเนื้อของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ (□) หนังกลางวัน (+) และแรด (◊) เมื่อระยะการสุกเพิ่มขึ้นและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
(ที่มา : ธีราพร, 2536)

2.4.3 ความแต่ง เมื่อเก็บเกี่ยวผลไม้ออกจากต้น ผลไม้สูญเสียน้ำมากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำในผลไม้ลดลงส่งผลให้เกิดการเหี่ยวได้ ซึ่งการสูญเสียน้ำในผลไม้จะมีผลกระทบต่อการสูญเสียของส่วนประกอบทางเคมีชนิดอื่นๆ ด้วย เช่น น้ำตาล และวิตามิน ได้แก่ แคโรทีน และวิตามินซี ดังนั้นในการเก็บรักษาผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยวจึงมีความสำคัญ สำหรับผลมะม่วงนั้นในระหว่างการสุกจะสูญเสียปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น มีผลทำให้น้ำหนักของผลมะม่วงลดลง ซึ่งน้ำหนักของผลมะม่วงที่สูญเสียไปนั้นจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น (ธีราพร, 2536)

ดังนั้น การประเมินระยะการสุกของผลไม้ที่เหมาะสมที่จะนำไปบริโภค หรือนำไปใช้ในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้น จำเป็นจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น ความแน่นเนื้อ ปริมาณน้ำตาลและกรดทั้งหมด เป็นต้น เพราะหากเก็บรักษาผลไม้ไว้นานเกินไปปริมาณของสารประกอบต่างๆ ในผลไม้จะลดลง (จริงแท้, 2542)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5 การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีระหว่างการสุกของผลมะม่วง

ส่วนประกอบทางเคมีของผลไม้เป็นสิ่งสำคัญมีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการจะเปลี่ยนแปลงไปตามความแก่และอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา (คนัยและนิธิยา, 2533) โดยเฉพาะในด้านวิตามินและเส้นใย ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่วนมากเปลี่ยนไปในทางที่ทำให้คุณภาพลดลง ดังนั้นเมื่อต้องการเก็บรักษาผลไม้ให้มีคุณภาพดีอยู่ได้นานที่สุด จึงจำเป็นต้องทราบการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของผลไม้ (จริงแท้, 2542)

2.5.1 คาร์โบไฮเดรต คาร์โบไฮเดรตในผลไม้เป็นสารอาหารที่สะสมไว้ ได้แก่ สตาร์ช และน้ำตาล ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ให้รสชาติและคุณค่าทางโภชนาการ คาร์โบไฮเดรตบางชนิดเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของผนังเซลล์ที่ให้ความแข็งแรง ได้แก่ เซลลูโลส และสารประกอบเพกตินต่างๆ (จริงแท้, 2542) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการสุกดังนี้

ก. น้ำตาล ที่พบมากในผลไม้มี 3 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตส ซึ่งน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดนี้สามารถเปลี่ยนรูปกันได้โดยอาศัยเอนไซม์ ปริมาณน้ำตาลในผลไม้ภายหลังการเก็บเกี่ยว อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้วแต่ชนิดของผลไม้และสภาพแวดล้อม ปริมาณของน้ำตาลในผลมะม่วงจะเพิ่มขึ้นระหว่างการสุก โดยน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นในช่วงการสุกนี้ ได้แก่ น้ำตาลซูโครส เนื่องจากสตาร์ชที่สะสมไว้ถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาล และปริมาณน้ำตาลจะแตกต่างกันไปตามชนิดของพันธุ์และความแก่ (ตารางที่ 2.1) โดยในเนื้อมะม่วงสุกมีน้ำตาลรีดิวซิงประมาณ 3-4% และน้ำตาลซูโครส 12% (นิธิยาและคนัย, 2533) และในระหว่างการสุกของผลมะม่วงพันธุ์เฮเดนสตาร์ชจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาลซูโครสมากที่สุด และน้ำตาลรีดิวซิงที่พบมากในผลมะม่วง ได้แก่ น้ำตาลฟรุกโตสและกลูโคส (สายชล, 2528; Castrillo *et al.*, 1992) โดยมีปริมาณน้ำตาลฟรุกโตส 20.6% น้ำตาลกลูโคส 5.3% และน้ำตาลซูโครส 74.1% ของน้ำตาลทั้งหมด ตามลำดับ และหลังการเก็บเกี่ยว 10 วัน ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเพิ่มขึ้น 4-9% (Jagtiani *et al.*, 1987) และมีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตทำให้ผลไม้ที่เริ่มสุกมีรสหวานมากขึ้น เนื่องจากสตาร์ชที่สะสมอยู่ในผลมะม่วงระหว่างการเจริญเติบโตถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาลโดยเฉพาะผลไม้ประเภท climacteric (สายชล, 2528) และการสุกของผลมะม่วงพันธุ์ Keitt ก็มีลักษณะคล้ายกับมะม่วงพันธุ์อื่นๆ คือมีค่าความแน่นเนื้อลดลง สีผิว สีเนื้อ มีการสลายคลอโรฟิลล์ ปริมาณกรดลดลง มีรสหวานขึ้น เนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และซูโครส โดยมีปริมาณน้ำตาลซูโครสมากที่สุด ส่วนวิตามินซีพบน้อยมาก (ธีราพร, 2536) และมะม่วงพันธุ์หนังกลางวันมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) เพิ่มขึ้นเมื่อผลแก่ขึ้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TSS ในช่วงแรกค่อนข้างน้อยเป็นเพราะผลมะม่วงมีการสะสมสตาร์ชมากกว่าน้ำตาล แต่เมื่อผลแก่ขึ้นสตาร์ชจะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สลายตัวเป็นน้ำตาลกลูโคสส่งผลให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เมื่อสุกเต็มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณอยู่ในช่วง 19-21% (จุลจิรา, 2545)

การที่ชนิดของน้ำตาลในผลไม้แตกต่างกันทำให้ผลไม้มีรสหวานไม่เท่ากัน เนื่องจากน้ำตาลฟรุกโตสจะให้ความหวานมากที่สุด รองลงมา คือน้ำตาลซูโครสและกลูโคส และระหว่างการเก็บรักษาผลไม้อาจมีการสูญเสียน้ำตาลเกิดขึ้น เนื่องจากน้ำตาลถูกนำไปใช้เป็นสารเริ่มต้น (substrate) ในกระบวนการหายใจ จึงทำให้ผลไม้มีความหวานลดลง (ธีราพร, 2536; Seymour *et al.*, 1993)

ข. สตาร์ช ในระหว่างการสุกของผลมะม่วงจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสตาร์ชในลักษณะเป็นแบบผกผันกับปริมาณน้ำตาล คือปริมาณสตาร์ชจะลดลงในระหว่างการสุกของผลมะม่วง (จริงแท้, 2542; Selvaraj *et al.*, 1989)

ค. เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และสารประกอบเพกตินต่างๆ สารเหล่านี้เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของผนังเซลล์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของผลไม้ โดยเมื่อผลไม้เริ่มสุกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่โมเลกุลของสารต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ โดยเฉพาะสารประกอบเพกติน ซึ่งจะเปลี่ยนรูปจากโปรโตเพกตินซึ่งไม่ละลายน้ำ เป็นเพกตินชนิดที่ละลายน้ำได้ เนื่องจากถูกย่อยด้วยเอนไซม์โพลีกาแลกตูโรเนสและเพกตินเอสเตอเรส (จริงแท้, 2542)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในผลมะม่วงดิบและมะม่วงสุก

พันธุ์	มะม่วงดิบ (%)		มะม่วงสุก (%)	
	น้ำตาลรีดิวซิง	น้ำตาลซูโครส	น้ำตาลรีดิวซิง	น้ำตาลซูโครส
สุวรรณเรขา	3.43	1.07	3.98	10.04
ไพรี	1.35	0.91	2.12	10.15
แขงแกนพอลลี	4.16	3.94	2.80	11.10
ลังกรา	3.39	2.85	2.36	13.81
ฟาซรี ซาฟรานี	2.31	2.04	2.48	9.37
อัลฟองโซ	1.41	1.13	2.23	9.68

(ที่มา: กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2544)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.2 โปรตีน โปรตีนในผลไม้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเอนไซม์ ซึ่งทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีต่างๆ เช่น เอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลในผลไม้ เอนไซม์ที่ไปย่อยสลายโมเลกุลของเพกติน ทำให้เนื้อผลไม้นิ่มลง และเอนไซม์อะไมเลสซึ่งไฮโดรไลซ์สตาร์ชให้เป็นน้ำตาล สำหรับในผลมะม่วงเอนไซม์ที่พบมาก ได้แก่ คะตะเลส (catalase) โพลีฟีนอลออกซิเดส และเปอร์ออกซิเดส ซึ่งพบในระหว่างการเก็บรักษา (จริงแท้, 2542)

เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) เป็นเอนไซม์อีกชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญในระหว่างกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษาผักและผลไม้ เนื่องจากผักและผลไม้จำนวนมากที่เสื่อมเสียเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Whitaker, 1995) เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสพบได้ในมะม่วง ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลในมะม่วง มีช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการเกิดสีน้ำตาลเท่ากับ 5.5-5.8 อุณหภูมิที่เหมาะสมเท่ากับ 46 องศาเซลเซียส และจะถูกทำลายกิจกรรมลงได้ 50% เมื่อลวกชิ้นมะม่วงในน้ำที่อุณหภูมิ 85, 75 และ 65 องศาเซลเซียส นาน 3, 16 และ 25.5 นาที ตามลำดับ (Jagtiani *et al.*, 1987) เมื่อลวกผลมะม่วงในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 3 นาที กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสถูกยับยั้งลงได้ 50% และเมื่อลวกน้ำนานกว่า 5 นาที กิจกรรมของเอนไซม์ถูกยับยั้งลงมากกว่า 90% ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลลดลง (Arogba, 2000) แต่การลวกใช้กับผลไม้บางชนิดไม่ได้ เพราะจะทำให้ผลไม้บางชนิดมีกลิ่นผิดปกติและลักษณะเนื้อสัมผัสนิ่มลง (นิธิยา, 2545) และการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ เกิดขึ้นเนื่องจากแคโรทีนอยด์ที่อยู่ภายในเซลล์ในรูปของ pigment-protein complex ถูกทำลายโครงสร้างโดยเอนไซม์ เมื่อแคโรทีนอยด์อยู่ในรูปอิสระซึ่งเกิดการเสื่อมสลายได้ง่าย (Bauernfeind, 1981) เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการสูญเสียแคโรทีนอยด์ที่สำคัญในมะม่วงคือเปอร์ออกซิเดสซึ่งจะเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารแคโรทีนอยด์ จึงมีการวิจัยหาวิธีการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์นี้ เพื่อป้องกันการสลายตัวของสารแคโรทีนอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหาร นอกจากนี้ยังทำให้ผักและผลไม้สดหรือที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการลวกเกิดการเปลี่ยนแปลงสี (off-color) และรสชาติ (off-flavors) (Robinson, 2000)

2.5.3 ไขมัน ผลไม้ส่วนใหญ่มีปริมาณไขมันน้อยมาก ในผลมะม่วงสุกมีปริมาณไขมัน 0.4% ผลมะม่วงดิบมี 0.1% (Ismail, 2003) และพันธุ์มะม่วงที่แตกต่างกันจะมีปริมาณของไขมันในผลไม่เท่ากัน (Selvaraj *et al.*, 1989)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.4 กรดอินทรีย์ กรดอินทรีย์เป็นสารเริ่มต้นและสารอินเทอมิเดียทในวงจรเครบส์ (Kreb's cycle) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการหายใจ และยังเป็นสารเริ่มต้นในการสังเคราะห์โมเลกุลสารต่างๆ เช่น กรดอะมิโน และยังมีบทบาทสำคัญในเรื่องของรสชาติของผลไม้อีกด้วย โดยปริมาณกรดทั้งหมด และ/หรือชนิดของกรดอินทรีย์ในผลไม้จะแตกต่างกันไปตามชนิด พันธุ์ และระยะความแก่ ซึ่งผลไม้ส่วนใหญ่เมื่อผลสุกปริมาณกรดทั้งหมดจะลดลง เนื่องมาจากกรดบางส่วนถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหายใจ หรือเปลี่ยนเป็นน้ำตาล (สายชล, 2528; Wills *et al.*, 1998) ปริมาณกรดทั้งหมดในผลมะม่วงจะลดลงเรื่อยๆ ตามระยะการสุกที่เพิ่มขึ้น (ธีราพร, 2536) ในช่วงที่ผลไม้ยังอ่อนอยู่นั้นจะมีปริมาณกรดอินทรีย์สูง ทำให้มีสภาพความเป็นกรดภายในผลสูง คือค่าพีเอชของเนื้อผลไม้ต่ำ จะช่วยป้องกันผลไม้จากการเข้าทำลายของโรคและจุลินทรีย์ต่างๆ ได้ เนื่องจากภาวะดังกล่าวไม่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ โดยผลมะม่วงสุกพันธุ์ Alphonso มีปริมาณกรดซิตริก 61% กรดมาลิก 24% กรดซักซินิก 10% และกรดยูโรนิก 5% ของปริมาณกรดทั้งหมด ตามลำดับ ผลมะม่วงพันธุ์เคนท์และ Hsiang-Ie มีปริมาณกรดซิตริกมากที่สุด ส่วนปริมาณกรดทาร์ทาริก กรดมาลิก กรดออกซาลิกและกรดไกลโคลิกมีปริมาณน้อย (Jagtiani *et al.*, 1987) และระหว่างผลมะม่วงสุกปริมาณกรด เช่น กรดซิตริก กรดมาลิก ลดลง 0.1-0.2% โดยผลมะม่วงสุกมีปริมาณกรดทั้งหมดเพียง 0.5-1.0% และมีรสหวานมากขึ้น เพราะสตาร์ชที่สะสมอยู่ในระหว่างการเจริญเติบโตถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาล ซึ่งอยู่ในรูปน้ำตาลซูโครสมีประมาณ 75% ของน้ำตาลทั้งหมด (สายชล, 2528; Jagtiani *et al.*, 1987; Jayant, 1999)

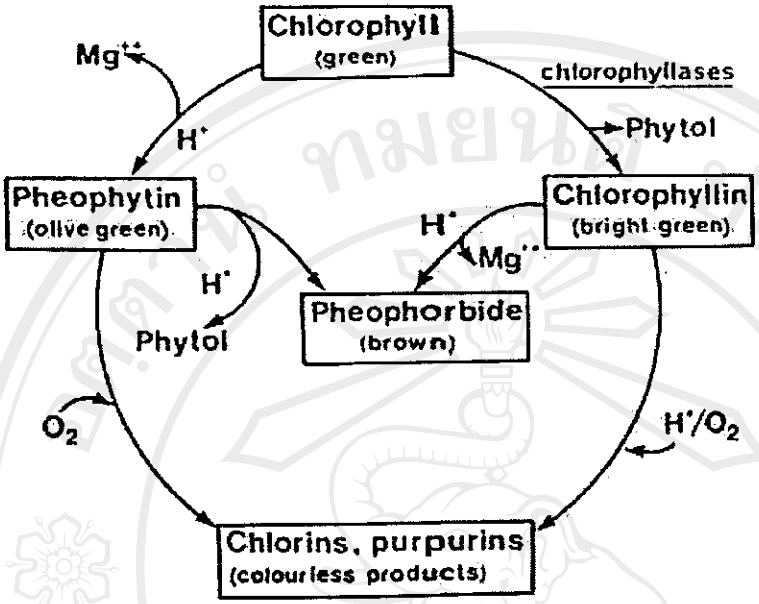
2.5.5 สารสี (pigment) ในผลไม้มีสารสี ที่สำคัญแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ พวกที่ละลายในน้ำ (water soluble) พบในแวคิวโอล ได้แก่ สารสีแอนโทไซยานินต่างๆ และพวกที่ละลายในไขมัน (lipid soluble) พบในพลาสติด เช่น สารสีเขียวได้แก่ คลอโรฟีลล์ สารสีเหลืองสีส้มได้แก่ แคโรทีนอยด์และแซนโทฟีลล์ (xanthophyll) และสารสีแดงได้แก่ ไลโคพีน (lycopene) ซึ่งสารสีแต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกันและมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างการเก็บรักษา (จริงแท้, 2542)

ก. *คลอโรฟีลล์* มีสมบัติสามารถละลายได้ดีในน้ำมัน เป็นสารที่ให้สีเขียวในผลไม้ โมเลกุลของคลอโรฟีลล์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวมีอะตอมของแมกนีเซียมล้อมรอบด้วยวงแหวนของคาร์บอนและไนโตรเจน เรียกว่า วงแหวนพอร์ไพริน (porphyrin ring) และส่วนหางที่เป็นโซ่ยาว (long chain) ของไฮโดรคาร์บอน เรียกว่า ไฟทอล (phytol) (จริงแท้, 2542) โมเลกุลของคลอโรฟีลล์จะเกิดการสลายตัวและสร้างขึ้นใหม่ตลอดเวลา แต่ในช่วงเสื่อมสลายของผลไม้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

คลอโรฟีลล์จะสลายตัวมากกว่าทำให้สีเขียวจางหายไปจนหมด ดังนั้นการสูญเสียคลอโรฟีลล์ในผลไม้จึงเป็นการชี้บ่งถึงการเสื่อมสลาย ทำให้ผลไม้สูญเสียสีเขียวที่เปลือก การเปลี่ยนแปลงสีของผลในมะม่วงแต่ละพันธุ์จะแตกต่างกัน โดยผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เมื่อเข้าสู่กระบวนการสุกสีเปลือกผลเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเข้ม ส่วนสีเนื้อเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเหลืองขุ่นในผลมะม่วงพันธุ์ Harumanis และ Katchamita สีเขียวของเปลือกผลจะหมดไปและกลายเป็นสีเหลืองเมื่อผลสุกเต็มที่ (Seymour *et al.*, 1993) ส่วนในมะม่วงพันธุ์เคนท์ พบว่าเมื่อผลเข้าสู่กระบวนการสุกที่เปลือกผลจะค่อยๆ เปลี่ยนจากสีเขียวมาเป็นสีเหลืองและสีแดงเมื่อผลสุกเต็มที่ จากการศึกษาปริมาณคลอโรฟีลล์ในขณะผลดิบและผลสุก ผลมะม่วงพันธุ์เคนท์ปริมาณคลอโรฟีลล์เอและบีมีแนวโน้มลดลงจาก 0.16 เป็น 0.08 และ 0.11 เป็น 0.06 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักสด ตามลำดับ (ดิศร, 2541) ส่วนผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ปริมาณคลอโรฟีลล์ลดลงเล็กน้อยมีค่าอยู่ในช่วง 5.0-7.5 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักสด และนอกจากนี้ยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายและสังเคราะห์คลอโรฟีลล์ ได้แก่ เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสและคลอโรฟีลเลส ตามลำดับ โดยเอนไซม์คลอโรฟีลเลสมีปริมาณลดลง แต่เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณคลอโรฟีลล์ที่ลดลงในระหว่างการสุกของผลมะม่วง (ศมาพร, 2545) การสูญเสียเสียคลอโรฟีลล์ อาจเป็นทั้งข้อดีหรือข้อเสียขึ้นกับชนิดของผลไม้ เช่น เป็นข้อดีสำหรับผลมะม่วงที่บริโภคผลสุก ได้แก่ พันธุ์มหาชนก โชคอนันต์ น้ำดอกไม้ และแรด เป็นต้น การสลายตัวของสีเขียวจึงทำให้คุณภาพของผลมะม่วงชนิดนี้ดีขึ้น แต่ในผลมะม่วงที่บริโภคผลดิบ เช่น เขียวเสวย ผลมะม่วงควรมีลักษณะผิวที่เป็นสีเขียวจึงมีคุณภาพดี ดังนั้นการชี้บ่งคุณภาพที่เหมาะสมของผลผลิตที่มีการสูญเสียคลอโรฟีลล์ว่าเป็นข้อดีหรือข้อเสีย จึงขึ้นอยู่กับผู้บริโภค และความต้องการนำผลผลิตนั้นๆ ไปใช้ประโยชน์ ปฏิกิริยาการสลายตัวของคลอโรฟีลล์ดังรูปที่ 2.4 (Wills *et al.*, 1998)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ที่ภาวะต่างๆ
(ที่มา : Wills *et al.*, 1998)

ข. *แคโรทีนอยด์* มีสมบัติละลายได้ดีในน้ำมัน เป็นสารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว ให้สีเหลือง-ส้มหรือสีแดงที่ผิวและเนื้อของผลไม้ แคโรทีนอยด์แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือแคโรทีน ไลโคพีน และแซนโทฟิลล์ ซึ่งแคโรทีนอยด์จะมีอยู่ในผลไม้ตั้งแต่แรก แต่จะไม่ปรากฏให้เห็นเนื่องจากถูกสารสีคลอโรฟิลล์บดบังไว้ และสีของแคโรทีนอยด์จะปรากฏให้เห็นเมื่อสีเขียวของคลอโรฟิลล์สลายตัวไป ถึงแม้ว่าแคโรทีนอยด์จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว แต่แคโรทีนอยด์มีสมบัติเป็นสารสีที่ค่อนข้างเสถียรเมื่ออยู่ภายในเซลล์

มะม่วงสุกเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะมีเบต้า-แคโรทีนซึ่งเป็นสารที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (antioxidant) จึงนำสมบัติดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ในการช่วยยืดอายุในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร ในปัจจุบันสารแคโรทีนอยด์สามารถช่วยลดความเสี่ยงและป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคภูมิคุ้มกันบกพร่อง และป้องกันความเครียดได้ โดยเบต้า-แคโรทีนเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันตามธรรมชาติ ช่วยยับยั้งกระบวนการส่งเสริมให้เกิดมะเร็งได้ (นวลศรีและอัญชนา, 2545; Bauernfeind, 1981; Britton and Hornero-

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Mendez,1997; Su *et al.*, 2002) และสามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชันของไขมันได้ นิยมใช้ผสมในเนยเทียม เครื่องดื่มต่างๆ ใช้แต่งหน้าเค้ก คุกกี้ รวมทั้งลูกอมและไอศกรีม เป็นต้น (Bauernfeind, 1981; Kaufman *et al.*, 1999)

ผลไม้ที่มีเนื้อสีเหลือง เช่น มะม่วง และมะละกอสุก เป็นแหล่งของสารแคโรทีนอยด์ เมื่อนำมะม่วงของเมืองไฮเดอระบาด (Hyderabad) และซะคันเดอระบาด (Secunderabad) ประเทศอินเดียมาวิเคราะห์โดยวิธีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่ามีปริมาณสารแคโรทีนทั้งหมด 2,210 ไมโครกรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัมของน้ำหนักสด เมื่อวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC มีปริมาณสารเบต้า-แคโรทีนเท่ากับ 1,710 ไมโครกรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัมของน้ำหนักสด (Bhaskarachary *et al.*, 1995) ส่วนผลมะม่วงพันธุ์ Badami และ Alphonso ก็เป็นแหล่งสารแคโรทีนอยด์ที่ดี มีปริมาณสารเบต้า-แคโรทีนมากกว่า 50% ของสารแคโรทีนอยด์ทั้งหมด สารแคโรทีนอยด์เป็นสารสีที่ให้สีและมีปริมาณมากในผลมะม่วงระยะสุกเต็มที่ (Jagtiani *et al.*, 1987; Seymour *et al.*, 1993; Schieber *et al.*, 2000) สำหรับผลมะม่วงพันธุ์ Alphonso มีปริมาณสารเบต้า-แคโรทีน 60% ของปริมาณสารแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (สายชล, 2528; นิธิยาและคนัย, 2533) และขณะผลสุกมีสารเบต้า-แคโร-ทีนเพิ่มขึ้นประมาณ 20 เท่า ส่วนผลมะม่วงพันธุ์ Pairi เพิ่มขึ้นประมาณ 10 เท่า ผลมะม่วงที่ปลูกในประเทศอินโดนีเซียมีปริมาณเบต้า-แคโรทีนสูงสุดคือ 553 รองลงมา คือ ไลโคพีนมี 353 และคริบ-โตแซนทินมี 137 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสดของส่วนที่บริโภคได้ ตามลำดับ (Setiawan *et al.*, 2001) โดยปริมาณสารเบต้า-แคโรทีนของผลมะม่วงแต่ละพันธุ์อยู่ในช่วง 660-2,540 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักสด (Wilberg and Rodriguez-Amaya, 1995) ซึ่งจากผลการวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลมะม่วงเป็นแหล่งของ provitamin A ที่ดี เนื่องจากในผลมะม่วงมีปริมาณของเบต้า-แคโรทีนสูงที่สุด โดยสารเบต้า-แคโรทีน 1 โมเลกุลสามารถแตกโมเลกุลเป็นวิตามินเอได้ 2 โมเลกุล (Bauernfeind, 1981; Fennema, 1985; Britton and Hornero-Mendez,1997; Kaufman *et al.*, 1999) และ 1 RE (Retinal Equivalent) ของวิตามินเอมีค่าเท่ากับ 6 ไมโครกรัมของเบต้า-แคโรทีน และเท่ากับ 12 ไมโครกรัมของสารแคโรทีนอยด์ชนิดอื่นๆ (Gross, 1987) ผลไม้ที่ปลูกในประเทศอิสราเอล พบว่า มะม่วงเป็นผลไม้ที่มีปริมาณสารแคโรทีนอยด์สูง มีเบต้า-แคโรทีนสูงมากประมาณ 1,990 ไมโครกรัมต่อเนื้อมะม่วง 100 กรัมของน้ำหนักสด นอกจากนี้เนื้อมะม่วงยังมีวิตามินซี และยังเป็นแหล่งของโพแทสเซียมด้วย (Ben-Amotz and Fishler, 1998; Ismail, 2003)

Mercadante *et al.* (1997) ได้ใช้ HPLC และ mass spectrometry วิเคราะห์หากลุ่มของสารแคโรทีนอยด์ในผลมะม่วงพันธุ์ Keitt พบว่ามีเบต้า-แคโรทีน (all-*trans*), β-cryptoxanthin (all-*trans* และ *cis*), zeaxanthin (all-*trans*), luteoxanthin isomers, violaxanthin (all-*trans* และ *cis*) และ neoxanthin (all-*trans* และ *cis*) และพบว่ามีสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้นอีก 2 ชนิด คือ lutein

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

และ mutatochrome ส่วนการวิเคราะห์ด้วย mass spectrometry และ HPLC ทำให้ทราบปริมาณของ all-*trans*-β-carotene ในผลมะม่วงมีประมาณ 1,510 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักสด ซึ่งมีปริมาณเป็นอันดับสองรองจาก all-*trans*-violaxanthin ส่วนสาร *cis*-violaxanthin มีปริมาณน้อยที่สุด และเบต้า-แคโรทีนเป็นสารประกอบหลักของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ในผลมะม่วงที่อยู่ในช่วงระยะผลสุก (Seymour *et al.*,1993) เช่นเดียวกับมะม่วงพันธุ์ Keitt และ Tommy Atkins มีปริมาณ all-*trans*-β-carotene, all-*trans*-violaxanthin และ 9-*cis*-violaxanthin เพิ่มขึ้นระหว่างการสุก (ตารางที่ 2.2) (Rodriguez-Amaya, 2003) และผลการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของสีเนื้อในขณะผลดิบและผลสุกในมะม่วงพันธุ์ต่างๆ โดยในพันธุ์เคนท์ปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาณเบต้า-แคโรทีนเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการพัฒนาผล คือมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 160-430 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักสด (ดิศร, 2541; Crawley, 1993) อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารเบต้า-แคโรทีนผันแปรได้เนื่องจากดิน ความแก่ และฤดูการเก็บเกี่ยว (นิธิยาและคนัย, 2533)

ตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์ระหว่างการสุกของผลมะม่วง

พันธุ์/แคโรทีนอยด์	ปริมาณแคโรทีนอยด์ (ไมโครกรัมต่อกรัมของน้ำหนักสด)		
	มะม่วงดิบ	มะม่วงสุกบางส่วน	มะม่วงสุกเต็มที่
Cv. Keitt			
all-*trans*-β-carotene	1.7 ± 0.3	4.2 ± 0.4	6.7 ± 1.6
all-*trans*-violaxanthin	5.4 ± 1.7	11 ± 2.0	18 ± 4.0
9-*cis*-violaxanthin	1.7 ± 0.4	3.9 ± 0.5	7.2 ± 1.4
all-*trans*-neoxanthin	1.6 ± 0.6	1.9 ± 0.5	1.9 ± 0.9
luteoxanthin isomers	1.0 ± 0.2	1.6 ± 0.4	2.7 ± 0.2
Cv. Tommy Atkins			
all-*trans*-β-carotene	2.0 ± 0.8	4.0 ± 0.8	5.8 ± 2.5
all-*trans*-violaxanthin	6.9 ± 3.0	18 ± 7.0	22 ± 9.0
9-*cis*-violaxanthin	3.3 ± 1.3	9.0 ± 3.2	14 ± 5.0
all-*trans*-neoxanthin	2.6 ± 1.8	6.6 ± 5.1	4.9 ± 4.5
luteoxanthin isomers	1.3 ± 0.7	2.7 ± 1.1	2.0 ± 0.6

(ที่มา : Rodriguez-Amaya, 2003)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.6 วิตามิน ผลไม้เป็นแหล่งของแคโรทีนและวิตามินซี ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันไปตามชนิดของผลไม้ (ตารางที่ 2.3)

แคโรทีนในผลมะม่วง ซึ่งเป็นสารในกลุ่มของแคโรทีนอยด์สามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ในร่างกาย ในผลมะม่วงสุกมีปริมาณแคโรทีนอยด์และแคโรทีนมากกว่าผลมะม่วงดิบ (ตารางที่ 2.4) ดังนั้นอายุของผลมะม่วง และระยะเวลาในการเก็บรักษาจึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณของวิตามินด้วย นอกจากนั้นพบว่าในผลมะม่วงพันธุ์เคนท์และซิล ยังมีวิตามินบี ได้แก่ วิตามินบีหนึ่ง (thiamine) วิตามินบีสอง (riboflavin) เท่ากัน ซึ่งมีค่า 0.06 และ 0.09 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักสด ตามลำดับ และไนอะซินเท่ากับ 0.42 และ 1.65 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักสด ตามลำดับ (Jagtiani *et al.*, 1987) เนื่องจากวิตามินบีมีหน้าที่เป็นโคเอนไซม์ของปฏิกิริยาต่างๆ ภายในเซลล์พืช ภายหลังการเก็บเกี่ยวอาจมีการสูญเสียของวิตามินในผลมะม่วงได้ ตัวอย่างเช่น หากผลมะม่วงมีการสูญเสียน้ำมากจะทำให้เกิดการสูญเสียแคโรทีนและกรดแอสคอร์บิก หรือการเก็บรักษาไว้ในผลมะม่วงภาวะที่มีอุณหภูมิไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกได้เช่นกัน (จริงแท้, 2542) เช่น ภายหลังการเก็บเกี่ยวผลอโวกาโด สาลี่ กีวี ลิ้นจี่ มะม่วง มะละกอ เสาวรส สับปะรด ส้ม และมะนาว มีการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกประมาณ 30-40% (Giuliana *et al.*, 1995)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณวิตามินเอ บี และซีในผลไม้บางชนิด

ผลไม้	วิตามินเอ (I.U.)	ปริมาณวิตามิน (มิลลิกรัม/100 กรัมของน้ำหนักสด)		
		วิตามินบีหนึ่ง	วิตามินบีสอง	วิตามินซี
กล้วยหอม	190	0.05	0.06	10
ฝรั่ง	280	0.05	0.05	242
มะม่วง	4,800	0.05	0.05	35
มะละกอ	1,750	0.04	0.04	56
สับปะรด	4,450	0.08	0.08	204
ทับทิม	น้อยมาก	0.03	0.03	4
ส้มเขียวหวาน	420	0.06	0.02	31

(ที่มา : จริงแท้, 2542)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.4 ปริมาณแร่ธาตุ แคโรทีนทั้งหมด และเบต้า-แคโรทีนในเนื้อมะม่วง 100 กรัม ของน้ำหนักสด

ส่วนประกอบทางเคมี	มะม่วงดิบ	มะม่วงสุก
แคโรทีนทั้งหมด (ไมโครกรัม)	90	2,210
เบต้า-แคโรทีน (ไมโครกรัม)	-	1,990
โพแทสเซียม (มิลลิกรัม)	83	205
โซเดียม (มิลลิกรัม)	43	26
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	10	14
เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.33	1.3
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	19	16

(ที่มา : Ismail, 2003)

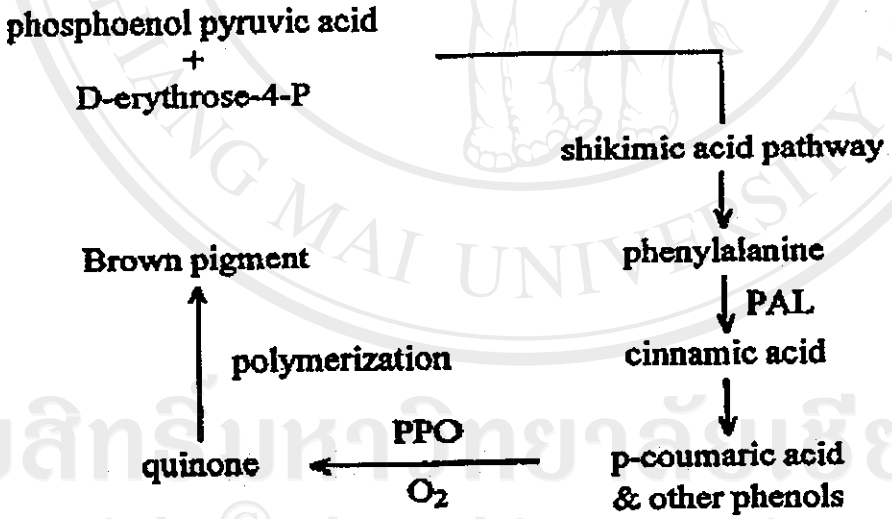
2.5.7 สารประกอบฟีนอล ในผลไม้มีสารประกอบของฟีนอลชนิดต่างๆ ซึ่งอาจทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้นเมื่อเซลล์ของผลไม้ถูกกระทบกระเทือน หรือมีบาดแผล เช่น เมื่อปอกเปลือกผลไม้แล้วปล่อยให้สัมผัสกับอากาศ เนื้อของผลไม้จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ซึ่งเกิดจากการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase; PPO) ซึ่งเปลี่ยนโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลเป็นควิโนน (quinone) แล้วรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ขึ้น (polymerization) และมีสีน้ำตาล (จริงแท้, 2542)

สารประกอบฟีนอล ได้แก่ สารประกอบที่มีหมู่ฟีนอลเป็นองค์ประกอบสำคัญและอาจมีหมู่อื่นๆ เข้ามาเกาะที่ตำแหน่งต่างๆ ตัวอย่างเช่น กรดซินนามิก กรดคาฟเฟอิก แอนโทไซยานิน และแทนนิน มีสมบัติเป็นสารอินทรีย์ที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน aromatic สามารถละลายได้ในน้ำ ที่พบในพืชมักจะรวมอยู่กับโมเลกุลของน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) สารประกอบฟีนอลนอกจากมีสมบัติให้สีแล้ว ยังมีสมบัติในการเป็นสารต้านทานโรคด้วย โดยสารประกอบฟีนอลบางชนิดสามารถป้องกันและยับยั้งการเจริญของเชื้อราบางชนิดได้ และสารประกอบฟีนอลยังให้รสฝาดแก่ผลไม้อีกด้วย ซึ่งในผลไม้บางชนิดเมื่อผลไม้สุกรสฝาดจะหายไป เช่น ผลพลับ และละมุด (จริงแท้, 2542) ปริมาณของสารประกอบฟีนอลในเนื้อและเมล็ด (kernel) มะม่วงเท่ากับ 2.4 และ 117 มิลลิกรัมต่อกรัมของน้ำหนักสด ตามลำดับ (Yean-Yean and Barlow, 2004) และพบว่าในระหว่างการพัฒนาผลสารประกอบฟีนอลที่เปลือกผลมะม่วงมีมากกว่าในส่วนเนื้อมะม่วง และระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส สารประกอบฟีนอลมี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

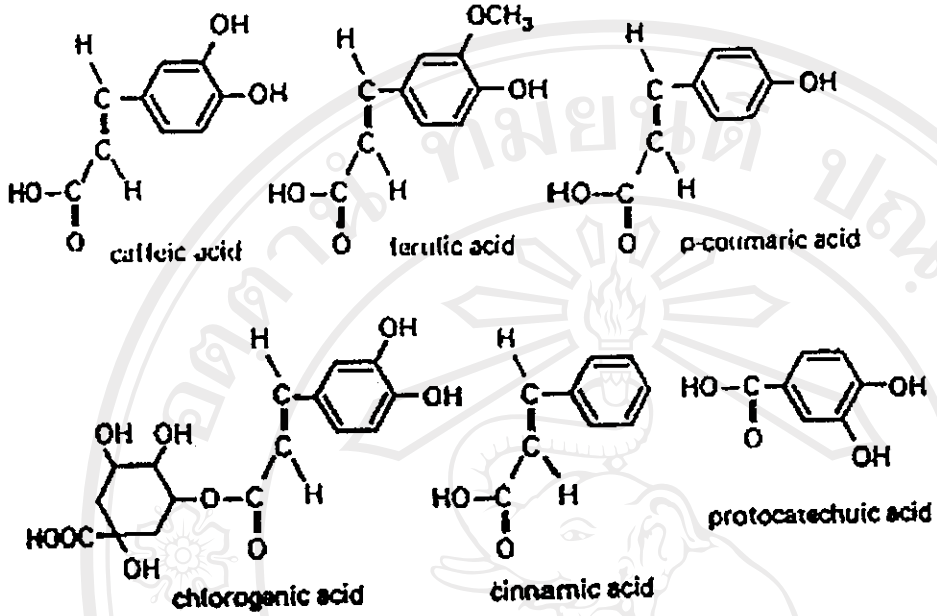
แนวโน้มลดลง (Abou Aziz *et al.*, 1976) การสังเคราะห์สารประกอบฟีนอลและปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแสดงดังรูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.6

2.5.8 สารระเหย เป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก น้ำหนักโมเลกุลมักไม่เกิน 250 ดาลตัน ตัวอย่างสารระเหย เช่น อัลดีไฮด์ คีโตน กรดอินทรีย์ และเอสเทอร์ ชนิดของสารระเหยจะแตกต่างกันตามชนิดและระยะการสุกของผลไม้ โดยปกติเมื่อผลไม้สุกจะมีปริมาณและชนิดของสารระเหยเพิ่มมากขึ้น การเก็บรักษาผลไม้เป็นระยะเวลานานๆ จะเกิดการสลายตัวของสารระเหย ทำให้กลิ่นของผลไม้ลดน้อยลง การเปลี่ยนแปลงของสารระเหยที่ให้กลิ่นในผลมะม่วงระหว่างกระบวนการสุก พบว่าผลมะม่วงพันธุ์ Kensington Pride สารระเหยส่วนใหญ่เป็นกลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอนปริมาณ 59% ของสารประกอบที่วิเคราะห์ได้ เป็นพวกเอสเตอร์ 20% โดย α-terpinolene มีปริมาณมากในช่วงระยะ 7 วันแรกของการสุก และ ethyl octanoate มีปริมาณมากในช่วงสุดท้ายของการสุก และสารพวกโมโนเทอร์พีน มีสาร car-3-ene ปริมาณมากในช่วง 3-4 วันแรกและมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ นอกจากนี้ยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสารให้กลิ่นในผลมะม่วงผันแปรตามอุณหภูมิและเวลาที่เก็บรักษา (Herianus *et al.*, 2003)



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอล และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล
(ที่มา : จริงแท้, 2542)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ
(ที่มา : จริงแท้, 2542)

2.5.9 แร่ธาตุ จะช่วยให้ผลไม้มีการเจริญเติบโตจนสมบูรณ์ ในผลมะม่วงสุก 100 กรัม มีธาตุโพแทสเซียมมากสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 205 มิลลิกรัม รองมาคือ โซเดียม 26 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 16 มิลลิกรัม แคลเซียม 14 มิลลิกรัม และเหล็ก 1.3 มิลลิกรัม โดยผลมะม่วงสุกมีปริมาณของธาตุอาหารแตกต่างจากผลมะม่วงดิบ (Ismail, 2003) (ตารางที่ 2.4)

2.5.10 ส่วนประกอบอื่นๆ การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีระหว่างการสุกของผลมะม่วงนั้นจะแตกต่างกันระหว่างผลมะม่วงดิบและผลสุก และพันธุ์มะม่วงที่ต่างกันก็จะมีผลทำให้ส่วนประกอบทางเคมีในผลแตกต่างกัน รวมทั้งลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของส่วนประกอบทางเคมีของผลมะม่วงดิบและสุกที่มาจากพันธุ์เดียวกันก็แตกต่างกันด้วย ตัวอย่างดังในตารางที่ 2.5 เส้นใยของผลมะม่วงสุกพันธุ์หนังกลางวันและสามปี มีค่า 0.45% และ 0.82% มากกว่าผลมะม่วงดิบพันธุ์หนังกลางวันและสามปี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.44% และ 0.69% ตามลำดับ แต่ผลมะม่วงสุกพันธุ์แก้วและตลับนาคมีเส้นใย 0.49% และ 0.40% ซึ่งมีปริมาณเส้นใยน้อยกว่าผลมะม่วงดิบพันธุ์แก้ว และตลับนาค คือ มี 0.62% และ 0.46% ตามลำดับ (วิจิตร, 2531)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบทางเคมีของเนื้อมะม่วงพันธุ์แก้ว หนังกลางวัน สามปี และตลับนาค

ส่วนประกอบทางเคมี (%)	มะม่วง	พันธุ์			
		แก้ว	หนังกลางวัน	สามปี	ตลับนาค
ปริมาณน้ำ	ดิบ	85.02	83.18	85.51	84.86
	สุก	82.71	82.79	83.71	85.04
เส้นใย	ดิบ	0.62	0.44	0.69	0.46
	สุก	0.49	0.45	0.82	0.40
โปรตีน	ดิบ	0.48	0.77	0.82	0.58
	สุก	0.52	0.71	0.55	0.44
ไขมัน	ดิบ	0.07	0.10	0.13	0.12
	สุก	0.09	0.12	0.05	0.07
เถ้า	ดิบ	0.31	0.49	0.48	0.24
	สุก	0.30	0.31	0.39	0.19
คาร์โบไฮเดรต	ดิบ	14.11	15.46	13.05	14.19
	สุก	15.35	16.04	15.29	14.25
ของแข็งที่ละลายน้ำได้	ดิบ	3.20	4.00	3.40	3.40
	สุก	12.00	13.00	12.00	11.00
ความเป็นกรด-ด่าง (ค่าพีเอช)	ดิบ	2.80	3.40	2.80	2.90
	สุก	4.30	4.40	3.80	4.30

(ที่มา : วิจิตร, 2531)

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบทางเคมีระหว่างการสุกของผลไม้แตกต่างกัน ทำให้มีผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของส่วนประกอบในผลไม้นั้น เช่น ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้หนังกลางวัน และแรดระหว่างการสุกมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นในช่วงแรก เนื่องจากมีปริมาณของน้ำตาลในผลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้นปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้กลับมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะอิทธิพลของปริมาณกรดที่อยู่ในผลมะม่วงมีปริมาณลดลงมากในระหว่าง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การสุก จึงทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ลดลงตามไปด้วย (ธีราพร, 2536) ดังนั้นในระหว่างการสุกของผลไม้ไม่จำเป็นว่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะเพิ่มขึ้นเสมอไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบที่ละลายน้ำได้ในผลไม้นั้นมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง อีกทั้งในผลไม้ยังประกอบด้วยสารที่ละลายน้ำได้หลายชนิด

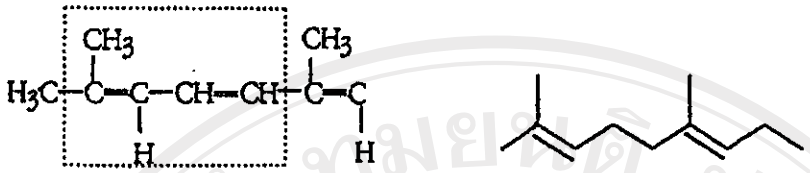
2.6 สารแคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนอยู่ 40 อะตอม สูตรโครงสร้างพื้นฐานของแคโรทีนอยด์ จัดเป็นสารประกอบในกลุ่มเทอร์พรีน (terprene group) เกิดจากหมู่ไอโซพรีน 8 หน่วย ซึ่งเป็นสารประกอบอัลคีน (alkene) ที่มีพันธะคู่จำนวนมาก (polyene) ในโมเลกุลมาเรียงต่อกันเป็นสายยาว มีลักษณะที่สำคัญคือ 2 พันธะคู่จะถูกแบ่งโดยพันธะเดี่ยว และมีการเชื่อมต่อกับหมู่เมทิล แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยการเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ไอโซพรีนในโครงสร้างโมเลกุลมี 2 แบบ คือ แบบหัวโมเลกุลต่อกับท้ายโมเลกุล (head to tail) และท้ายโมเลกุลต่อท้ายโมเลกุล (tail to tail) (รูปที่ 2.8) การเชื่อมต่อระหว่างหมู่ไอโซพรีนของแบบที่ 2 จะพบที่บริเวณส่วนกลางในโครงสร้างโมเลกุลแคโรทีนอยด์ (Gross, 1987)

นอกจากนี้โครงสร้างโมเลกุลของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ยังประกอบด้วยวงแหวนที่มีคาร์บอนอยู่ 5 หรือ 6 อะตอม (ส่วนใหญ่ที่พบมี 6 อะตอม) เป็นแบบวงแหวน (cyclic) โดยต่ออยู่ที่ปลายของโครงสร้างด้านใดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้านของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น เบต้า-แคโรทีน แอลฟา-แคโรทีน (α-carotene) ไวโอเลริทริน (violerythrin) และ/หรืออาจมีอนุพันธ์อื่นๆ ที่มีออกซิเจนอะตอมมาเกาะอยู่ด้วย ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxy) คีโต (keto) อีพอกซี (epoxy) เมทอกซี (methoxy) หรือหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) ตัวอย่างเช่น ลูทีน (lutein) ซึ่งเป็น C - 30 - dialdehyde เป็นต้น (Britton, 1996)

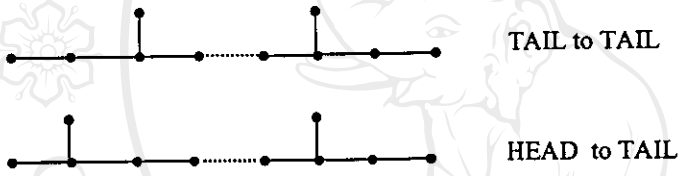
ลักษณะการเชื่อมต่อกันของหมู่ไอโซพรีน ทำให้เกิดการสมมาตรของโครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ และพันธะคู่ในโครงสร้างอาจเกิดการหมุน หรือเปลี่ยนตำแหน่งของพันธะ (rotation) ในโครงสร้างได้ (Handelman, 1996) ทำให้สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบ (geometric) ได้หลายไอโซเมอร์ (isomer) คือ Z - E isomer โดย E isomer หมายถึง all *trans* form เป็นรูปที่ถูกพบมากกว่า Z isomer หรือ *cis* form โดยทั่วไปแคโรทีนอยด์อยู่ในรูป *trans* form มีความคงตัวสูง เช่น เบต้า-แคโรทีน ที่พบเป็นรูป all *trans* ถึง 90% อีก 10% จะอยู่ในรูป *cis* form ลักษณะรูปแบบ *cis* และ *trans* ในโครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์แสดงดังรูปที่ 2.9 และสูตรโครงสร้างของเบต้า-แคโรทีนและแคโรทีนอยด์ชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.10

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



(ก) (ข)

รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของหมู่ไอโซพรีน
(ที่มา : Goodwin, 1980)



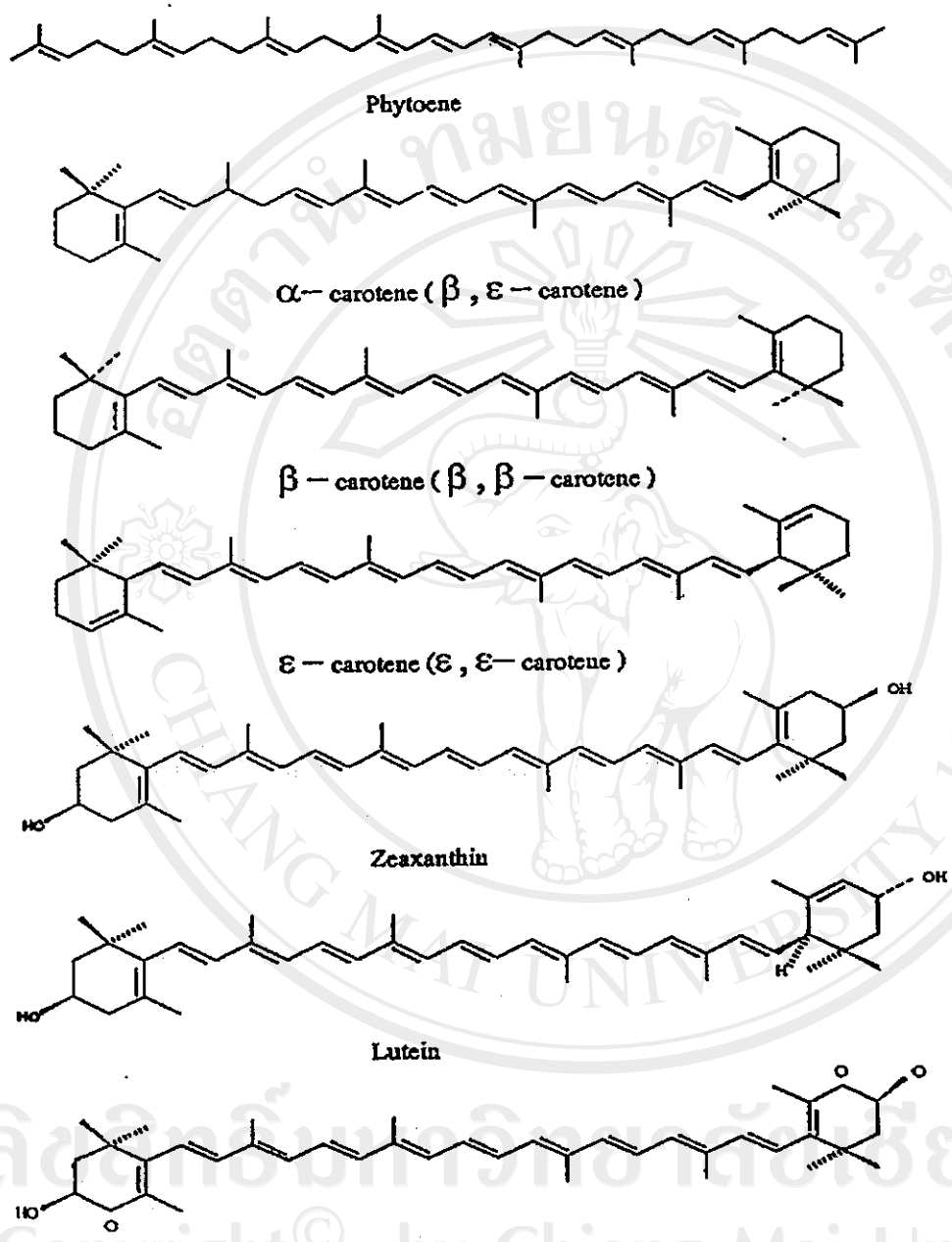
รูปที่ 2.8 ลักษณะการเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ไอโซพรีน
(ที่มา : Gross, 1987)

Trans *Cis*

Trans : ตำแหน่งของ R_1 และ R_2 ที่อยู่บนพันธะคู่จะอยู่ตรงข้ามกัน
Cis : ตำแหน่งของ R_1 และ R_2 ที่อยู่บนพันธะคู่จะอยู่ด้านเดียวกัน

รูปที่ 2.9 ลักษณะรูปแบบ *cis* และ *trans* ไอโซเมอร์ในโครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์
(ที่มา : Schoefs, 2002)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ชนิดต่างๆ

(ที่มา : Goodwin, 1980; Britton, 1996; Handelman, 1996)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7 การจำแนกสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ (Goodwin, 1980)

สารกลุ่มแคโรทีนอยด์สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางเคมี ได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

กลุ่มไฮโดรคาร์บอนแคโรทีน (hydrocarbon carotenes) เป็นกลุ่มที่โครงสร้างของโมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมกับไฮโดรเจนอะตอมเท่านั้น ตัวอย่างเช่น ลูทีน (acyclic) เบต้า-แคโรทีน (cyclic) และไลโคพีน เป็นต้น

กลุ่มออกซีจิเนเตดแซนโทฟีลล์ (oxygenated xanthophylls) เป็นกลุ่มของสารแคโรทีน-อยด์ที่มีหมู่อนุพันธ์ที่ประกอบด้วยออกซิเจนอะตอมอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุลด้วย ได้แก่ สารพวกแซนโทฟีลล์ เช่น ซีแซนทิน (zeaxanthin) มีอนุพันธ์ของไฮดรอกซิล สไปพิลโลแซนทิน (spipilloxanthin) มีอนุพันธ์ของเมทอกซิล เป็นต้น

การแบ่งแคโรทีนอยด์ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่นั้น จะเห็นได้ว่ากลุ่มของออกซีจิเนเตดแซน-โทฟีลล์มีความเป็นประจุ (polar) มากกว่ากลุ่มไฮโดรคาร์บอนแคโรทีน ดังนั้นจากสมบัตินี้เองเมื่อต้องการแยกแคโรทีนอยด์ 2 กลุ่มนี้ออกจากกัน ในการสกัดจึงใช้ตัวทำละลายที่มีประจุมาแยกสารทั้ง 2 กลุ่ม หากตัวทำละลายมีความเป็นประจุมากขึ้นสารในกลุ่มของแคโรทีนก็จะละลายในตัวทำละลายได้น้อยลง

แคโรทีนอยด์เป็นสารที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยากระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) ของพืช โดยแคโรทีนอยด์จะอยู่รวมกับคลอโรฟีลล์ ในรูป pigment–protein complex ในคลอโรพลาสต์ (chloroplast) ซึ่งแคโรทีนอยด์เมื่ออยู่รวมกับโปรตีนจะทำให้ทั้งแคโรทีนอยด์และโปรตีนมีความเสถียรมากขึ้น แคโรทีนอยด์ที่อยู่ในเซลล์ของพืชนั้นมีหน้าที่ดังนี้ (จิราวรรณ, 2541; Goodwin, 1980; Bauernfeind, 1981)

- ช่วยในกระบวนการสังเคราะห์แสง คือ แคโรทีนอยด์จะช่วยดูดกลืนแสง (ligth-harvesting) ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่คลอโรฟีลล์ไม่สามารถดูดกลืนได้ แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานและถ่ายเทให้แก่คลอโรฟีลล์ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงต่อไป

- ช่วยป้องกันและปกป้องเซลล์ของพืชจากการถูกทำลาย เนื่องจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสงจะมีพลังงานเกิดขึ้นสูงมากและเกิดขึ้นรวดเร็ว แต่คลอโรฟีลล์ไม่สามารถดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นนี้ได้หมดทันที พลังงานที่มากเกินจะไปทำลายเซลล์ของพืช ซึ่งแคโรทีนอยด์จะไปรับพลังงานที่เกินนี้ แล้วจึงนำไปให้กับคลอโรฟีลล์ หรือไปรวมกับ singlet oxygen ($^1O_2$) นอกจากนี้แคโรทีนอยด์ยังช่วยป้องกันการเกิด photo-oxidation ไม่ให้ $^1O_2$ ไปทำลายเซลล์พืช

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แคโรทีนอยด์มีหน้าที่ช่วยป้องกันการถูกทำลายของเซลล์เนื่องจากแสง จึงนำเบต้า-แคโรทีนมาใช้ประโยชน์เป็นส่วนประกอบในลิปสติก สำหรับใช้ทาป้องกันแสงแดด สำหรับในคนและสัตว์นั้นไม่สามารถผลิตสารแคโรทีนอยด์ได้ แต่สามารถดูดซึมเอาสารนี้จากอาหารที่บริโภคเข้าไปสู่ภายในร่างกายได้ (Wilhelm and Helmut, 1999)

นอกจากจะพบแคโรทีนอยด์ในพืชและสัตว์แล้ว ยังสามารถพบได้ในจุลินทรีย์ ได้แก่ แบคทีเรีย รา และสาหร่ายอีกด้วย แคโรทีนอยด์พบได้หลายลักษณะ ดังนี้ (Bauernfeind, 1981)

1. เป็นหยดไขมันเล็กๆ ในเซลล์เนื้อเยื่อ เช่น แครอท
2. กระจายตัวเป็นอนุภาคคอลลอยด์ในส่วนที่เป็นไขมัน เช่น ปาลม์น้ำมัน
3. จับกับโปรตีนในส่วนที่เป็นสารละลายในน้ำ (aqueous phase) เช่น ในผลไม้
4. เกิดเอสเทอร์กับกรดไขมัน เช่น ในผลไม้สุก

2.8 ประโยชน์ของสารแคโรทีนอยด์

2.8.1 เป็นสารสี เนื่องจากโครงสร้างของแคโรทีนอยด์มี conjugated double bonds เรียกว่า chromophore ทำให้แคโรทีนอยด์แต่ละชนิดดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแตกต่างกัน จึงมีผลต่อสีที่ปรากฏของผลไม้ที่มีสารแคโรทีนอยด์เป็นส่วนประกอบ โดยสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์จะถูกนำไปใช้เป็นสีผสมอาหาร ตัวอย่างเช่น เบต้า-แคโรทีน เบต้า-อะโพ-8'-แคโรทีนาล (β-apo-8'-carotenal) แซนโทฟีลล์ และแคนทาแซนทิน (canthaxanthin) ในสหรัฐอเมริกายอมให้ใช้สารทั้ง 4 ชนิดนี้ผสมในอาหารได้ (Ball, 1992) ซึ่งสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ให้สีเหลือง-ส้ม และส้ม-แดง แก่ผลิตภัณฑ์อาหาร

ลักษณะของแคโรทีนอยด์ที่ใช้เป็นสีผสมอาหาร จะอยู่ในรูปสารละลายในน้ำมันหรือในน้ำ ตัวอย่างอาหาร เช่น ผลิตภัณฑ์เนย มาการีน และผลิตภัณฑ์ขนมอบ เป็นต้น (Bauernfeind, 1981) และอาจเป็นสารที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ ตัวอย่างเช่น เครื่องดื่ม และไอศกรีม (นิธิยา, 2545)

2.8.2 เป็นสารต้านออกซิเดชัน (Antioxidant) หมายถึงสารที่สามารถชะลอจุดเริ่มต้นหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันได้ ผู้ป่วยที่เป็นโรคภูมิคุ้มกันบกพร่อง (AIDS) จะมีความเข้มข้นของสารต้านออกซิเดชัน ได้แก่ เบต้า-แคโรทีน แอลฟา-แคโรทีน ไลโคพีน วิตามินเอ ซี และอี ในพลาสมาระดับต่ำกว่าปกติ (วรินทร์ดา, 2541) แสดงให้เห็นว่าเบต้า-แคโรทีนและสารต้านออกซิเดชันมีความสัมพันธ์กับสุขภาพร่างกายอย่างมาก สารแคโรทีนอยด์ยังสามารถยับยั้งปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การเกิดออกซิเจนอะตอมเดี่ยว (singlet oxygen, $^1O_2$) เนื่องจากโครงสร้างของแคโรที-

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

นอยด์มีพันธะคู่ที่สายของโมเลกุล ทำให้แคโรทีนอยด์มีความสามารถจับกับ $^1O_2$ จึงป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากออกซิเจนได้ โดยสารที่มีพันธะคู่มากยิ่งจับกับออกซิเจนได้ดี เช่น ไลโคพีน มีพันธะคู่ 11 คู่ จะจับ $^1O_2$ ได้ดีกว่าเบต้า-แคโรทีนที่มีพันธะคู่ 9 คู่ (Handelman, 1996)

การเกิดสารเคมีที่ไวต่อแสงและอนุมูลอิสระ ตลอดจนกระบวนการที่ก่อให้เกิดโทษต่อร่างกาย เช่น กระบวนการเกิดออกซิเดชันของไขมัน (lipid peroxidation) ซึ่งมีกลไกการเกิดได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ (Madhavi *et al.*, 1996)

1) กระบวนการเริ่มต้น (Initiation)

เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) $R_\bullet$ (1)

2) กระบวนการแพร่ขยาย (Propagation)

$R_\bullet + O_2 \longrightarrow ROO_\bullet$ (เร็ว) (2)

$ROO_\bullet + RH \longrightarrow ROOH + R_\bullet$ (รับอะตอมของ H) (3a)

$ROO_\bullet + RH \longrightarrow ROORH_\bullet$ (การเติมพันธะคู่) (3b)

3) กระบวนการสิ้นสุด (Termination)

$ROO_\bullet + ROO_\bullet \longrightarrow$ ผลิตผลที่ไม่เป็นอนุมูลอิสระ (4)

ในระบบชีววิทยาจะมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวและสารอื่นๆ ที่ไวต่อการถูกทำลายด้วยกระบวนการออกซิเดชันซึ่งเป็นสิ่งที่อันตราย เนื่องจากกระบวนการนี้มีความสัมพันธ์กับกระบวนการเริ่มต้นที่ก่อให้เกิดความผิดปกติขึ้นในร่างกาย ซึ่งมีการผลิตอนุมูลอิสระ ($R_\bullet$) และจะมีการเพิ่มพูนขึ้น โดยผ่านกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับอนุมูลเพอร์ออกซิล (peroxyl radical, $ROO_\bullet$) แม้ว่ากระบวนการนี้จะสิ้นสุดเอง โดยการรวมตัวกันของอนุมูลเพอร์ออกซิลกลายเป็นผลิตผลที่ไม่เป็นอนุมูลอิสระ ในระหว่างนี้อาจเกิดกระบวนการทำลายกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวอย่างมากมาย ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวของโซ่ (chain length) โดยปกติกระบวนการแพร่ขยายของปฏิกิริยาลูกโซ่เกี่ยวข้องกับการที่อะตอมของไฮโดรเจนรวมเข้ากับอนุมูลเพอร์ออกซิล (ปฏิกิริยา 3a) แต่บางครั้งก็เกิดการเติมพันธะคู่ (ปฏิกิริยา 3b) ปฏิกิริยาลูกโซ่นี้สามารถถูกยับยั้งได้โดยการเติมสารต้านออกซิเดชัน เช่น วิตามินอี สารประกอบฟีนอล สำหรับเบต้า-แคโรทีนนั้นโดยโครงสร้างแล้วง่ายต่อการถูกออกซิไดซ์มาก ซึ่งทำให้การเติมอนุมูลเพอร์ออกซิล เป็นไปโดยง่ายด้วยเช่นกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

β-carotene + ROO• ⟶ β-car• (5)

β-car• ทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนทำให้ได้อนุมูลอิสระใหม่ คือ β-car-OO•

β-car• + O_2 ⟷ β-car-OO• (6)

ดังนั้นเบต้า-แคโรทีนจึงกลายเป็นตัวออกซิไดซ์เอง (เกิดปฏิกิริยา auto-oxidation) ซึ่งอนุมูล β-car• สามารถเข้ารวมกับอนุมูลเพอร์ออกซิลได้ (สมการที่ 7) ซึ่งจะเกิดเร็วกว่าการรวมอนุมูลเพอร์ออกซิล 2 โมเลกุลเข้าด้วยกัน ผลลัพธ์คือ มีการทำลายปฏิกิริยาลูกโซ่โดยมีอันตรายน้อยที่สุด

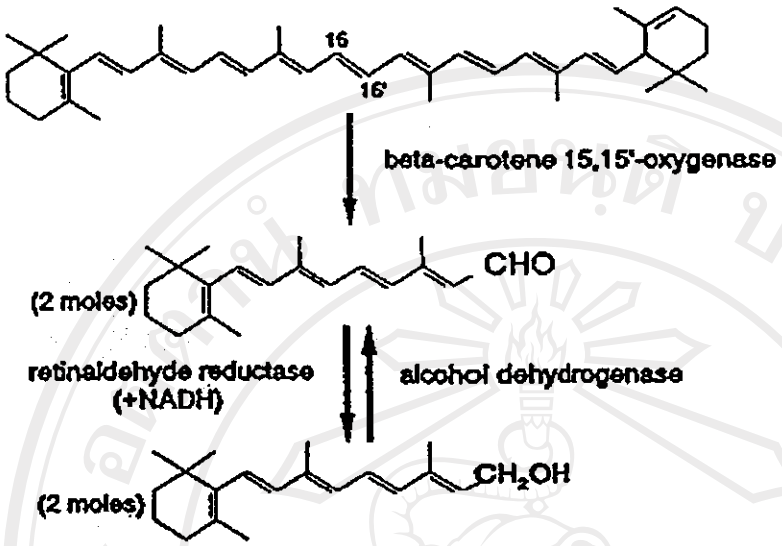
β-car• + ROO• ⟶ ผลิตผลที่ไม่เป็นอนุมูลอิสระ (7)

เนื่องจากเบต้า-แคโรทีนมีผลทำให้ระบบภูมิคุ้มกันทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบกับมีสมบัติการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบชนิดนี้จึงมีฤทธิ์ต้านการเกิดโรคมะเร็ง ซึ่งมีสาเหตุสำคัญประการหนึ่ง คืออนุมูลอิสระทำลายสารพันธุกรรมดีเอ็นเอ (DNA) โครงสร้างที่เป็นโปรตีน เอนไซม์ และเยื่อหุ้มต่างๆ (membrane) ทำให้เกิดผลิตผลที่เป็นพิษ และจากสมบัติดังกล่าว ทำให้มีการนำสารกลุ่มแคโรทีนอยด์มาใช้เป็นส่วนประกอบ หรือเคลือบผิวอาหาร เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ทำให้อาหารมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น (วรินทร์ดา, 2541; Handelman, 1996; Madhavi *et al.*, 1996; Reische *et al.*, 1998)

2.8.3 เป็นสาร provitamin A กลุ่มของสารแคโรทีนอยด์ที่พบในปัจจุบันมีมากถึง 600 ชนิด แต่มีประมาณ 50-60 ชนิดเท่านั้นที่สามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ (ตารางที่ 2.6) และแคโรทีนอยด์ที่พบปริมาณมากในอาหารมี 4 ชนิด ได้แก่ แอลฟา- เบต้า- และแกมม่า-แคโรทีน และเบต้า-คริบโตแซนทิน (Ball, 1992) สารที่สำคัญ คือ เบต้า-แคโรทีน เนื่องจากเบต้า-แคโรทีน 1 โมเลกุลจะมีเบต้า-ไอโอโนน 2 วงที่เหมือนกันมาต่อกันด้วยโซ่ยาวของคาร์บอนอะตอม เมื่อพันธะคู่ตรงกลางถูกออกซิไดซ์ด้วยเอนไซม์ที่อยู่ในผนังลำไส้เล็กและในตับจะได้ วิตามินเอ 2 โมเลกุล (รูปที่ 2.11) ส่วนแอลฟา- และ แกมม่า-แคโรทีน และเบต้า-คริบโตแซนทินจะให้วิตามินเอ 1 โมเลกุล เพราะมีเบต้า-ไอโอโนนเพียงวงเดียว (สมทรง, 2543)

การได้รับสารโปรวิตามินเอในระดับที่สูงจะไม่ก่อให้เกิดอาการเป็นพิษจากวิตามินเอ (vitamin A toxicity) แต่จะมีการสะสมที่อวัยวะต่างๆ เกิดภาวะที่เรียกว่า แคโรทีโนซีส (carotenosis) ทำให้ผิวหนังบริเวณร่องจมูก ฝ่ามือ และอุ้งเท้ามีสีเหลือง สำหรับในอวัยวะอื่นได้ศึกษาในผู้ป่วยที่ได้รับเบต้า-แคโรทีนระดับสูง เพื่อรักษาโรคไวต่อแสง (photosensitivity) พบว่า ไม่มีการสะสมของเบต้า-แคโรทีนในตับและสมอง (วรินทร์ดา, 2541; Maga and Tu, 1995; Rucker *et al.*, 2001)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงเบต้า-แคโรทีนเป็นวิตามินเอในร่างกาย
(ที่มา : สมทรง, 2543)

ตารางที่ 2.6 สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์เมื่อเปรียบเทียบเป็น activity ของวิตามินเอ

แคโรทีนอยด์	Activity (%)
all-*trans*-β-carotene	100
9-*cis*-β-carotene	38
13-*cis*-β-carotene	53
all-*trans*-α-carotene	53
9-cid-α-carotene	13
13-*cis*-α-carotene	16
all-*trans*-cryptoxanthin	57
9-*cis*-cryptoxanthin	27
15-*cis*-cryptoxanthin	42
β-carotene 5,6-epoxide	21
β-carotene 5,8-epoxide	80
γ-carotene	42-50
β-zeacarotene	20-40

(ที่มา : Crawley, 1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

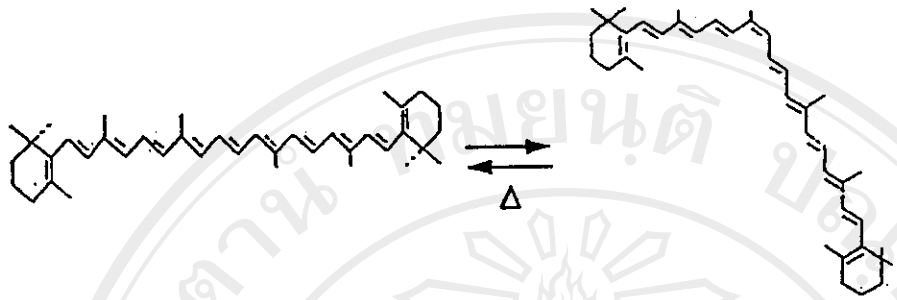
2.8.4 ลดอัตราการเกิดโรค ผลการศึกษาวิจัย พบว่าเบต้า-แคโรทีนมีบทบาทโดยตรงต่อระบบต่างๆ ในร่างกายทั้งคนและสัตว์ เช่น ระบบภูมิคุ้มกัน ระบบสืบพันธุ์ กระบวนการต่อต้านอนุมูลอิสระ ยับยั้งและลดความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งที่อวัยวะต่างๆ ควบคุมการเจริญและเปลี่ยนแปลงของเซลล์ ป้องกันอาการหัวใจวาย และโรคที่เกี่ยวกับหลอดเลือดหัวใจ ซึ่งมีผลส่งเสริมให้สุขภาพร่างกายแข็งแรงมีอายุยืน (นวลศรีและอัญชนา, 2545; Hudson, 1990; Handelman,1996; Madhavi *et al.*, 1996; Bidlack *et al.*, 1998; Wilhelm and Helmut, 1999; Pokorny *et al.*, 2001; Rucker *et al.*, 2001)

2.9 การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์

2.9.1 เกิดจากปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) ปฏิกิริยานี้เกิดจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความร้อน แสง และกรด

ก. ความร้อน แคโรทีนอยด์ที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นรูป *tran* form หากได้รับแสงและมีความร้อนหรือรังสี จะทำให้โครงสร้างเกิดการบิดตัวไป 180 องศา เปลี่ยนเป็นรูป *cis* form (รูปที่ 2.12) ซึ่งรูป *cis* form จะไม่ค่อยเสถียร มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสั้นลง สีที่ปรากฏจะอ่อนกว่า *trans* form และมี vitamin A activity น้อยกว่ารูป *tran* form (นิธิยา, 2545) การเกิด thermal isomerization เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต โดยอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียแคโรทีนอยด์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนจะมีผลต่อการสูญเสียแคโรทีนอยด์มากกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงไม่ควรให้ความร้อนแบบ high temperature short time (HTST) การเก็บรักษาเนื้อมะม่วงสุกแช่เยือกแข็งพันธุ์โชคอนันต์ที่ผ่านการจุ่มในน้ำร้อนอุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส นาน 30 วินาที ก่อนการแช่เยือกแข็ง เมื่อเก็บรักษานาน 6 เดือน สูญเสียแคโรทีนอยด์ทั้งหมด 77.93% ซึ่งมากกว่าเนื้อมะม่วงที่ไม่ผ่านการลวกก่อนการแช่เยือกแข็งที่สูญเสียแคโรทีนอยด์ทั้งหมด 74.90% เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อมะม่วงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง (รุจิภรณ์, 2546) และควรเก็บรักษาตัวอย่างอาหารที่มีสารแคโรทีนอยด์ที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยชะลอการสูญเสียแคโรทีนอยด์ไว้ได้ ตัวอย่างเช่น การเก็บรักษาชิ้นมะเขือเทศที่อุณหภูมิ –30 องศาเซลเซียส สูญเสียเบต้า-แคโรทีนและสารประกอบอื่นๆ น้อยกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ –20 องศาเซลเซียส เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเท่ากัน (Lisiewska and Kmiecik, 2000)

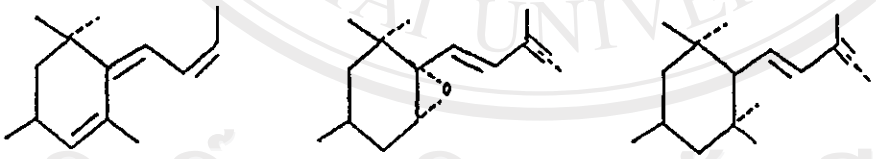
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



Trans-beta-carotene 13-*cis*-beta-carotene

รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างโมเลกุลของเบต้า-แคโรทีนเนื่องจากความร้อน
(ที่มา : Goodwin, 1980)

ข. ความเป็นกรด ในสภาพเป็นกรดทำให้เบต้า-แคโรทีน เปลี่ยนเป็น epoxide isomer ซึ่งเกิดจากการจับตัวของออกซิเจนที่พันธะคู่ของวงแหวนในโครงสร้าง เกิดเป็น 5,6-epoxide ซึ่งมีสีจางกว่าเบต้า-แคโรทีน (รูปที่ 2.13) และสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ส่วนมากจะคงตัวในสภาพด่าง (Goodwin, 1980; Rodriguez-Amaya, 2003)



β-carotene 5,6-epoxide 5,8-epoxide

รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาการเกิด Epoxide isomerism
(ที่มา : Goodwin, 1980)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.9.2 เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ก. ออกซิเจน เมื่อแคโรทีนอยด์สัมผัสกับอากาศ ตำแหน่งพันธะคู่ในโครงสร้างของโมเลกุลจะไปจับกับออกซิเจนเกิดเป็นสีน้ำตาลของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) สารประกอบคาร์บอนิลและสารระเหยอื่นๆ ปฏิกิริยานี้เป็น direct oxidation อัตราการสูญเสียแคโรทีนอยด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ไม่ได้ขึ้นกับออกซิเจนเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มของแสง และความร้อนเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วย (Crawley, 1993) การเก็บรักษาสารแคโรทีนอยด์ในภาวะที่มีออกซิเจนเบต้า-แคโรทีนจะสูญเสียเป็นอันดับแรก แคนตาแซนทินไวต่อการเกิดออกซิเดชันน้อยสุด และ apo-carotenal มีอัตราการสูญเสียเร็วที่สุด แต่ bixin ที่สกัดได้จาก annatto มีความเสถียรมากเมื่อเก็บรักษาไว้ในภาวะที่มีอากาศ

การป้องกันการออกซิเดชันจากออกซิเจน สามารถกระทำได้โดยการเติมสารต้านออกซิเดชัน เช่น กรดแอสคอร์บิก และบิวทิวเลทไฮดรอกซีเทอลูอีน (butylated hydroxytoluene; BHT) เป็นต้น (นิธิยา, 2545) หรือไม่ให้อาหารสัมผัสกับอากาศขณะเก็บรักษา เช่น ใช้น้ำมันเคลือบผิวหรือบรรจุก๊าซเฉื่อยในภาชนะบรรจุ หรือบรรจุแบบสุญญากาศ (Bauernfeind, 1981)

ข. กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เนื่องจากกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ และทำให้แคโรทีนอยด์เกิดออกซิเดชันไปด้วย เรียกว่า co-oxidation เป็นปฏิกิริยาแบบ indirect oxidation สามารถป้องกันได้โดยใช้กรดไขมันชนิดอิ่มตัวในการผสมกับแคโรทีนอยด์

ค. การปนเปื้อนของโลหะ อิออนของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้แคโรทีนอยด์เสื่อมสภาพ และถ้ามีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวรวมอยู่ด้วย การเสื่อมสลายจะยิ่งเร็วขึ้น ตัวอย่างเช่น โลหะทองแดงจะเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไลโคพีนให้เร็วขึ้น 3.5 เท่า เนื่องจากอิออนของทองแดงจะไปเร่งให้เกิดอนุมูลอิสระได้เร็วขึ้น

ง. แสงสว่าง ปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากแสงสว่าง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี กลิ่น และรสชาติ การเกิดออกซิเดชันจากแสงสว่างจะรุนแรงมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนในอากาศด้วย (Crawley, 1993)

จ. เอนไซม์ การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากแคโรทีนอยด์ที่อยู่ภายในเซลล์ในรูปของ pigment-protein complex ซึ่งมีความเสถียรมาก ดังนั้นต้องมีสารที่สามารถมาทำลายโครงสร้างนี้ได้ คือ เอนไซม์ เมื่อแคโรทีนอยด์อยู่ในรูปอิสระ ก็จะเกิดการเสื่อมสลายได้ง่าย เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการสูญเสียแคโรทีนอยด์ มีดังนี้

a. เปอร์ออกซิเดส (Peroxidase : POD) เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารแคโรทีนอยด์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังสมการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Carotenoid ——A——→ 5,6-Epoxide ——B——→ 5,8-Epoxide

A = peroxidase B = plant acid

การเสื่อมสลายทางอ้อม คือ การเกิดออกซิเดชันของไขมัน ซึ่งมีผลกระทบทำให้แคโรทีนอยด์เกิดออกซิเดชันตามไปด้วย

การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเอนไซม์ในกลุ่มเปอร์ออกซิเดส ทำให้มีการวิจัยเพื่อหาวิธีการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์นี้ จะช่วยป้องกันการสลายตัวของแคโรทีนอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหาร ตัวอย่างเช่น การเก็บรักษา chive โดยไม่ลวกก่อนนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 และ -30 องศาเซลเซียส สามารถคงคุณภาพไว้ได้นาน 3 และ 6 เดือน ตามลำดับ หากนำ chive ไปลวกที่อุณหภูมิ 94-96 องศาเซลเซียส นาน 90 วินาที ก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส สามารถป้องกันการสูญเสียวิตามินซี เบต้า-แคโรทีน และคลอโรฟิลล์ได้นาน 12 เดือน และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส สามารถรักษาวิตามินซีได้ดีมาก (Kmiecik and Lisiewska, 1999) การเก็บรักษา Hamburg parsley และ leafy parsley โดยการลวกที่อุณหภูมิ 96-98 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที ก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณเบต้า-แคโรทีนใน Hamburg parsley และ leafy parsley สูญเสียเบต้า-แคโรทีนเพียงเล็กน้อยภายหลังเก็บรักษานาน 9 เดือน เมื่อเปรียบเทียบกับ parsley ที่ไม่ได้ผ่านการลวกก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง (Lisiewska and Kmiecik, 1997)

b. ไลปอกซิเดส (Lipoxidase) เอนไซม์นี้จะเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันมีผลทำให้เกิดอนุมูลอิสระและอนุมูลอิสระของไขมันนี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแคโรทีนอยด์ (ปราณี, 2543)

c. ไลโปเปอร์ออกซิเดส (Lipoperoxidase) เอนไซม์นี้จะเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของแคโรทีนอยด์เมื่อมีเปอร์ออกไซด์ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวรวมอยู่ด้วย ซึ่งเกิดจากเอนไซม์ไลปอกซิเดส หรือเกิดจากการออกซิเดชันโดยอาศัยเอนไซม์

ฉ. *น้ำ* เป็นส่วนประกอบที่ช่วยให้เอนไซม์ทำงานได้ดี หากตัวอย่างถูกกำจัดปริมาณน้ำออกไปจะทำให้เอนไซม์ทำงานได้ลดน้อยลง เนื่องจากสารตั้งต้นสามารถเคลื่อนที่ได้น้อยและไม่สามารถแพร่ไปยังตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ แต่การที่ไม่มีน้ำอยู่ในตัวอย่างเลยจะทำให้ผิวนอกของตัวอย่างมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศได้มากขึ้น (วิไล, 2543; Bauernfeind, 1981)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.10 การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์

การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ที่เป็นส่วนประกอบทางเคมีในอาหาร วิธีที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่ คือ การสกัดสารในกลุ่มของแคโรทีนอยด์ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งอาจเป็นชนิดเดียวหรือเป็นตัวทำละลายผสม 2 ชนิดที่มีขั้ว (polar) มาก-น้อยแตกต่างกัน

หลักการพื้นฐานของวิธีโครมาโทกราฟี คือการให้สารที่ต้องการแยกอยู่ในรูปของสารละลาย โดยนำตัวอย่างมาผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลาย จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปผ่านสารดูดซับ (stationary phase) ซึ่งสารดูดซับจะอยู่ในรูปใดขึ้นกับชนิดของสารดูดซับ และวิธีโครมาโทกราฟีที่ใช้ สารละลายตัวอย่างจะเคลื่อนที่ผ่านสารดูดซับโดยมีตัวทำละลายพาเคลื่อนที่ไป (mobile phase) สารที่เป็นส่วนประกอบในสารละลายตัวอย่างชนิดใดที่ติดอยู่กับสารดูดซับได้ดีจะเคลื่อนที่ไปบนสารดูดซับได้ช้ากว่าสารที่ติดอยู่กับสารดูดซับได้ไม่ดี ดังนั้นสารประกอบที่ละลายอยู่ในสารละลายตัวอย่างจะแยกออกจากกันได้ ตามความสามารถในการจับอยู่กับสารดูดซับ โดยวิธีโครมาโทกราฟีสามารถแบ่งออกได้หลายแบบ ได้แก่ (แม้นและอมร, 2534; Gross, 1987; Ball, 1992; Reinhard, 1996; Rodriguez-Amaya, 2003)

คอลัมน์โครมาโทกราฟี (Open Column Chromatography) เป็นการบรรจุสารที่สามารถแยกสารในกลุ่มของแคโรทีนอยด์ที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายมาแล้ว ตัวอย่างของสารดูดซับที่ใช้ในการบรรจุในคอลัมน์ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และ MgO-HyfloSupercel (Bauernfeind, 1981; Rodriguez-Amaya, 2003) ซึ่งการวิเคราะห์สารกลุ่มแคโรทีนอยด์ด้วยวิธีนี้จะแยกได้เพียงกลุ่มใหญ่ของแคโรทีนอยด์ คือ แคโรทีนและแซนโทฟิลล์ แต่วิธีนี้ก็เป็นวิธีที่ยอมรับในการวิเคราะห์ตามวิธีของ AOAC (2000) (Buckle and Rahman, 1979; Hart and Scott, 1995)

โครมาโทกราฟีแบบผิวบาง (Thin Layer Chromatography, TLC) เป็นการนำสารดูดซับที่ใช้ในการแยกไปเคลือบบนแผ่นกระจก แล้วให้สารละลายตัวอย่างที่สกัดมาวิ่งไปบนแผ่นเคลือบ วิธีนี้สามารถจำแนกสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ได้ถึงไอโซเมอร์ของมันว่าเป็นชนิด α, β และ γ แต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่าอยู่ในรูปของ *trans* form หรือ *cis* form (Baloch *et al.*, 1977)

โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High-Performance Liquid Chromatography, HPLC) ใช้หลักการในการแยกเหมือนกับ open column chromatography แต่วิธีนี้จะสามารถจำแนกชนิดของสารแคโรทีนอยด์ได้ละเอียดมากถึงระดับที่สามารถแยกรูป *cis* และ *trans* form ได้ (Mercadante *et al.*,1997) นอกจากนี้เป็นวิธีที่ใช้สารตัวอย่างน้อย (1 กรัมหรือน้อยกว่า) ใช้เวลาใน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การแยกน้อย (Hsieh and Karel, 1983) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากในการแยกสารเชิงปริมาณให้มีความถูกต้อง (Schoefs, 2002)

ก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) วิธีนี้ใช้อุณหภูมิสูงในการแยกสาร จึงไม่นำมาใช้การแยกสารแคโรทีนอยด์ เนื่องจากสารแคโรทีนอยด์ที่แยกด้วยวิธีนี้จะไม่เสถียร

วิธีการแยกทั้ง 3 วิธีแรกจะต้องนำสารที่แยกได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสง เพื่อวิเคราะห์ว่าสารที่แยกออกมาได้เป็นแคโรทีนอยด์ชนิดใด และมีปริมาณเท่าใด โดยใช้สมบัติที่ว่าสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์แต่ละชนิดจะสามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดแตกต่างกัน และตัวทำลายต่างชนิดกันก็จะทำให้สารชนิดเดียวกันดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดได้แตกต่างกันด้วย (ตารางที่ 2.7)

ตารางที่ 2.7 ค่าความยาวคลื่นที่มีการดูดแสงสูงสุด (λmax ; nm) ของสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ในตัวทำละลายต่างชนิดกัน

แคโรทีนอยด์	λmax (nm)	ตัวทำละลาย
เบต้า-แคโรทีน (β-carotene)	450	ปิโตรเลียมอีเทอร์
	450	เอทานอล
	452	อะซีโตน
	450	เฮกเซน
แอลฟา-แคโรทีน (α-carotene)	462	ปิโตรเลียมอีเทอร์
	460	เอทานอล
	461	อะซีโตน
	462	เฮกเซน
ไลโคพีน (lycopene)	470	ปิโตรเลียมอีเทอร์
	472	เอทานอล
	474	อะซีโตน
	472	เฮกเซน

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Bauernfeind, 1981; Ball, 1992; Britton, 1996; Rodriguez-Amaya, 2003)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.11 การแช่เยือกแข็งผลไม้

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้ และยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมี และเสื่อมสภาพของผักและผลไม้อย่างรวดเร็วเมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิไม่เหมาะสม (คนัยและนิธิยา, 2533; จริงแท้, 2542) การเก็บรักษาผักและผลไม้โดยวิธีการแช่เยือกแข็ง เป็นวิธีการเก็บรักษาอาหารที่เหมาะสมสามารถเก็บรักษาได้เป็นเดือนหรือเป็นปี (Verma and Joshi, 2000b) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของอาหารนั้น การเก็บรักษาอาหารแบบแช่เยือกแข็งเป็นวิธีที่นิยมกันมากในประเทศสหรัฐอเมริกา เช่น การเก็บรักษาผลสตรอเบอรีแช่เยือกแข็งได้นานถึง 12 เดือน และการเก็บรักษาน้ำมะม่วงเข้มข้นที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส สามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์ได้ (Salunkhe and Desai, 1984)

การแช่เยือกแข็ง หมายถึง การทำให้อาหารมีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (freezing point) ส่วนใหญ่นิยมแช่เยือกแข็งจนอาหารมีอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า เนื่องจากผักและผลไม้สดภายหลังการเก็บเกี่ยวเซลล์ยังคงมีชีวิตอยู่ จึงมีการหายใจเกิดขึ้นตลอดเวลาและมีความร้อนส่วนหนึ่งคายออกมา การแช่เยือกแข็งจะหยุดการหายใจและเมแทบอลิสม์ภายในเซลล์ได้

จุดเยือกแข็งของอาหาร คือ อุณหภูมิที่มีผลึกน้ำแข็งเล็กๆ เกิดขึ้นสมดุลกับน้ำที่อยู่รอบๆ ก่อนเกิดผลึกน้ำแข็งจะต้องมีนิวเคลียสของโมเลกุลน้ำเสียก่อน หลังจากนั้นจะเกิด nucleation ทำให้เกิดการสร้างผลึกน้ำแข็งขึ้น nucleation มี 2 ชนิด คือ homogeneous nucleation และ heterogeneous nucleation ในอาหารส่วนใหญ่มักจะเกิดเป็น heterogeneous nucleation มากกว่า โดยเฉพาะระหว่างการทำ supercooling ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นด้วยอัตราที่สูง จะทำให้เกิด nuclei จำนวนมาก ดังนั้นการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก และอัตราการโตของก้อนผลึกน้ำแข็งจะถูกควบคุมได้ด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อน โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผลึกน้ำแข็งที่กำลังโตขึ้น ขณะเดียวกันความเข้มข้นของตัวถูกละลายก็จะเพิ่มขึ้นระหว่างการแช่เยือกแข็ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพีเอช และความหนืดของของเหลวส่วนที่ยังไม่แข็งตัวขณะที่อุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ ตัวถูกละลายแต่ละชนิดอาจถึงจุดอิ่มตัว และบางชนิดก็อาจตกผลึกได้ อุณหภูมิที่เกิดผลึกของตัวถูกละลายแต่ละชนิดจะสมดุลกับของเหลวส่วนที่ไม่แข็งตัวและส่วนที่เป็นน้ำแข็ง เรียกว่า eutectic temperature ตัวอย่างเช่น ตัวถูกละลายที่เป็นน้ำตาลกลูโคสจะมี eutectic temperature เป็น –5 องศาเซลเซียส น้ำตาลซูโครสเป็น –14 องศาเซลเซียส โซเดียมคลอไรด์เป็น –21.13 องศาเซลเซียส และแคลเซียมคลอไรด์เป็น –55 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามในอาหารแต่ละชนิดจะมีตัวถูกละลายผสมของสารหลายชนิด ทำให้หาค่า eutectic temperature ที่แน่นอนได้ยาก (นิธิยา, 2544)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ระหว่างการแช่เยือกแข็ง ความร้อนจะถูกพาจากภายในออกสู่ผิวนอกของชิ้นอาหารและถูกกำจัดออกไปด้วย freezing medium ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อน ได้แก่

- ความสามารถในการนำความร้อนของอาหาร
- บริเวณพื้นที่ผิวของอาหารที่ถ่ายเทความร้อนได้
- ระยะทางที่ความร้อนเดินทางออกมาจากอาหาร
- ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอาหารกับ freezing medium
- ความเป็นฉนวน (insulating effect) ของ boundary film ของอากาศรอบๆ อาหาร หากอาหารบรรจุอยู่ในภาชนะจะทำให้มีตัวขวางกั้นการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น (นิธิยา, 2544)

2.12 ขั้นตอนการเตรียมผลไม้ก่อนแช่เยือกแข็ง

2.12.1 การคัดวัตถุดิบ (sorting/inspection) วัตถุดิบที่จะนำมาใช้จะต้องเลือกให้มีคุณภาพเหมาะสม เช่น เลือกวัตถุดิบที่มีคุณภาพดีไม่มีตำหนิหรือเน่าเสีย ขนาด และระยะการสุกเท่าๆ กันจึงนำไปใช้แช่เยือกแข็ง

2.12.2 การล้างทำความสะอาด (cleaning/washing) เป็นการกำจัดเอาสิ่งสกปรกที่ผิวของวัตถุดิบออก และยังช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ผิวนอกให้น้อยลงได้อีกด้วย

2.12.3 ปอกเปลือก (peeling) เป็นการแยกเอาส่วนเปลือกหรือส่วนที่บริโภคไม่ได้ออกไป นอกจากนี้การปอกเปลือกออกยังช่วยทำให้อัตราการแช่เยือกแข็งเร็วขึ้น เนื่องจากการปอกเปลือกหรือเอาส่วนที่บริโภคไม่ได้ออกไปจะช่วยลดความต้านทานของอัตราการแช่เยือกแข็ง

2.12.4 การลดขนาด (cutting/shredding) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดเหมาะสมก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง หรือก่อนที่จะผ่านไปขั้นตอนอื่นๆ

การลวก (blanching) เป็นการใช้ความร้อนเพื่อช่วยกำจัดเอนไซม์ในผลไม้ ซึ่งมีผลต่อการเสื่อมเสียของผลไม้ให้ลดน้อยลงได้ ป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในเนื้อผลไม้ ช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ ช่วยให้สีมีความคงตัว และลดการเกิดการหดตัวที่ผิวนอกของชิ้นผลิตภัณฑ์ภายหลังจากการแช่เยือกแข็งของผลไม้

การลวกผลไม้ในน้ำร้อนอาจนำมาใช้ในการปอกเปลือกผลไม้บางชนิดได้ เช่น การปอกเปลือกของผลแอพริค็อท แต่ไม่นิยมทำการลวกเนื่องจากการลวกใช้กับผลไม้บางชนิดไม่ได้ เพราะจะทำให้ผลไม้บางชนิดมีกลิ่นผิดปกติและลักษณะเนื้อสัมผัสนิ่มลง (นิธิยา, 2545) การยับยั้งการเสื่อมเสียและการเกิดสีน้ำตาลในเนื้อผลไม้ส่วนใหญ่มักนิยมใช้สารเคมีเป็นตัวยับยั้ง ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก กรดซิตริก และกรดอะซีติก เป็นต้น หรือการใช้สารเคมีตั้งแต่ 2 ชนิดผสมกัน (นิธิยา, 2544)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.13 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีระหว่างการเก็บรักษาผลไม้แช่เยือกแข็ง

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

สี เกิดจากการสลายตัวของสารสีที่เป็นส่วนประกอบของผลไม้ และเกิดสีน้ำตาลขึ้นที่เนื้อผลไม้ เนื่องมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่าพีเอช) ของผลไม้ขณะแช่เยือกแข็งและระหว่างการเก็บรักษา การทำงานของเอนไซม์ในเนื้อผลไม้ และปฏิกิริยาออกซิเดชันขณะเก็บรักษา (วิไล, 2543; นิธิยา, 2544) การเก็บรักษาเนื้อมะม่วงสุกแช่เยือกแข็งพันธุ์โชคอนันต์ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 6 เดือน เนื้อมะม่วงสุกมีสีเหลืองลดลงตามระยะเวลาเก็บรักษาที่นานขึ้น (รุจิภรณ์, 2546)

เนื้อสัมผัส การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็งจะเกิดขึ้นระหว่างการแช่เยือกแข็งและระหว่างการเก็บรักษา เช่นระหว่างการแช่เยือกแข็งเซลล์ของเนื้อผลไม้จะแตกออก เนื่องจากน้ำภายในเซลล์กลายสภาพเป็นผลึกน้ำแข็ง ซึ่งผลึกน้ำแข็งนี้จะมีขนาดใหญ่ หรือเล็กขึ้นอยู่กับอัตราการแช่เยือกแข็งของผลไม้ที่เกิดขึ้น หากอัตราการแช่เยือกแข็งช้า (slow freezing) ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ และจะไปทำลายผนังเซลล์ของเนื้อผลไม้ให้เสียหายมาก หากอัตราการแช่เยือกแข็งเร็ว (quick freezing) ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก เซลล์เนื้อผลไม้จะเสียหายน้อย (รูปที่ 2.14) ซึ่งอัตราการแช่เยือกแข็งที่เกิดขึ้นจะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนของชิ้นผลไม้ โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาจากวิธีการที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง ชนิดและขนาดของผลไม้ และขั้นตอน pre-freezing treatment การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็งระหว่างการเก็บรักษานั้น เนื่องจากเกิด recrystallization คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงของจำนวน ขนาด รูปร่าง และ/หรือการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งขึ้นใหม่ ภายหลังจากน้ำในผลิตภัณฑ์แข็งตัวสมบูรณ์แล้ว ทำให้เผลิตภัณฑ์มีผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่เกิดขึ้น ส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ (วิไล, 2543; นิธิยา, 2544)

การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เกิดขึ้นที่ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็ง ระหว่างการแช่เยือกแข็ง และระหว่างการเก็บรักษา ในขั้นตอนการเตรียมผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง สารอาหารประเภทวิตามินและส่วนประกอบทางเคมีที่ละลายได้ในน้ำ จะสูญเสียไปในขั้นตอนการล้าง และ/หรือการยับยั้งเอนไซม์ ในขั้นตอนระหว่างการแช่เยือกแข็ง น้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายของส่วนประกอบทางเคมีในเนื้อผลไม้จะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำแข็ง ทำให้ส่วนประกอบทางเคมีเกิดการตกตะกอนหรือเสียสภาพไป และระหว่างการเก็บรักษาจะมีการสูญเสีย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ส่วนประกอบทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากในเนื้อผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเกิดขึ้น ทำให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบทางเคมีภายในเนื้อผลไม้ได้ง่าย และเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ภายในเนื้อผลไม้ ถึงแม้ว่าจะเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิต่ำก็ตาม แต่การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการก็ยังเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะพวกวิตามินซึ่งสูญเสียได้ง่าย ตัวอย่างเช่น ผลไม้ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 12 เดือน สูญเสียเบต้า-แคโรทีนมากสุดถึง 78% และวิตามินซีสูงถึง 50% (นิธิยา, 2544) การเก็บรักษาเนื้อมะม่วงสุกพันธุ์โชคอนันต์แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 6 เดือน สูญเสียปริมาณกรดทั้งหมด ของแข็งที่ละลายน้ำได้ น้ำตาลรีดิวซิง น้ำตาลทั้งหมด แคโรทีนอยด์และแคโรทีนทั้งหมด ทำให้ปริมาณสารประกอบต่างๆ ในเนื้อมะม่วงลดลง (รุจิภรณ์, 2546) การเก็บรักษามะเขือเทศที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส สูญเสียเบต้า-แคโรทีนและส่วนประกอบทางเคมีอื่นๆ ภายในเนื้อมะเขือเทศน้อยกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเท่ากัน ดังนั้นควรเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำๆ เพื่อให้มีการสูญเสียส่วนประกอบทางเคมีให้น้อยที่สุด (Lisiewska and Kmiecik, 2000)

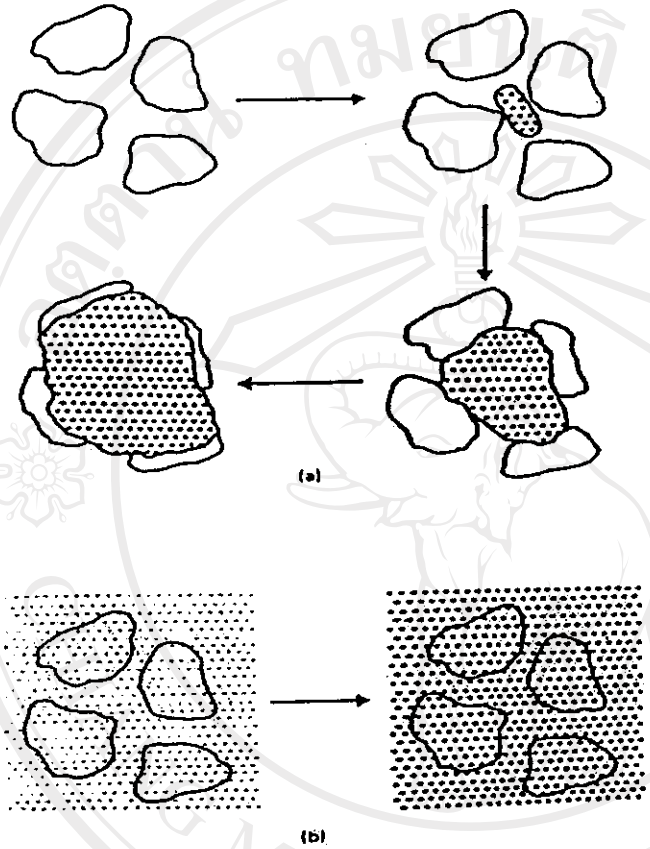
การสลายตัวของสารสีและการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อผลไม้ ในระหว่างการแช่เยือกแข็งส่วนประกอบทางเคมีจะมีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในผลไม้เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และส่งผลต่อสารสี ตัวอย่างเช่น สารสีแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนเป็นสีแดงในสภาพเป็นกรด และเป็นสีน้ำเงินในสภาพเป็นด่าง และระหว่างการเก็บรักษาสารสีคลอโรฟีลล์และแคโรทีนอยด์จะเกิดการสลายตัวขึ้น อาจเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และ/หรือถูกเอนไซม์ในผลไม้ทำลาย และการเกิดสีน้ำตาลทั้งก่อนการแช่เยือกแข็ง และระหว่างการเก็บรักษาผลไม้แช่เยือกแข็ง เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอล และจากการทำงานของเอนไซม์ ได้แก่ โพลีฟีนอลออกซิเดส และเปอร์ออกซิเดส (Skrede, 1996)

การเปลี่ยนแปลงของกลิ่นและรสชาติ เนื่องจากส่วนประกอบทางเคมีของผลไม้มีการเปลี่ยนแปลงไป ย่อมส่งผลกระทบต่อกลิ่นและรสชาติของผลไม้ให้เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยเฉพาะกลิ่นของผลไม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้ (Skrede, 1996)

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของผลไม้แช่เยือกแข็งที่เป็นปัญหา คือ การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เช่นการสูญเสียวิตามินในเนื้อผลไม้ และการเปลี่ยนแปลงของสารสี ทำให้สีของผลไม้ที่ปรากฏเปลี่ยนไป และการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อผลไม้ ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงนี้ 2 ชนิด คือ โพลีฟีนอลออกซิเดส และเปอร์ออกซิเดส ซึ่งหากยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทั้งสองชนิดนี้ได้ จะช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ดังนั้นการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจะช่วยป้องกันการสูญเสียแคโรทีนอยด์ในผลไม้ได้ (Lisiewska and Kmiecik, 1997; 2000)



(a) การแช่เยือกแข็งแบบช้า
(b) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

รูปที่ 2.14 ลักษณะของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งแตกต่างกัน (ที่มา : Fellow, 2000)

2.14 เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสและเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

เมื่อปอกผลไม้หรือหั่นผักวางทิ้งไว้จะเกิดสีน้ำตาลบริเวณเนื้อเยื่อที่ปอกหรือรอยตัด ซึ่งลักษณะที่ปรากฏไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค บางครั้งทำให้เกิดรสชาติไม่ดี สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ และไม่ชวนบริโภค ซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา ปฏิกิริยาการเกิด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สีน้ำตาลเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ซับซ้อนและให้สารสีน้ำตาลที่ผันแปรไปตามชนิดของอาหาร (Whitaker, 1994)

เอนไซม์เปอร์ออกซิเดส (peroxidase; POD) (EC 1.11.1.7) เป็นเอนไซม์ที่อยู่ในกลุ่มของเอนไซม์ออกซิโดรีดักเตส (oxidoreductase) เป็นเอนไซม์ที่มีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของโมเลกุล สามารถออกซิไดส์สารประกอบฟีนอล ในสภาพที่มีไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์ (H_2O_2) เมื่อผลไม้สุกกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกิจกรรมของเอนไซม์อื่นๆ เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสสามารถเป็นตัวชี้บ่งการสุกและการเสื่อมสภาพ (senescence) ของผลไม้ได้ เช่น ในผลมะม่วง พันธุ์ Alphoso Banganapall Dasheri Fazli Langra Suvarnarekha และ Totapuri (Selvaraj *et al.*, 1989) นอกจากนี้ยังพบว่าเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสมีความสัมพันธ์กับรสชาติและกลิ่นที่ผิดปรกติในผักและผลไม้ (Robinson, 2000) และค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทำงานอยู่ในช่วง 5.5-7.5 (Lamikanra and Watson, 2001)

ลักษณะปฏิกิริยาของเปอร์ออกซิเดส (Whitaker, 1994)

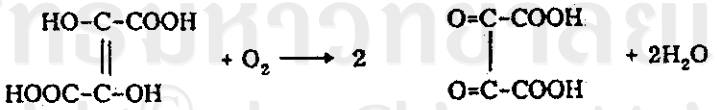
เอนไซม์เปอร์ออกซิเดส เร่งปฏิกิริยา 4 ลักษณะ ตามชนิดของสารเริ่มต้น ดังนี้

1. Peroxidatic reaction

$$H_2O_2 + 2AH_2 \longrightarrow 2H_2O + HAAH \text{ (polymerised product)}$$

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาหลักของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสใน *in vitro* ที่มีสารเริ่มต้นเป็นสารประกอบฟีนอล (phenolic substrate) (A) เช่น พารา-ครีซอล (*p*-cresol) กัวอะคอล (guaiacol) รีซอร์ซินอล (resorcinol) และอะนิลีน (aniline) เป็นต้น

2. Oxidatic reaction



ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีโมเลกุลออกซิเจน (O_2) และสารเริ่มต้นเป็นสารประกอบพวก dihydroxyfumaric acid, ascorbic acid และ hydroquinone เป็นต้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3. Catalatic reaction

$$2H_2O_2 \longrightarrow 2H_2O + O_2$$

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นในกรณีที่ขาดสารที่ให้ไฮโดรเจน (hydrogen donor : AH_2) และเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสสามารถทำหน้าที่เหมือนเอนไซม์แคทาเลส โดยเปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไปเป็นน้ำ (H_2O) และออกซิเจน แต่ปฏิกิริยาที่ได้จะช้ากว่าปฏิกิริยา peroxidatic และ oxidatic

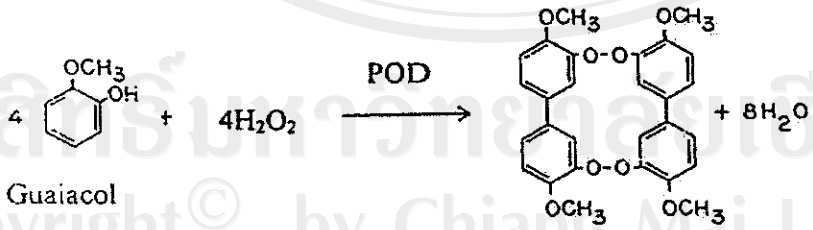
4. Hydroxylation

p-Cresol 4-Methylcatechol

กรณีที่ปฏิกิริยามีสารที่ให้ไฮโดรเจนเป็น dihydroxyfumaric acid และโมเลกุลออกซิเจน เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสสามารถเติมหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ให้กับสารที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกหลายชนิด เช่น *p*- cresol, tyrosine, phenylalanine, benzoic acid และ salicylic acid

การวัดกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส

ปฏิกิริยาหลักของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส คือ Peroxidatic reaction ดังนั้นในการวัดกิจกรรมจะยึดตามปฏิกิริยาหลัก ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาการออกซิไดส์สารกัวอะคอล ซึ่งเป็นตัวให้ไฮโดรเจน ในขณะที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อสารทำปฏิกิริยากับเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจะได้ผลิตภัณฑ์ คือ tetraguaiacol ซึ่งมีสีน้ำตาล แสดงดังรูปที่ 2.15 (Whitaker, 1994)



Guaiacol Tetraguaiacol

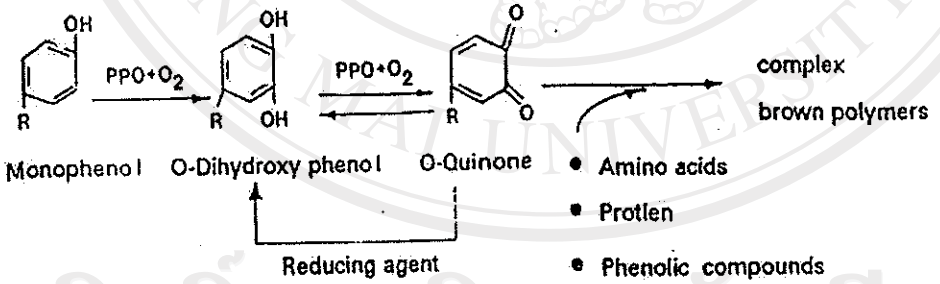
รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยา peroxidatic reaction ซึ่งเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในสภาพที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

(ที่มา : Whitaker, 1994)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenoloxidase; PPO) (EC 1.10.3.1) เอนไซม์นี้มีชื่อเรียกตามระบบ คือ *o*-diphenol oxygen oxidoreductase และอาจมีชื่อต่างๆกัน เช่น ไทโรซิเนส (tyrosinase) โพลีฟีนอลเลส (polyphenolase) แคทีคอล ออกซิเดส (catechol oxidase) ครีโซเลส (cresolase) และแคทีคอลเลส (catecholase) เป็นต้น ชื่อเหล่านี้จะเรียกตามสารเริ่มต้นที่มีความจำเพาะต่างกันออกไป (ปราณี, 2543; Whitaker, 1995)

เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อผลไม้ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอล โดยมีโนฟีนอลเป็นสารเริ่มต้นจะเกิดปฏิกิริยาการเติมหมู่ไฮดรอกซิล หรือ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation) ในภาวะที่มีออกซิเจน ได้เป็นสาร*ออโท*-ไดฟีนอล (*o*-diphenol) และจะถูกออกซิไดส์ต่อได้เป็นสาร*ออโท*-ควิโนน (*o*-quinone) จากนั้นสาร*ออโท*-ควิโนนจะรวมตัวกันและเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลอื่นๆ กรดอะมิโนและสารอื่นๆ โดยอาศัยกระบวนการโพลีเมอไรเซชัน (polymerization) ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล (นิธิยา, 2545; Mayer and Harel, 1991) แสดงดังรูปที่ 2.16 ส่วนสารประกอบฟีนอลที่ถูกออกซิไดส์โดยเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส ได้แก่ แคเทชิน (catechins) เอสเทอร์ของกรดซินนามิก(cinnamic acid esters) 3,4-ไฮดรอกซีฟีนิลอะลานีน (3,4-hydroxyphenylalanine; DOPA) และไทโรซีน (tyrosine) ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอนไซม์อยู่ในช่วง 5-7 เอนไซม์นี้ไม่ค่อยคงตัว ถูกทำลายได้ด้วยความร้อน ถูกยับยั้งได้ด้วยกรดแฮไลท์ (halides) สารจับโลหะ (chelating agents) และสารรีดิวซิง (reducing agents) เช่น กรดแอสคอร์บิก (นิธิยา, 2545; Whitaker, 1995) เป็นต้น



รูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลซึ่งเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส
(ที่มา : Whitaker, 1995)

2.15 วิธีการป้องกันการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกิจกรรมของเอนไซม์

วิธีการที่ใช้ยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในเนื้อเยื่อพืช คือ การลดค่าพีเอชให้ต่ำกว่า 4.5 (Whitaker, 1994; 1995) ทำได้โดยการใช้สารละลายกรด เช่น ใช้สารละลายกรดซิตริกร่วมกับกรด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แอสคอร์บิก ซึ่งกรดซิตริกยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส เนื่องจากมีสมบัติเป็นสารจับโลหะ และเมื่อใช้กรดซิตริก กรดมาลิก ในน้ำแอปเปิล พบว่ามีประสิทธิภาพยับยั้งเอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลได้ (Verma and Joshi, 2000a) นอกจากนี้การเก็บรักษาผักและผลไม้ในสภาพที่มีออกซิเจนน้อยสามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ (จริงแท้, 2542)

วิธีการป้องกันการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกิจกรรมของเอนไซม์ ทำได้โดยการใช้สารเคมีหลายชนิดที่มีรายงานว่าสามารถช่วยยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ได้ ตัวอย่างเช่น กรดแอสคอร์บิก นอกจากจะช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้แล้ว กรดแอสคอร์บิกยังเป็นสารต้านออกซิเดชันได้อีกด้วย ช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลของผลไม้และกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ (Wiley, 1994) การใช้สารละลายกรดแอสคอร์บิกความเข้มข้น 0.8-1.6% แช่เนื้อแอปเปิล นาน 90 วินาที ช่วยชะลอการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อแอปเปิลให้ช้าลงได้ (Saper and Ziolkowski, 1987) และการใช้สารละลายกรดแอสคอร์บิกความเข้มข้น 1.25 และ 2.5 มิลลิโมลาร์ (mM) แช่เนื้อแคนตาลูป นาน 1 นาที สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้ 60% ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 15 วัน และพบว่า ยิ่งเก็บรักษาไว้นานขึ้น กิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสยิ่งลดลง (Lamikanra and Watson, 2001) นอกจากนี้ยังพบว่าการแช่เนื้อฝรั่งในสารละลายกรดแอสคอร์บิกที่ความเข้มข้นสูงขึ้น และใช้เวลาในการแช่นานจะช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อฝรั่งและลดกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ (บัวหลวง, 2545)

เนื่องจากกรดแอสคอร์บิกมีราคาแพง จึงมีการใช้กรดชนิดอื่นทดแทน เช่น กรดซิตริกเป็นกรดที่พบได้ในผลไม้ทั่วไปอยู่แล้ว สามารถจับกับโลหะอิออนได้หลายชนิด เช่น จับกับโลหะทองแดง ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส มีผลให้เอนไซม์ทำงานได้ช้าลง ทำให้ลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ (ศิวาพร, 2535) เช่น การแช่ท้อพันธุ์ Elberta ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 1.0% นาน 1 นาทีพบว่ายับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ 30% เมื่อแช่ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 3.0% นาน 1 นาที สามารถยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ 39% เมื่อแช่ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 3.0% นาน 2 นาที สามารถยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ 42% (Vamos-Vigyazo, 1995) และเมื่อแช่เนื้อมะม่วงสุกพันธุ์โชคอนันต์ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 1.0% นาน 90 วินาที พบว่าลดกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสให้เหลืออยู่ 57.6% โดยกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสลดลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการแช่เนื้อมะม่วงในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.5 % นาน 90 วินาที (รุจิภรณ์, 2546) การใช้สารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 0.3% เก็บรักษาที่อุณหภูมิ –18

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

องศาเซลเซียส ป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของชิ้นมะม่วงพันธุ์ Langra ได้ (Skrede, 1996) การใช้สารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 10% ป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของผักกาดหอมหั่นชิ้น (Castaner *et al.*, 1996) และเมื่อใช้สารละลายกรดซิตริกที่มีความเข้มข้นมากขึ้น และใช้เวลาในการแช่มากขึ้น สามารถยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้มากขึ้น แต่จะมีผลทำให้กลิ่นและรสชาติเปลี่ยนไป จนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบชิม (Vamos-Vigyazo, 1995) และการใช้สารละลายผสมกรดซิตริกความเข้มข้น 1.0% หรือ 2.5% กับสารละลายกรดแอสคอร์บิกความเข้มข้น 0.25% สามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในผลมะเฟืองฝานชิ้นได้ดีกว่าการใช้สารละลายชนิดเดียว แสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลายผสมมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเอนไซม์ได้ดี (Weller *et al.*, 1997)

สารอื่นๆ เช่น การใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เพื่อช่วยให้เนื้อสัมผัสของผักและผลไม้ดีขึ้น ชะลอการสูญเสียเนื้อสัมผัสที่ดีของผลไม้ และยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ส่วนใหญ่นิยมใช้ที่ความเข้มข้น 0.5-2.0% (General Chemical Industrial Products, 2004) โดยใช้กับผลไม้ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งหรือก่อนแช่เย็น เช่น การใช้แคลเซียมคลอไรด์กับแอพริคอตและท้อแช่เยือกแข็ง พบว่าป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ดี (ศิวาพร, 2535) เพราะแคลเซียมคลอไรด์สามารถจับกับโลหะอิออนได้หลายชนิด จึงช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้ การลวกชิ้นมันฝรั่งในสารละลายผสมแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5% และสารละลายกรดแลคติก 1.5% นาน 4 นาที สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ (Severini *et al.*, 2003) การลวกชิ้นแอปเปิลด้วยวิธี HTST ยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ แต่ทำให้เนื้อแอปเปิลนิ่ม เมื่อนำเนื้อแอปเปิลไปแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.6% ระหว่างการลวก พบว่าเนื้อแอปเปิลไม่นิ่มเละ (Valle *et al.*, 1998) การแช่กล้วยสุกในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายแคลเซียม-คลอไรด์จาก 0.18 เป็น 1.4 โมลาร์ ทำให้กิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสลดลง (Burnette, 1977) การแช่ชิ้นมะม่วงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.0% (Salunkhe and Desai, 1984) และการแช่ผลสตรอเบอรีในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.0% ก่อนนำไปแช่-เยือกแข็ง ช่วยรักษาเนื้อสัมผัสที่ดีของชิ้นมะม่วงและผลสตรอเบอรีได้ (Suutarinen *et al.*, 2000; 2002) และเมื่อแช่ชิ้นแคนตาลูปในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.5% นาน 1 นาที ทำให้เนื้อสัมผัสดีขึ้น แต่ทำให้ชิ้นแคนตาลูปมีรสขม ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Luna-Guzman and Barrett, 2000)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การใช้สารโซเดียมคลอไรด์ร่วมกับกรดแอสคอร์บิกยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ 90-100% แต่เมื่อแช่เนื้อแอปเปิลหั่นชิ้นในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพียงอย่างเดียว (0.2-1.0 กรัมต่อลิตร) นาน 5 นาที พบว่าเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Dorantes-Alvarez and Chiralt, 2000) และการใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการแปรรูปแอพริคอต ท้อ และสาลี่แห้ง พบว่าสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ แต่มีข้อจำกัดในการใช้กับอาหารสด และใช้ในปริมาณที่มากเกินไป เนื่องจากอาหารพร้อมบริโภคประกอบด้วยน้ำจำนวนมาก จะทำให้เกิดกรดซัลฟูริค ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคได้ (ศิวาพร, 2535; จันทร์สุดาและนิธิยา, 2538; Mayer and Harel, 1991)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved