

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

มะม่วง

มะม่วงเป็นพืชในสกุล *Mangifera* ที่เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน มีลักษณะเป็นพรรณไม้ที่มีทรงสูง ไม่ผลัดใบ ประกอบด้วยพืชประมาณ 600 ชนิด มะม่วงที่นิยมปลูกกันมากในประเทศไทยคือมะม่วงบ้าน (*Mangifera indica* L.) ซึ่งแบ่งมะม่วงออกได้เป็นอีกหลายสายพันธุ์ ทั้งที่เป็นพันธุ์ดั้งเดิม เช่น น้ำดอกไม้ สามปี และแก้ว เป็นต้น และพันธุ์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ เช่น โชคอนันต์ มหาชนก และเฮเดน เป็นต้น และยังสามารถจำแนกมะม่วงตามสายพันธุ์ออกได้เป็น 2 กลุ่มสายพันธุ์ คือ (วิจิตร, 2533)

- มะม่วงกลุ่มอินเดีย (Indian type) เป็นมะม่วงที่พบในตอนเหนือของประเทศอินเดีย ปากีสถาน สหรัฐอเมริกา และเม็กซิกัน ได้แก่ มะม่วงพันธุ์อัลฟองโซ เออร์วิน และเฮเดน เป็นต้น ซึ่งมะม่วงในกลุ่มนี้จะมีสีสะดุดตามากกว่ากลุ่มอินโดจีน (เช่น มีสีแดง ม่วง และส้ม)

- มะม่วงกลุ่มอินโดจีน (Indochinese type) เป็นมะม่วงที่มีถิ่นปลูกอยู่ในแนวเส้นศูนย์สูตร ได้แก่ ประเทศไทย อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์ ผลมะม่วงมีสีเขียว หรือสีเหลือง

เมื่อจำแนกชนิดของผลมะม่วงออกตามการนำไปใช้ประโยชน์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ (วิจิตร, 2533)

1. มะม่วงบริโภคผลสุก ผลมะม่วงส่วนใหญ่ในช่วงที่ยังไม่สุกเนื้อจะมีรสเปรี้ยว แต่เมื่อผลสุกรสชาติจะหวานหอม และเป็นผลมะม่วงที่มีศักยภาพในการส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ พันธุ์มะม่วงไทยกลุ่มนี้ ได้แก่ น้ำดอกไม้ อกร่อง แก้ว โชคอนันต์ มหาชนก และแรด เป็นต้น นอกจากจะนำมาบริโภคในรูปผลสุกแล้ว ยังมีการนำผลมะม่วงกลุ่มนี้มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อีกด้วย

2. มะม่วงบริโภคผลดิบหรือมะม่วงดิบ เป็นพันธุ์มะม่วงที่พบได้เฉพาะในประเทศไทยเท่านั้น มะม่วงประเภทนี้จึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก อีกทั้งยังไม่เป็นที่นิยมในการบริโภคของชาวต่างชาติด้วย พันธุ์ของมะม่วงกลุ่มนี้ ได้แก่ เขียวเสวย ศาลาษา และฟ้าลั่น เป็นต้น

3. มะม่วงสำหรับแปรรูป มีการนำผลมะม่วงมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิดด้วยกัน เช่น แยมมะม่วง ไวน์มะม่วง น้ำมะม่วง และซอสมะม่วง เป็นต้น ผลมะม่วงที่นิยมนำมาใช้แปรรูปส่วนใหญ่เป็นมะม่วงกลุ่มบริโภคผลสุก เช่น อกร่อง สามปี และแก้ว เป็นต้น

ดัชนีความแก่ของผลมะม่วง

ความแก่ (maturity) ของผลมะม่วง หมายถึง ขั้นตอนของการเจริญเติบโตของผลที่เนื้อเยื่อของผลพัฒนาเต็มที่ เมื่อเก็บเกี่ยวออกจากต้นมาแล้วผลจะสุกได้อย่างปกติ (วิจิตร, 2529) ซึ่งความแก่ของผลไม่มีความสำคัญต่อความเหมาะสมในการเก็บเกี่ยว และมีผลต่อเนื่องไปถึงคุณภาพของผลมะม่วงสุกที่ได้ ระยะเวลาสุกของผลมะม่วงเมื่อนำไปบ่ม และอายุการวางจำหน่าย ตัวอย่างเช่น หากเก็บเกี่ยวผลมะม่วงที่แก่มาก จะทำให้มีอายุการวางจำหน่ายสั้นลง หากเก็บผลมะม่วงที่ยังไม่แก่ก็จะไม่สามารถบ่มให้สุกได้มีคุณภาพดี ดังนั้นจึงมีการใช้วิธีการต่างๆ หลายแบบด้วยกัน เพื่อเป็นดัชนีชี้บ่งถึงระยะความแก่ของผลมะม่วงนั้นว่ามีความเหมาะสมที่การเก็บเกี่ยวได้หรือไม่

วิธีการที่ใช้ชี้บ่งระยะความแก่ของผลมะม่วง

1. การนับอายุของผล เป็นการนับจำนวนวันตั้งแต่ดอกบานเต็มที่ไปจนถึงวันที่กำหนดว่าเป็นช่วงที่ผลแก่ ซึ่งมะม่วงแต่ละพันธุ์และแหล่งพื้นที่ปลูกแตกต่างกัน จะกำหนดจำนวนวันในการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ไม้ปลูกที่ อ. บางคล้า จ. ฉะเชิงเทรา ชาวสวนจะเก็บเกี่ยวผลมะม่วงในช่วง 90 วัน ส่วนที่ อ. ปากช่อง จ. นครราชสีมา ชาวสวนจะเก็บเกี่ยวผลมะม่วงประมาณ 105-112 วัน หลังจากดอกบานเต็มที่ (วิจิตร, 2529) และในฟิลิปปินส์ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้แก่หลังดอกบานเต็มที่ 102 วัน (นิริยาและคณัย, 2533)

2. การสังเกตมวลที่ผิวของผล เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก โดยผลมะม่วงที่แก่จัดจะมีมวลหนาเห็นเป็นสีขาว แต่ต้องพิจารณาขนาดของผลด้วย โดยผลมะม่วงที่แก่จัด ผลจะเต่งตึงและแก้มทั้ง 2 ด้านของผลจะพองโต

3. การสังเกตดูสีผิวของผล สีผิวของผลมะม่วงเมื่อแก่จัดจะเปลี่ยนจากสีเขียวเข้มเป็นสีเขียวอ่อน หรือสีเขียวอมเหลืองที่บริเวณขั้ว ส่วนเนื้อมะม่วงเปลี่ยนจากสีขาวเป็นเหลืองอ่อน หรือในผลมะม่วงบางพันธุ์จะเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น พันธุ์อัลฟองโซ เก็บเกี่ยวได้เมื่อเปลือกผลมะม่วงเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลือง (วิจิตร, 2529)

4. การจมน้ำ และ/หรือน้ำเกลือ เป็นการวัดความหนาแน่นของผลมะม่วง วิธีนี้สามารถใช้ในการคัดแยกคุณภาพของผลมะม่วงได้ เนื่องจากสามารถแยกระดับความแก่ของผลมะม่วงได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่จมน้ำ แต่ลอยในน้ำเกลือความเข้มข้น 1.5% เมื่อนำมาบ่มจนสุกจะได้ผลมะม่วงสุกที่มีรสชาติดี เป็นที่ชื่นชอบของผู้บริโภค เหมาะสมในการส่งออก ผลมะม่วงที่จมน้ำเกลือความเข้มข้น 1.5% แต่ลอยใน 2.5% เมื่อบ่มให้สุกจะได้ผลมะม่วงที่มีรสชาติเป็นที่ชื่นชอบรองลงมา แต่ยังไม่เหมาะสมในการส่งออกไปต่างประเทศได้ ส่วนผลมะม่วงที่จมน้ำเกลือความเข้มข้น 2.5% ไม่เหมาะที่จะส่งออก เนื่องจากจะมีอายุในการวาง

จำหน่ายสั้น (จริงแท้, 2538) แต่วิธีนี้ไม่สามารถใช้ได้กับผลมะม่วงพันธุ์การาขาวและอาลุมิส เพราะแม้ว่าผลของมะม่วงจะแก่จัด แต่ยังมีควมถ่วงจำเพาะน้อย และผลมะม่วงพันธุ์ทองคำซึ่งมีช่องว่างระหว่างเมล็ดกับ endocarp มาก ทำให้ผลมะม่วงไม่จมในน้ำ จึงไม่สามารถวัดความแก่-อ่อนของผลมะม่วงด้วยวิธีนี้ได้ (สมชาย 2530 ; สายชล 2530)

นอกจากวิธีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังสามารถใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบทางเคมี ตัวอย่างเช่น ปริมาณน้ำตาล ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้ ปริมาณสตาร์ช และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ เป็นตัวบ่งชี้ถึงความแก่-อ่อนของผลมะม่วงได้อีกด้วย ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการเพื่อชั่งบ่งระยะเวลาความแก่ที่เหมาะสม เพื่อเก็บเกี่ยวผลมะม่วงจึงขึ้นกับความสะดวก และความเหมาะสมของผู้ปฏิบัติ (นิธิยาและคณัย, 2533)

การบ่มผลมะม่วง

การบ่มผลมะม่วง เป็นวิธีการที่เร่งให้ผลมะม่วงสุกเร็วขึ้น มักใช้กับผลมะม่วงประเภทบริโภคผลสุก โดยทั่วไปผลมะม่วงจะสามารถสุกได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งจะเกิดขึ้นภายหลังจากผลมะม่วงแก่จัด และเมื่อผลมะม่วงสุกแล้วก็จะเสื่อมคุณภาพลงเรื่อยๆ ดังนั้นการกำหนดระยะเวลาการสุกของผลมะม่วงที่เหมาะสม จะช่วยให้สามารถจำหน่ายผลมะม่วงได้ราคาตามที่ต้องการ เนื่องจากผลมะม่วงที่สุกมีคุณภาพที่ดี การปล่อยให้ผลมะม่วงสุกเองตามธรรมชาติมีข้อเสีย คือ ผลมะม่วงจะสุกไม่สม่ำเสมอทุกผล จึงมีจำนวนของผลมะม่วงสุกที่ไม่แน่นอน และไม่สุกทั่วกันทั้งผล ดังนั้นจึงมักนิยมใช้การบ่มเร่งให้ผลมะม่วงสุกเร็วขึ้น ได้ผลสุกที่สม่ำเสมอทั่วทั้งผล และยังมีคุณภาพที่ดีอีกด้วย วิธีที่ใช้ในการบ่มผลมะม่วงมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่

1. การบ่มอย่างง่าย เป็นการบ่มผลมะม่วงในภาชนะปิด ตัวอย่างเช่น บรรจุผลมะม่วงไว้ในโถง หรือตะกร้า แล้วใช้กระดาษหนังสือพิมพ์ หรือใบไม้แห้ง คลุมทับ แล้วใช้กระสอบปิดทับด้านบนไว้ จะเกิดความร้อนขึ้นภายในภาชนะเนื่องจากความร้อนที่ผลมะม่วงคายออกมา จะช่วยทำให้ผลมะม่วงสุกเร็วขึ้น
2. การอบหรือรมด้วยควันไฟ วิธีนี้จะคล้ายกับวิธีการแรก แต่จะจุดธูปหรือกามมะพร้าววางไว้ในภาชนะบนผลมะม่วง แล้วจึงใช้กระสอบคลุมปิดภาชนะ วิธีนี้ผลมะม่วงจะสุกเร็วกว่าวิธีแรก เนื่องจากในควันไฟมีก๊าซเอทิลีนปนอยู่ด้วย
3. การบ่มด้วยถ่านก๊าดหรือแคลเซียมคาร์ไบด์ เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากไม่ยุ่งยาก และผลมะม่วงจะเริ่มสุกภายในเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง วิธีการคือ นำถ่านก๊าดมาทุบ

ให้แตกเป็นก้อนเล็กๆ แล้วห่อด้วยกระดาษ จากนั้นสอดไว้ในกอกของผลมะม่วง หรือวางไว้ในภาชนะที่บรรจุผลมะม่วง แล้วคลุมปิดกอกผลมะม่วง หรือปิดภาชนะ เมื่อถ่านก๊าซได้รับความชื้นจากอากาศจะค่อยๆ สลายตัวเกิดเป็นก๊าซอะเซทิลีนออกมา ซึ่งจะไปเร่งกระบวนการสุกของผลมะม่วง ข้อดีของวิธีการนี้ คือ เสียค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารชนิดอื่นๆ แต่ก็มีข้อด้อย คือ ผลมะม่วงอาจสุกไม่สม่ำเสมอกัน เนื่องจากในการบ่มต้องบรรจุผลมะม่วงในภาชนะปิด จึงมีการไหลเวียนของอากาศน้อย ดังนั้นผลมะม่วงที่อยู่ใกล้กับถ่านก๊าซ ก็จะได้รับก๊าซความเข้มข้นมากกว่าผลมะม่วงที่อยู่ไกลออกไป นอกจากนี้ยังมีเรื่องของความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาของถ่านก๊าซกับน้ำ ซึ่งอาจทำให้ผลมะม่วงมีลักษณะไหม้ และมีกลิ่นของอะเซทิลีนที่ติดอยู่กับผลมะม่วงได้ หากใช้ปริมาณถ่านก๊าซในการบ่มมากเกินไป (จริงแท้ 2538 ; วิจิตร 2529)

4. การบ่มด้วยก๊าซเอทิลีน (ethylene) เป็นการใช้ออกซิเจนเร่งให้ผลมะม่วงสุกเร็วขึ้น โดยปกติการสุกของผลไม้ตามธรรมชาติจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากก๊าซนี้ แต่วิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากต้องสร้างห้องสำหรับรมก๊าซ และต้องมีการคำนวณปริมาณของก๊าซที่จะใช้ต่อปริมาณผลมะม่วง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้กันในประเทศไทย (จริงแท้, 2538)

5. การบ่มด้วยอีเธเรล (ethrel) เป็นการใช้ออกซิเจนเร่งให้ผลมะม่วงสุกเร็วขึ้น ซึ่งเป็นของเหลว นำมาทำให้เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นจางลงในน้ำตามที่ต้องการ แล้วจุ่มผลมะม่วงลงในสารละลายดังกล่าว จากนั้นจึงนำไปบ่ม อีเธเรลจะซึมเข้าไปในไซโตรพลาสซึมของเซลล์ผลมะม่วง แล้วจะสลายตัวปล่อยก๊าซเอทิลีนออกมา ยิ่งในสภาพที่มีความชื้นสูง จะช่วยในการสลายตัวของอีเธเรลได้มากขึ้น วิธีนี้จะทำให้ผลมะม่วงสุกเร็วและมีความสม่ำเสมอ แต่จะทำให้ผลมะม่วงมีความชื้นเพิ่มขึ้น และอาจทำให้เกิดโรคได้ง่าย (จริงแท้, 2538)

วิธีการบ่มผลไม้ตามที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าการใช้สารต่างๆ ในการบ่มผลมะม่วง ได้แก่ แคลเซียมคาร์ไบด์และอีเธเรล จะไปช่วยกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของก๊าซเอทิลีนในผลมะม่วง จึงเร่งให้ผลมะม่วงสุกเร็วขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะก๊าซเอทิลีนเป็นฮอร์โมนที่พืชสร้างขึ้นได้เอง และมีสมบัติในการเร่งอัตราการสุกของผลไม้

การสุกของผลไม้

การสุกของผลไม้สามารถเกิดขึ้นทั้งที่ติดอยู่บนต้น หรือภายหลังจากการเก็บเกี่ยวออกจากต้นแล้วก็ได้ และยังสามารถเร่งอัตราการสุกของผลไม้ได้อีกดังที่ได้กล่าวไปแล้วในเรื่องของการบ่ม การเปลี่ยนแปลงของผลไม้ระหว่างกระบวนการสุกนั้นเกิดขึ้นได้หลายอย่างพร้อมกัน หรือเกิดในเวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีดังนี้ (จริงแท้, 2538)

- อัตราการหายใจเพิ่มมากขึ้นแล้วลดลง
- ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนภายในผลเพิ่มขึ้นและมีก๊าซเอทิลีนถูกปล่อยออกมาเพิ่มขึ้นด้วย
- มีการตอบสนองต่อก๊าซเอทิลีนได้ง่ายขึ้น
- องค์ประกอบของผนังเซลล์ เช่น สารประกอบพวกเพกตินเปลี่ยนไป ทำให้เนื้อสัมผัสของผลมะม่วงสุกมีความอ่อนตัวและเหนียวลง
- การควบคุมการผ่านเข้า-ออกของสารต่างๆ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ลดลง
- โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ถูกสร้างขึ้น
- RNA และ DNA เปลี่ยนแปลงไป
- คลอโรฟิลล์เสื่อมสลาย ทำให้สีเขียวจางลง
- สารสีแอนโทไซยานินและแคโรทีนอยด์ถูกสร้างขึ้น
- โมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตเปลี่ยนแปลงไป เช่น สตาร์ชจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาล หรือน้ำตาลชนิดหนึ่งถูกเปลี่ยนเป็นอีกชนิดหนึ่ง
- กรดอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในเนื้อผลมะม่วงเปลี่ยนไป
- สารระเหยที่ให้กลิ่นและรสชาติถูกสร้างขึ้น
- สารพวกแทนนินรวมตัวเป็นโมเลกุลใหญ่ (polymerization) ทำให้ความฝาดลดลง
- เกิดการสะสมไขมันของผลไม้
- เมล็ดพัฒนาเข้าสู่ความสมบูรณ์ คือเมล็ดแก่ขึ้น
- เกิดการหลุดร่วง (abscission) ออกจากต้น

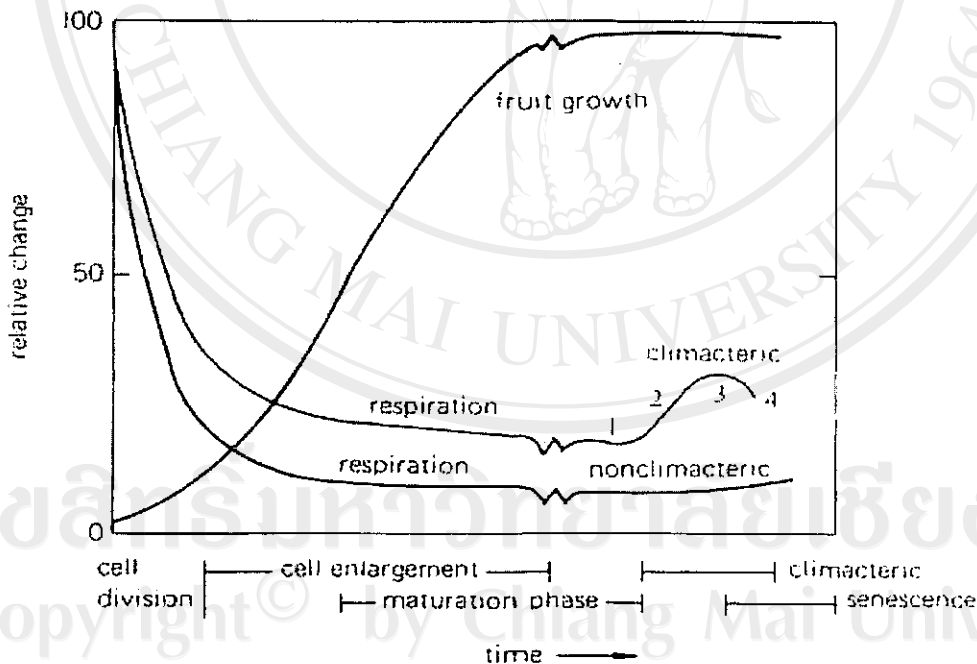
การเปลี่ยนแปลงระหว่างการสุกของผลไม้

ภายหลังจากเก็บเกี่ยวผลไม้มาแล้ว ผลไม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการหายใจเกิดขึ้น ซึ่งสามารถจำแนกผลไม้ตามลักษณะการหายใจระหว่างการสุก ออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. **ผลไม้กลุ่ม non-climacteric** คือ กลุ่มของผลไม้ที่มีอัตราการหายใจขณะที่กำลังเจริญเติบโตสูง ค่อยๆ ลดลงเมื่อผลแก่เต็มที่ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจภายหลังจากการเก็บ

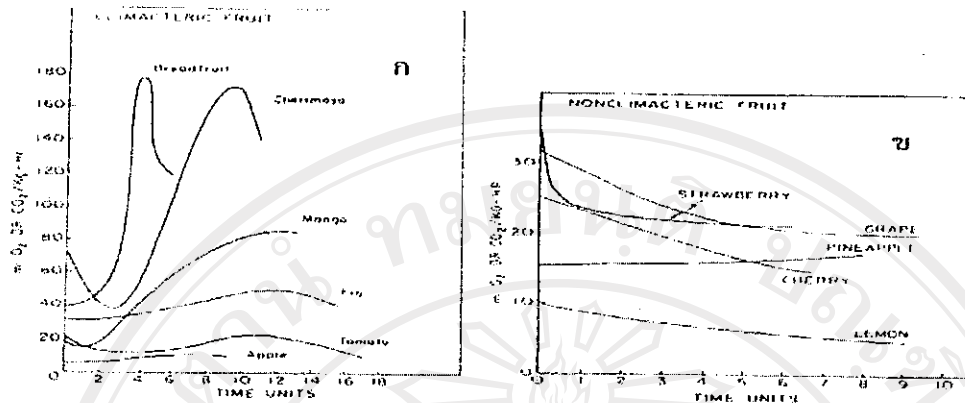
เกี่ยวและระหว่างผลสุก ตัวอย่างของผลไม้กลุ่มนี้ เช่น ชมพู ส้ม ลิ้นจี่ ลำไย องุ่น และสับปะรด เป็นต้น โดยผลไม้กลุ่มนี้จะต้องปล่อยให้ผลเจริญเติบโต แก่และสุกบนต้น จึงสามารถเก็บเกี่ยวและนำมาบริโภคได้

2. ผลไม้กลุ่ม climacteric คือ กลุ่มของผลไม้ที่มีอัตราการหายใจขณะที่กำลังเจริญเติบโตสูง ค่อยๆ ลดลงเมื่อผลแก่เต็มที่ และมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งอย่างชัดเจนเมื่อผลไม้เริ่มสุก จึงมีรูปแบบของอัตราการหายใจระหว่างการสุกที่แตกต่างและตรงกันข้ามกับผลไม้กลุ่ม non-climacteric ดังนั้นอัตราการหายใจของผลไม้กลุ่มนี้จึงมีความสัมพันธ์กับกระบวนการสุก และการสังเคราะห์ก๊าซเอทิลีนของผลไม้ (รูปที่ 2.1) ตัวอย่างของผลไม้กลุ่มนี้ ได้แก่ กัลย มะม่วง ขนุน พลับ มะละกอ และทุเรียน เป็นต้น และผลไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นระหว่างการสุกแตกต่างกัน (รูปที่ 2.2) ผลไม้กลุ่มนี้จะต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่จัด แล้วนำไปบ่มให้ผลสุกจึงจะนำมาบริโภคได้ หากปล่อยให้ผลไม้กลุ่มนี้สุกบนต้นจะทำให้ผลไม้สุกที่ได้มีคุณภาพต่ำลงด้วย (จริงแท้, 2538)



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

(ที่มา : Salisbury and Ross, 1985)



รูปที่ 2.2 ลักษณะการหายใจของผลไม้ชนิดต่างๆ ในแต่ละกลุ่ม (ก) กลุ่ม climacteric (ข) กลุ่ม non-climacteric
(ที่มา : Biale and Young, 1981)

สำหรับผลมะม่วงมีลักษณะการหายใจเป็นแบบ climacteric คือ จะมีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงที่ผลมะม่วงสุก

การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีระหว่างการสุกของผลไม้

1. คาร์โบไฮเดรต คาร์โบไฮเดรตในผลไม้เป็นสารอาหารที่สะสมไว้ ได้แก่ สตาร์ช และ น้ำตาล ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ให้รสชาติและคุณค่าทางโภชนาการ คาร์โบไฮเดรตบางชนิดเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของผนังเซลล์ที่ให้ความแข็งแรง ได้แก่ เซลลูโลส และสารประกอบเพกตินต่างๆ (จริงแท้, 2538) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการสุกดังนี้

ก. น้ำตาล ที่พบมากในผลไม้มี 3 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโทส ซึ่งน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดนี้สามารถเปลี่ยนรูปกันได้โดยอาศัยเอนไซม์ ปริมาณน้ำตาลในผลไม้ภายหลังการเก็บเกี่ยว อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้วแต่ชนิดของผลไม้และสภาพแวดล้อม

ปริมาณของน้ำตาลในผลมะม่วงจะเพิ่มขึ้นระหว่างการสุก โดยน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นในช่วงการสุกนี้ ได้แก่ น้ำตาลซูโครส เนื่องจากสตาร์ชที่สะสมไว้ถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาล และปริมาณน้ำตาลจะแตกต่างกันไปตามชนิดของพันธุ์และความแก่ (ตารางที่ 2.1) และจากผลการทดลองของ Muda *et al.* (1995) รายงานเมื่อผลมะม่วงมีความสุกมากขึ้นจะเกิดการสูญเสียน้ำตาลกาแล็กโทส และดี-เฮกโซส ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างของเพกตินที่ผนังเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลง และในระหว่างการ

สุกของผลมะม่วงพันธุ์เอลวิน อัลฟองโซ เฮเดน และลั้งกรา สตาร์ชจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาลซูโครสมากที่สุด และน้ำตาลรีดิวซิงที่พบมากในผลมะม่วง ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส และฟรุกโทส (Palejwala *et al.*, 1989 ; Castrillo *et al.*, 1992 ; Ito *et al.*, 1997)

การที่ชนิดของน้ำตาลในผลไม้แตกต่างกันทำให้ผลมีรสหวานไม่เท่ากัน เนื่องจากน้ำตาลฟรุกโทสจะให้ความหวานมากที่สุด รองลงมา คือน้ำตาลซูโครส และกลูโคส และระหว่างการเก็บรักษาผลไม้อาจมีการสูญเสียน้ำตาลเกิดขึ้น เนื่องจากน้ำตาลถูกนำไปใช้เป็นสับสเตรตในกระบวนการหายใจ จึงทำให้ผลไม้มีความหวานลดลง (Tueker, 1993)

ข. สตาร์ช ในระหว่างการสุกของผลมะม่วงจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสตาร์ชในลักษณะเป็นแบบผกผันกับปริมาณน้ำตาล คือ ปริมาณสตาร์ชจะลดลงในระหว่างการสุกของผลมะม่วง (Selvaraj *et al.*, 1989 ; Lima *et al.*, 2001)

ค. เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และสารประกอบเพกตินต่างๆ สารเหล่านี้เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของผนังเซลล์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของผลไม้ โดยเมื่อผลไม้เริ่มสุกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่โมเลกุลของสารต่างๆ ในผนังเซลล์ โดยเฉพาะสารประกอบเพกติน ซึ่งจะเปลี่ยนรูปจากโปรโตเพกติน (protopectin ; เพกตินชนิดที่ไม่ละลายน้ำ) เป็นเพกตินชนิดที่ละลายน้ำได้ เนื่องจากถูกย่อยด้วยเอนไซม์ ได้แก่ โพลีกาแลกตูโรเนส (polygalacturonase ; PG) และเพกตินเอสเตอเรส (pectinesterase ; PE)

2. โปรตีน โปรตีนในผลไม้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเอนไซม์ ซึ่งเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ เช่น เอนไซม์ที่ไปย่อยสลายโมเลกุลของเพกติน ทำให้เนื้อผลไม้นุ่มลง และเอนไซม์อะไมเลสซึ่งไฮโดรไลซ์สตาร์ชให้เป็นน้ำตาล สำหรับในผลมะม่วงเอนไซม์ที่พบมาก ได้แก่ คตะเลส (catalase) และเปอร์ออกซิเดส และจากผลการทดลองของ Palejwala *et al.* (1989) และ Lima *et al.* (2001) รายงานว่าในระหว่างการสุกของผลมะม่วงพันธุ์ทอมมีแอทคิน อัลฟองโซ และลั้งกรา กิจกรรมของเอนไซม์อะไมเลสและเซลลูเลสเพิ่มสูงขึ้น

3. ไขมัน ผลไม้ส่วนใหญ่มีปริมาณไขมันน้อยมาก ในผลมะม่วงสุกมีปริมาณไขมัน 0.4% มะม่วงดิบมี 0.1% (Ismail, nodate) และผลมะม่วงที่พันธุ์ต่างกันจะมีปริมาณของไขมันไม่เท่ากัน (Selvaraj *et al.*, 1989)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในผลมะม่วงดิบและมะม่วงสุก

พันธุ์	มะม่วงดิบ			มะม่วงสุก		
	สตาร์ช (%)	น้ำตาลรีดิวซิง (%)	น้ำตาลซูโครส (%)	สตาร์ช (%)	น้ำตาลรีดิวซิง (%)	น้ำตาลซูโครส (%)
สุวรรณราชา	3.43	2.55	0.23	0.38	10.78	3.54
ไพรี	0.92	7.56	0.18	0.32	11.00	1.82
แบงแกนพอลลี	4.08	4.53	0.10	0.67	7.22	5.13
ลั้งกรา	4.09	4.36	0.11	0.39	11.80	1.70
ดาซีลี	3.91	4.20	0.16	0.67	13.40	1.55
โททาพูลี	3.62	7.07	0.09	0.52	11.07	1.64
อัลฟองโซ	4.25	8.15	0.11	0.43	10.55	4.91

(ที่มา: คัดแปลงจาก Selvaraj *et al.*, 1989)

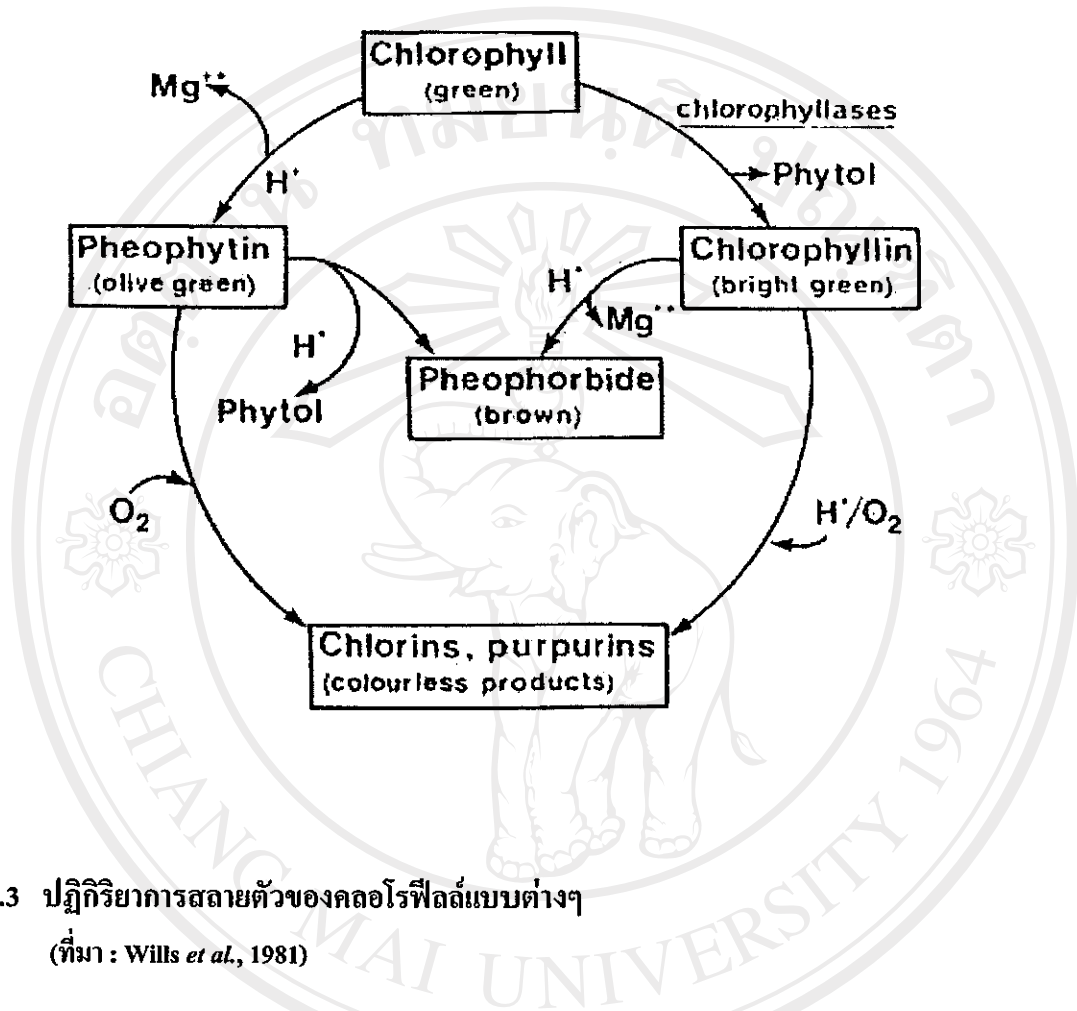
4. กรดอินทรีย์ กรดอินทรีย์สารเริ่มต้นและสารอินเทอมีเดียทในวงจรเครบ (Kreb's cycle) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการหายใจ และยังเป็นสารเริ่มต้นในการสังเคราะห์โมเลกุลสารต่างๆ เช่น กรดอะมิโน และยังมีบทบาทสำคัญในเรื่องของรสชาติของผลไม้อีกด้วย โดยปริมาณกรดทั้งหมด และ/หรือชนิดของกรดอินทรีย์ในผลไม้ จะแตกต่างกันไปตามชนิด พันธุ์ และระยะความแก่ ซึ่งในผลไม้ส่วนใหญ่พบว่าเมื่อผลสุกปริมาณกรดทั้งหมดจะลดลง เนื่องมาจากกรดบางส่วนถูกนำไปใช้เป็นสับสเตรตในกระบวนการหายใจ หรือในการเปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Patterson, 1970 ; Wills *et al.*, 1981) ปริมาณกรดทั้งหมดในผลมะม่วงจะลดลงเรื่อยๆ ตามระยะการสุกที่เพิ่มขึ้น (ธีราพร, 2536 ; Selvaraj *et al.*, 1989) ในช่วงที่ผลไม้อยู่ในวัยอ่อนอยู่นั้นจะมีปริมาณกรดอินทรีย์สูง ทำให้มีสภาพความเป็นกรดภายในผลสูง คือค่าพีเอชของเนื้อผลไม้ต่ำ จะช่วยป้องกันผลไม้จากการเข้าทำลายของโรคและจุลินทรีย์ต่างๆ ได้ เนื่องจากสภาวะดังกล่าวไม่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ โดยชนิดของกรดอินทรีย์ที่พบมากในผลมะม่วง คือ กรดซิตริก ส่วนกรดชนิดอื่นๆ ที่พบในผลมะม่วง ได้แก่ กรดมาลิก ออกซาลิก และซักซินิก เป็นต้น (Mitra and Baldwin, 1997)

5. สารสี ในผลไม้มีสารสีที่สำคัญอยู่ 3 ชนิด คือ คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และแซนโทฟิลล์ ซึ่งสารสีแต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกัน

ก. คลอโรฟิลล์ มีสมบัติสามารถละลายได้ดีในน้ำมัน เป็นสารที่ให้สีเขียวในผลไม้ โมเลกุลของคลอโรฟิลล์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวมีอะตอมของแมกนีเซียมล้อมรอบด้วยวงแหวนของคาร์บอนและไนโตรเจน เรียกว่า วงแหวนพอร์ไฟริน (porphyrin ring) และส่วนหางที่เป็นโซ่ยาว (long chain) ของไฮโดรคาร์บอน เรียกว่า ฟิทอล (phytol) (จริงแท้, 2538) โมเลกุลของคลอโรฟิลล์จะเกิดการสลายตัวและสร้างขึ้นใหม่ตลอดเวลา แต่ในช่วงเสื่อมสลายของผลไม้คลอโรฟิลล์จะสลายตัวมากกว่าทำให้สีเขียวจางหายไปจนหมด ดังนั้นการสูญเสียคลอโรฟิลล์ในผลไม้จึงเป็นการชี้บ่งถึงความเสื่อมสลาย ทำให้ผลไม้สูญเสียสีเขียวที่เปลือก ซึ่งอาจเป็นทั้งข้อดีหรือข้อเสีย ขึ้นกับชนิดของผลไม้ เช่น เป็นข้อดีสำหรับผลมะม่วงที่บริโภคผลสุก ได้แก่ พันธุ์โชคอนันต์ น้ำดอกไม้ และแรด เป็นต้น การสลายตัวของสีเขียวจึงทำให้คุณภาพของผลมะม่วงชนิดนี้ดีขึ้น แต่ในมะม่วงที่บริโภคผลดิบ (มะม่วงดิบ) เช่น เขียวเสวย ผลมะม่วงควรมีลักษณะผิวที่เป็นสีเขียวจึงมีคุณภาพดี ดังนั้นการชี้บ่งคุณภาพที่เหมาะสมของผลผลิตที่มีการสูญเสียคลอโรฟิลล์ว่าเป็นข้อดีหรือข้อเสีย จึงขึ้นอยู่กับผู้บริโภค และความต้องการนำผลผลิตนั้นๆ ไปใช้ประโยชน์ ปฏิบัติการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ดังรูปที่ 2.3 (Wills *et al.*, 1981)

ข. แคโรทีนอยด์ มีสมบัติละลายได้ดีในน้ำมัน เป็นสารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว ให้สีเหลือง-ส้มหรือสีแดงที่ผิวและเนื้อของผลไม้ แคโรทีนอยด์แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือแคโรทีน ไลโคพิน และแซนโทฟิลล์ ซึ่งแคโรทีนอยด์จะมีอยู่ในผลไม้ตั้งแต่แรก แต่จะไม่ปรากฏให้เห็นเนื่องจากถูกสารสีคลอโรฟิลล์บดบังไว้ และสีของแคโรทีนอยด์จะปรากฏให้เห็นเมื่อสีเขียวของคลอโรฟิลล์สลายตัวไป ถึงแม้ว่าแคโรทีนอยด์จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว แต่แคโรทีนอยด์มีสมบัติเป็นสารสีที่ค่อนข้างเสถียรเมื่ออยู่ภายในเซลล์ Zhou *et al.* (1994) รายงานว่าในระหว่างการสุกของผลมะม่วง เมื่อผลมะม่วงเปลี่ยนสีจากสีเขียวอ่อนเป็นสีเหลือง-ส้ม ปริมาณของแคโรทีนจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะการสุก เช่น ปริมาณแคโรทีนเพิ่มขึ้นในระหว่างการสุกของผลมะม่วงพันธุ์อัลฟองโซ และลังครา (Palejwala *et al.*, 1989)

ผลไม้ที่มีสีเหลือง เช่น มะม่วง และมะละกอ เป็นแหล่งของสารแคโรทีนอยด์ที่สามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ดีที่สุด (Bhasharachary *et al.*, 1995) และจากการวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ในผลไม้ของประเทศอิสราเอล พบว่ามะม่วงเป็นผลไม้ที่มีปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่า 100 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Ben-Amotz and Fisher, 1998)



รูปที่ 2.3 ปฏิกริยาการสลายตัวของคลอโรฟิลล์แบบต่างๆ

(ที่มา : Wills *et al.*, 1981)

Mercadante *et al.* (1997) ใช้เครื่อง HPLC และ mass spectrometry ในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารแคโรทีนอยด์ในผลมะม่วงพันธุ์เคียทท์ พบว่ามี เบต้า-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*) ผลการวิเคราะห์ด้วย HPLC ยังพบว่ามีสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้นอีก 2 ชนิด คือ lutein และ mutachrome ในการวิเคราะห์ด้วย mass spectrometry และการวิเคราะห์ด้วย HPLC ทำให้ทราบปริมาณของ *all-trans*- β -carotene ในผลมะม่วงมีประมาณ 1.5-15.1 ไมโครกรัมต่อกรัม ซึ่งมีปริมาณเป็นอันดับสองรองจาก *all-trans*-violaxanthin โดยสารไวโอลาแซนทิน (violaxanthin) และเบต้า-แคโรทีนเป็นสารประกอบหลักของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ในผลมะม่วงที่อยู่ในช่วงระยะผลสุก (Mercadante and Rodriguez-Amaya, 1998)

Jana *et al.* (1998) ได้วิเคราะห์หาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

กรดแอสคอร์บิก และเบต้า-แคโรทีนในผลมะม่วงที่ปลูกในประเทศอินเดียทั้งหมด 20 พันธุ์ พบว่า มะม่วงแต่ละพันธุ์มีปริมาณของสารประกอบต่างๆ แตกต่างกันไป และเหมาะสมที่จะนำมาบริโภค ในรูปผลสด หรือใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ ปริมาณของเบต้า-แคโรทีนมี ความสัมพันธ์กันอย่างมากกับค่า b^* , hue angle (H°) และ chroma (C^*) เมื่อวัดสีของผลมะม่วงที่ผ่าน การให้ความร้อนก่อนนำไปเก็บรักษา (Zambrano and Materano, 1998)

Budi *et al.* (2001) ได้วิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์ ได้แก่ เบต้า-แคโรทีน ไลโคพีน และคริปโตแซนทินของผลมะม่วงในประเทศอินโดนีเซีย พบว่าเนื้อมะม่วงมีปริมาณของเบต้า-แคโรทีนสูงสุดคือ 553 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสดของส่วนที่บริโภคได้ รองลงมา คือไลโคพีนมีประมาณ 353 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสดของส่วนที่บริโภคได้ และคริปโตแซนทินมี ประมาณ 137 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสดของส่วนที่บริโภคได้ ซึ่งจากผลการวิจัยดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าผลมะม่วงสุกเป็นแหล่งของ provitamin A ที่ดี เนื่องจากในผลมะม่วงมีปริมาณของ เบต้า-แคโรทีนสูงที่สุด เพราะสารแคโรทีนอยด์ชนิดอื่นๆ มีความสามารถในการเปลี่ยนเป็นวิตามิน เอเพียงครึ่งหนึ่งของเบต้า-แคโรทีนเท่านั้น คือ 1 RE (Retinal Equivalent) เท่ากับ 6 ไมโครกรัม ของ เบต้า-แคโรทีน ส่วนแคโรทีนอยด์อื่นๆ มีค่าเท่ากับ 12 ไมโครกรัม (นิธิยาและวิบูลย์, 2537)

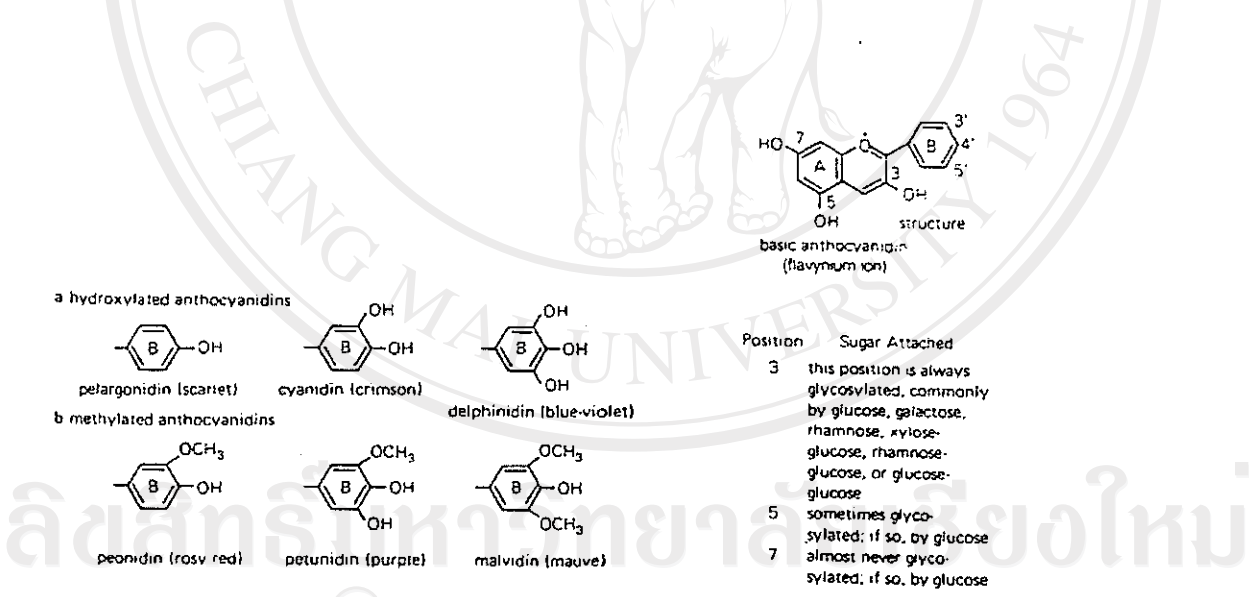
ค. แอนโทไซยานิน มีสมบัติละลายได้ดีในน้ำ ให้สีแดง ม่วง และน้ำเงิน เป็นสารสีที่มี อิทธิพลในการให้สีในผลไม้ มาก และสีนี้จะถูกบดบังด้วยสีเขียวของคลอโรฟิลล์ และสีเหลือง-ส้ม ของแคโรทีนอยด์ แต่ในผลมะเขือเทศและหัวบีท (red beet) สีแดงที่เกิดขึ้นเป็นสารสีไลโคพีน และ บีทานิน ซึ่งเป็นสารสีในกลุ่มของแคโรทีนอยด์ แอนโทไซยานินเป็นสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) ของแอนโทไซยานิดีน (anthocyanidine) โดยจะมีโมเลกุลของน้ำตาลเกาะอยู่ที่ตำแหน่ง ที่ 3 ของคาร์บอน แอนโทไซยานินในเซลล์ของพืชนั้นไม่ค่อยเสถียร จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของ โครงสร้างได้ง่าย และทำให้สีที่ปรากฏเปลี่ยนไปด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ของสารแอนโทไซยานิน ได้แก่ ออกซิเจน ความร้อน สภาพความเป็นกรด-ด่าง วิตามินซี เอนไซม์ โมเลกุลของน้ำตาล และสารอื่น เป็นต้น สูตรโครงสร้างของแอนโทไซยานินแสดงดังรูปที่ 2.4

6. สารระเหย เป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กน้ำหนักโมเลกุลมักไม่เกิน 250 ดาลตัน ตัวอย่างสารระเหย เช่น อัลดีไฮด์ คีโตน กรดอินทรีย์ และเอสเตอร์ ชนิดของสารระเหยจะแตกต่างกันตามชนิดและระยะการสุกของผลไม้ โดยปกติเมื่อผลไม้สุกจะมีปริมาณและชนิดของสารระเหย เพิ่มขึ้น การเก็บรักษาผลไม้เป็นระยะเวลาต่างๆ จะเกิดการสลายตัวของสารระเหย ทำให้กลิ่น ของผลไม้ลดน้อยลง การเปลี่ยนแปลงของสารระเหยที่ให้กลิ่นในผลมะม่วงระหว่างกระบวนการ

สูง พบว่าผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์มีสารระเหย 13 ชนิด มากกว่าพันธุ์ตลับนาคซึ่งมี 9 ชนิด และพันธุ์แก้วมี 3 ชนิด โดยสารระเหยในผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์เป็นพวก ฟิวราน เอสเทอร์ แลคโตน คีโตน และเทอร์พีน (สินีนาด, 2541) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสารให้กลิ่นในผลมะม่วงอย่างชัดเจน ระหว่างการสุก และผันแปรตามอุณหภูมิที่เก็บรักษา (Mitra and Baldwin, 1997)

7. ธาตุอาหาร ธาตุอาหารจะช่วยให้ผลไม้มีการเจริญเติบโตจนสมบูรณ์ ในผลมะม่วงมีธาตุโพแทสเซียมมากที่สุด 47.37% รองมาคือ ฟอสฟอรัส 6.49% แคลเซียม 6.38% ซัลเฟอร์ 3.67% คลอรีน 3.88% และแมกนีเซียม 1.62% นอกจากนี้ยังมีทองแดง 1.9 ไมโครกรัมต่อกรัม และไอโอดีน 16 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (วิจิตร, 2529) โดยในผลมะม่วงสุกมีปริมาณของธาตุอาหารแตกต่างจากผลมะม่วงดิบ (ตารางที่ 2.2)

8. วิตามิน ในผลไม้เป็นแหล่งของวิตามินเอ และวิตามินซี ปริมาณวิตามินในผลไม้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของผลไม้ (ตารางที่ 2.3)



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างแอนโทไซยานินบางชนิด (ที่มา : Salisbury and Ross, 1985)

ตารางที่ 2 ปริมาณธาตุอาหาร แคลโรทีนอยด์ และแคลโรทีนในเนื้อมะม่วง 100 กรัม

ส่วนประกอบทางเคมี	มะม่วงดิบ	มะม่วงสุก
แคลโรทีนอยด์ (ไมโครกรัม)	90	2,210
แคลโรทีน (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, no date)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณวิตามินเอ บี และซีในผลไม้บางชนิด

ผลไม้	วิตามินเอ (I.U.)	ปริมาณวิตามิน (มิลลิกรัม/100กรัม)		
		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, 2538)

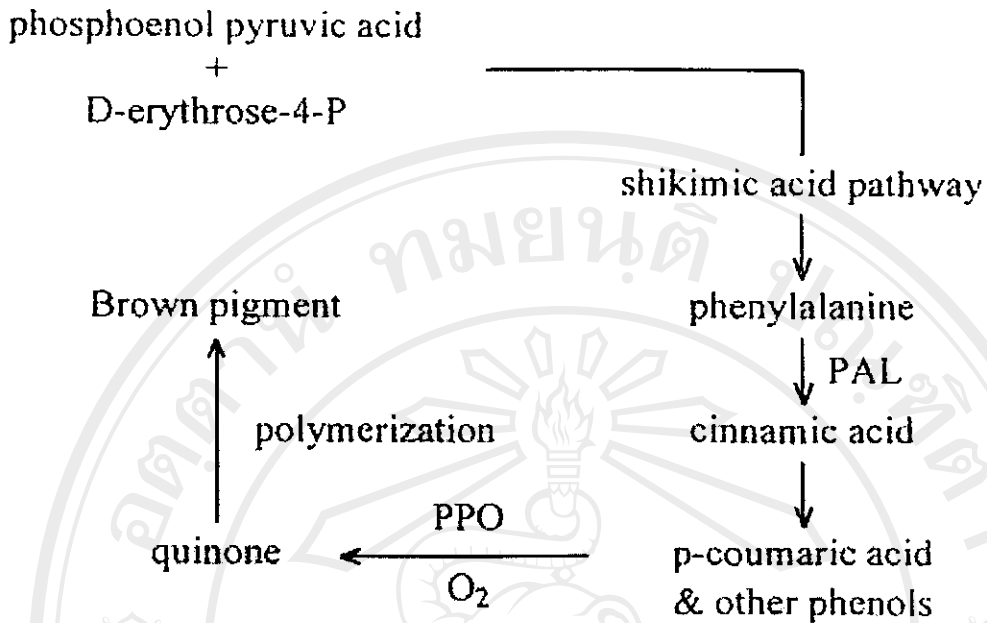
วิตามินเอในผลไม้จะอยู่ในรูปของแคลโรทีน ซึ่งเป็นสารในกลุ่มของแคลโรทีนอยด์ ในผลมะม่วงสุกมีปริมาณแคลโรทีนอยด์และแคลโรทีนมากกว่าผลมะม่วงดิบ (ตารางที่ 2.2) ดังนั้นอายุของผลมะม่วงจึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณของวิตามินด้วย และยังขึ้นกับชนิดของผลไม้ด้วยเช่นกัน นอกจากวิตามินเอและวิตามินซีแล้ว ในผลไม้ยังมีวิตามินบี ได้แก่ วิตามินบีหนึ่ง (thiamin) วิตามินบี

สอง (riboflavin) และไนอะซิน (niacin) เนื่องจากวิตามินบีมีหน้าที่เป็นโคเอนไซม์ของปฏิกิริยาต่างๆ ภายในเซลล์พืช ภายหลังจากเก็บเกี่ยวอาจมีการสูญเสียของวิตามินในผลไม้ได้ ตัวอย่างเช่น หากผลไม้มีการสูญเสียน้ำมากจะทำให้เกิดการสูญเสียแคโรทีนและกรดแอสคอร์บิก หรือการเก็บรักษาผลผลิตไว้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกได้เช่นกัน Giuliana *et al.* (1995) รายงานว่ามีการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกประมาณ 30-40% ภายหลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตโอวาโค สาลี่ กีวี ลิ้นจี่ มะม่วง มะละกอ เสาวรส สับปะรด ส้ม และมะนาว

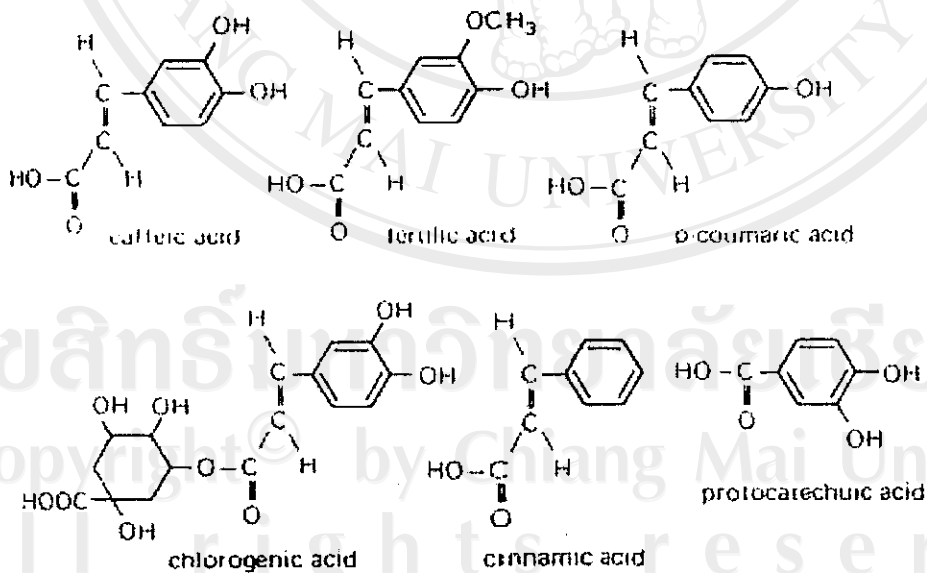
9. สารประกอบฟีนอล นอกจากแอนโทไซยานินซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลชนิดหนึ่งแล้ว ในผลไม้ยังมีสารประกอบของฟีนอลชนิดอื่นๆ อีก ซึ่งอาจทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้นเมื่อเซลล์ของผลไม้ถูกกระทบกระเทือน หรือมีบาดแผล เช่น เมื่อปอกเปลือกผลไม้แล้วปล่อยให้สัมผัสกับอากาศ เนื้อของผลไม้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ซึ่งอาจเกิดจากการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase ; PPO) ที่ไปเปลี่ยน โมเลกุลของสารประกอบฟีนอลเป็นควิโนน (quinone) แล้วรวมตัวกันเป็น โมเลกุลใหญ่ขึ้นและมีสีน้ำตาล (จริงแท้, 2538)

สารประกอบฟีนอล ได้แก่ สารประกอบที่มีหมู่ฟีนอลเป็นองค์ประกอบสำคัญและอาจมีหมู่อื่นๆ เข้ามาเกาะที่ตำแหน่งต่างๆ ตัวอย่างเช่น กรดซินนามิก กรดคาเฟอิก แอนโทไซยานิน และแทนนิน สารประกอบฟีนอลนอกจากมีสมบัติให้สีแล้ว ยังมีสมบัติในการเป็นสารต้านทานโรคด้วย โดยสารประกอบฟีนอลบางชนิดสามารถป้องกันและยับยั้งการเจริญของเชื้อราบางชนิดได้ และสารประกอบฟีนอลยังให้รสฝาดแก่ผลไม้อีกด้วย ซึ่งในผลไม้บางชนิดเมื่อผลไม้สุกรสฝาดจะหายไป เช่น ผลพลับ และละมุด การสังเคราะห์สารประกอบฟีนอลและปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแสดงดังรูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.6 (จริงแท้, 2538)

10. ส่วนประกอบอื่นๆ การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีระหว่างการสุกของผลมะม่วงนั้น จะแตกต่างกัน ระหว่างผลมะม่วงดิบและผลสุก และผลมะม่วงพันธุ์ต่างกันก็จะมีผลทำให้ส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกัน รวมทั้งลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของส่วนประกอบทางเคมีของผลมะม่วงดิบและสุกที่มาจากพันธุ์เดียวกันก็แตกต่างกันด้วย ตัวอย่างดังในตารางที่ 2.4 เส้นใยของผลมะม่วงพันธุ์หนึ่งกลางวันและสามปีที่ผลสุก มีค่า 0.45% และ 0.82% มากกว่าผลมะม่วงพันธุ์หนึ่งกลางวันและสามปีผลดิบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.44% และ 0.69% ตามลำดับ แต่ผลสุกของมะม่วงพันธุ์แก้วและตลับนาคมีเส้นใย 0.49% และ 0.40% ซึ่งมีปริมาณเส้นใยน้อยกว่าผลมะม่วงพันธุ์แก้วและตลับนาคผลดิบ คือมี 0.62% และ 0.46% ตามลำดับ (วิจิตร, 2529)



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอล และปฏิกิริยาการเกิดสารสีน้ำตาล (ที่มา : จริงแท้, 2538)



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ (ที่มา : จริงแท้, 2538)

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของเนื้อมะม่วงพันธุ์แก้ว หนังกกลางวัน สามปี และ
ตลับนาค

ส่วนประกอบทางเคมี (%)	มะม่วง	พันธุ์			
		แก้ว	หนังกกลางวัน	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, 2529)

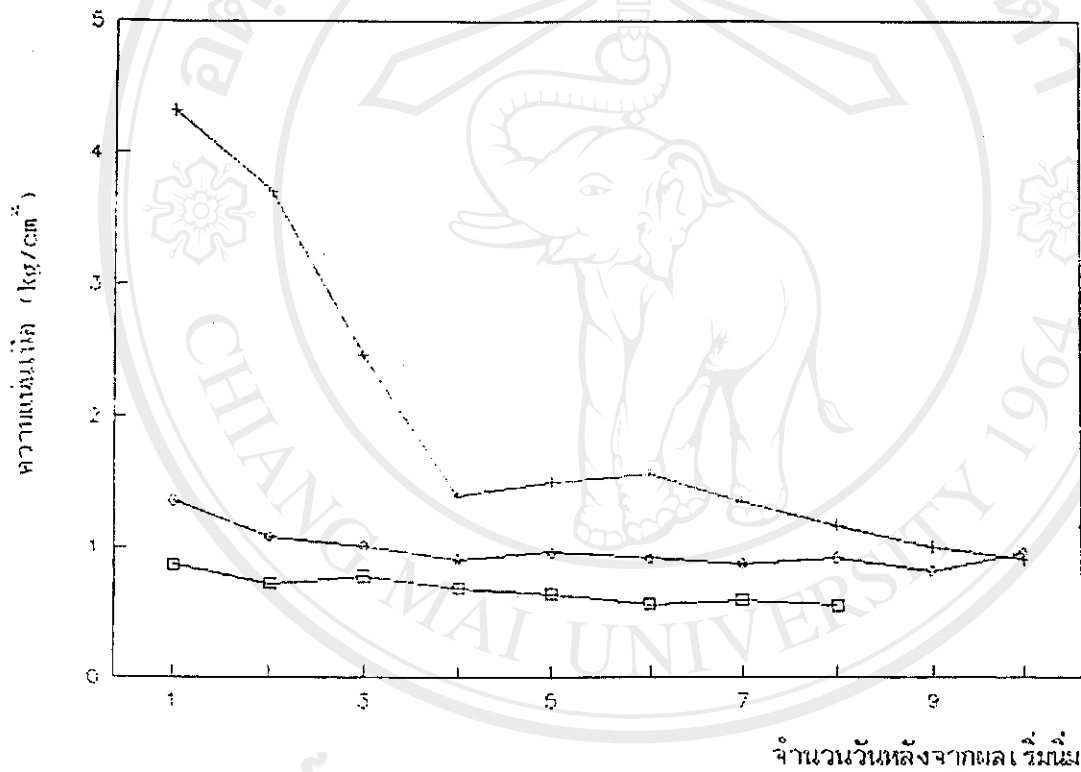
เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบทางเคมีระหว่างการสุกของผลไม้แตกต่างกัน ทำให้มีผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของส่วนประกอบในผลไม้ นั้น เช่น ผลฝรั่งเมื่อสุกปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากในผลฝรั่งมีปริมาณของน้ำตาลและกรดแอสคอร์บิกเพิ่มขึ้น (Bulk *et al.*, 1997) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ หนึ่งกลางวัน และแรดระหว่างการสุกมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก เนื่องจากมีปริมาณของน้ำตาลในผลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้นปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้กลับมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะอิทธิพลของปริมาณกรดที่อยู่ในผลมะม่วงมีปริมาณลดลงมากในระหว่างการสุก จึงทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ลดลงตามไปด้วย (ธีราพร, 2536) ดังนั้นในระหว่างการสุกของผลไม้ไม่จำเป็นว่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะเพิ่มขึ้นเสมอไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบที่ละลายน้ำได้ในผลไม้ นั้นมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง อีกทั้งในผลไม้ยังประกอบด้วยสารที่ละลายน้ำได้หลายชนิด

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพระหว่างการสุกของผลไม้

1. สี ผลไม้บางชนิดสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีเปลือก และ/หรือสีเนื้อในระหว่างการสุกได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่ามีการสลายตัวของสารสีในผลไม้ นั้นมาก-น้อยจนสามารถสังเกตเห็นหรือไม่ ในผลไม้ส่วนใหญ่ระหว่างการสุกสีของผลไม้จะเปลี่ยนจากสีเขียว เนื่องจากการสลายของสารสีคลอโรฟิลล์ เป็นสีเหลือง หรือสีส้ม-แดง เนื่องจากมีสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์ หรือสีม่วง เนื่องจากสารสีกลุ่มแอนโทไซยานินถูกสังเคราะห์มากขึ้น และยังขึ้นอยู่กับว่าในผลไม้ นั้นมีสารสีชนิดใด และมีความเข้มข้นมาก-น้อยเท่าใดด้วย เป็นต้น (จริงแท้, 2538)

2. ความแน่นเนื้อ เมื่อผลไม้สุกความแน่นเนื้อของผลไม้จะลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของสารต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ โดยเป็นผลมาจากการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์ของผลไม้ ดังนั้น เมื่อระยะการสุกของผลมะม่วงเพิ่มขึ้นความแน่นเนื้อจะลดลง ดังในรูปที่ 2.7 (ธีราพร, 2536) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการละลายของสารประกอบเพกตินที่ผนังเซลล์ (Mitra and Baldwin, 1997) และยังพบว่าเมื่อผลมะม่วงสุกจะมีความอ่อนตัวลงเนื่องมาจากกิจกรรมของเอนไซม์โพลีกาแลคทูโรเนสเพิ่มขึ้น (Mitcham and McDonald, 1992) เช่นเดียวกับในระหว่างการสุกของผลมะละกอที่มีปริมาณของสารเพกตินที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงของเฮมิเซลลูโลส ทำให้ผลมะละกอมีเนื้อสัมผัสนุ่มลง (Pauli *et al.*, 1999)

3. ความเต่ง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวผลไม้ออกจากต้น ผลไม้จะมีการสูญเสียน้ำมากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำในผลไม้ลดลงผลไม้จึงเหี่ยวได้ ซึ่งการสูญเสียน้ำในผลไม้จะทำให้เกิดการสูญเสียวของส่วนประกอบทางเคมีชนิดอื่นๆ ด้วย เช่น น้ำตาล และวิตามิน ได้แก่ แคโรทีน และวิตามินซี ดังนั้นในการเก็บรักษาผลผลิตภายหลังการเก็บเกี่ยวจึงมีความสำคัญ สำหรับผลมะม่วงนั้นในระหว่างการสุกจะมีการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้น มีผลทำให้น้ำหนักของผลมะม่วงลดลง ซึ่งน้ำหนักของผลที่สูญเสียน้ำไปนั้นจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น (ธีราพร, 2536)



รูปที่ 2.7 ความแน่นเนื้อของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ (□) หนึ่งกลางวัน (+) และแร่ด (○) เมื่อระยะเวลาการสุกเพิ่มขึ้นและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ที่มา : ธีราพร, 2536)

ดังนั้น การประเมินระยะการสุกของผลไม้ที่เหมาะสมที่จะนำไปบริโภค หรือใช้ในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้น จำต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น ความแน่นเนื้อ ปริมาณน้ำตาลและกรดทั้งหมด เป็นต้น เพราะหากเก็บผลไม้ไว้นานเกินไปปริมาณของสารประกอบต่างๆ ในผลไม้จะลดลง ดังเช่นที่ Giuliana *et al.* (1995) รายงานว่า ผลไม้ ได้แก่ สาลี่ กลัวยหอม มะละกอมะม่วง และเสาวรส ที่อยู่ในช่วงบริโภคเมื่อเก็บไว้ เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จะเกิดการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกในผลไม้เหล่านั้น ทำให้ปริมาณของกรดแอสคอร์บิกในผลไม้ลดลง

ลักษณะประจำพันธุ์ของมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

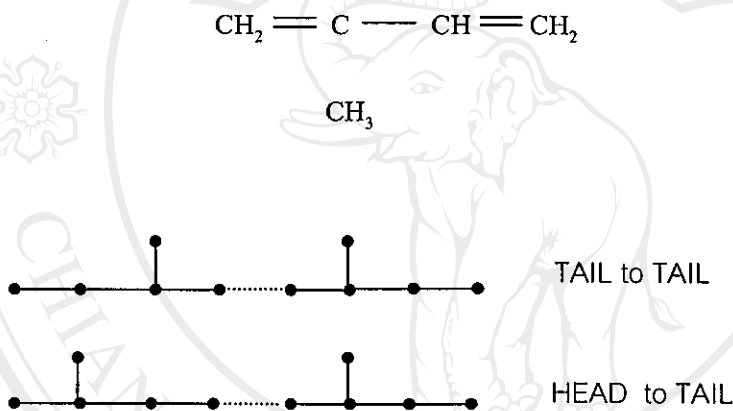
มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ เป็นมะม่วงที่ได้จากการกลายพันธุ์ของเมล็ดมะม่วงสามปี ทำให้เกิดเป็นพันธุ์ใหม่ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเด่น คือ จะยังคงมีกลิ่นหอมของมะม่วงสามปี และออกดอกแบบมะม่วงทะวาย ซึ่งเป็นลักษณะของมะม่วงลูกผสม คือสามารถออกดอกได้ตลอดปีและไม่กลัวฝน สีของเนื้อมะม่วงเมื่อผลสุกเป็นสีเหลืองส้ม (วิจิตร, 2533)

สารแคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีคาร์บอนอะตอมอยู่ 40 อะตอม สูตรโครงสร้างพื้นฐานของแคโรทีนอยด์ จัดเป็นสารประกอบในกลุ่มเทอร์พรีน (terpene group) เกิดจากหมู่ไอโซพรีน 8 หน่วย มาเรียงต่อกันเป็นสายยาว โดยการเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ไอโซพรีนในโครงสร้างโมเลกุลมี 2 แบบ คือ แบบหัวโมเลกุลต่อกับท้ายโมเลกุล (head to tail) และท้ายโมเลกุลต่อกับท้ายโมเลกุล (tail to tail) (รูปที่ 2.8) การเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ไอโซพรีนของแบบที่ 2 จะพบที่บริเวณส่วนกลางในโครงสร้างโมเลกุลแคโรทีนอยด์

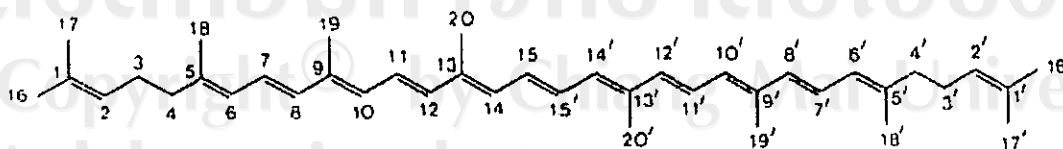
นอกจากนี้โครงสร้างโมเลกุลของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ยังประกอบด้วยวงแหวนที่มีคาร์บอนอยู่ 5 หรือ 6 อะตอม (ส่วนใหญ่ที่พบจะมี 6 อะตอม) เป็นวงแหวนแบบ cyclic โดยต่ออยู่ที่ปลายของโครงสร้างด้านใดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้านของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น เบต้า-แคโรทีน (β -carotene) แอลฟา-แคโรทีน (α -carotene) ไวโอเลทริน (violerythrin) และ/หรืออาจมีอนุพันธ์อื่นๆ ที่มีออกซิเจนอะตอมมาเกาะอยู่ด้วย ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxy group) คีโต (keto) อีพอกซี (epoxy) เมทอกซี (methoxy) หรือ หมู่กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid group) ตัวอย่างเช่น ลูทีน (lutein) ซึ่งเป็น C — 30 — dialdehyde เป็นต้น (Britton, 1996)

ลักษณะการเชื่อมต่อกันของหมู่ไอโซพรีน ทำให้เกิดการสมมาตรของโครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ และพันธะคู่ในโครงสร้างอาจเกิดการหมุน หรือเปลี่ยนตำแหน่งของพันธะ (rotation) ในโครงสร้างได้ (Garry, 1996) ทำให้สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบ (geometric) ได้หลายไอโซเมอร์ (isomer) คือ Z – E isomer โดย E isomer หมายถึง all *trans* form เป็นรูปที่ถูกรับมากกว่า Z isomer หรือ *cis* form โดยทั่วไปแคโรทีนอยด์อยู่ในรูป *trans* form มีความคงตัวสูง เช่น เบต้า-แคโรทีน ที่พบโดยทั่วไป เป็นรูป all *trans* ถึง 90% อีก 10% จะอยู่ในรูป *cis* form สูตรโครงสร้างของสารไลโคพีนและแคโรทีนอยด์บางชนิดแสดงดังรูปที่ 2.9 และ 2.10-2.11 ตามลำดับ



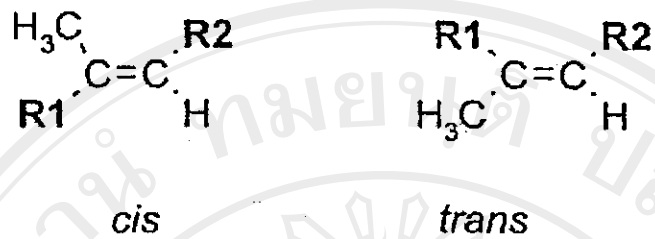
รูปที่ 2.8 1

รูปร่างของหมู่ไอโซพรีนและลักษณะการเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ไอโซพรีน
(ที่มา : กัณณพนต์, 2538)



รูปที่ 2.9 2

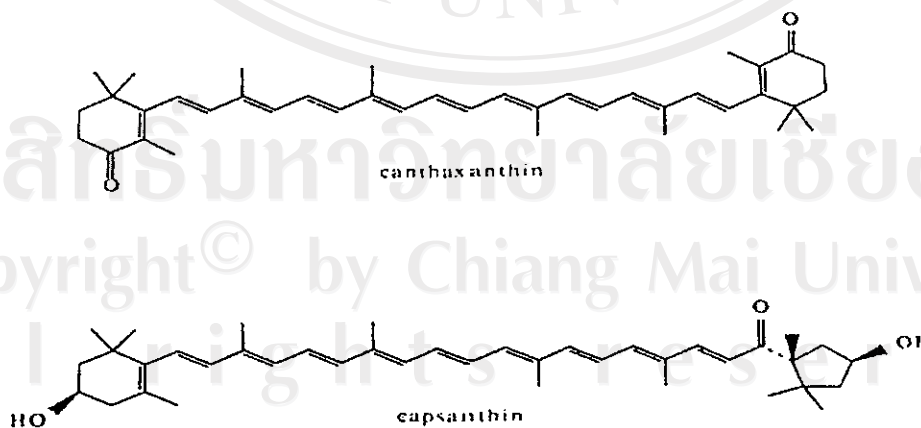
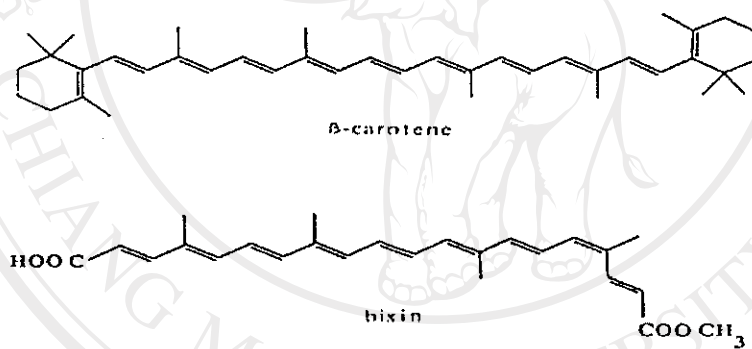
โครงสร้างไลโคพีน (lycopene) เป็นกลุ่มของแคโรทีนอยด์ที่ลักษณะโครงสร้างเป็นแบบโครงสร้างพื้นฐาน
(ที่มา : Britton, 1996)



Cis : ตำแหน่งของ R₁ และ R₂ ที่อยู่บนพันธะคู่จะอยู่ตรงข้ามกัน

Trans : ตำแหน่งของ R₁ และ R₂ ที่อยู่บนพันธะคู่จะอยู่ด้านเดียวกัน

รูปที่ 2.10 ลักษณะรูปแบบ *cis* และ *trans* ในโครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์
(ที่มา : Schoefs, 2002)

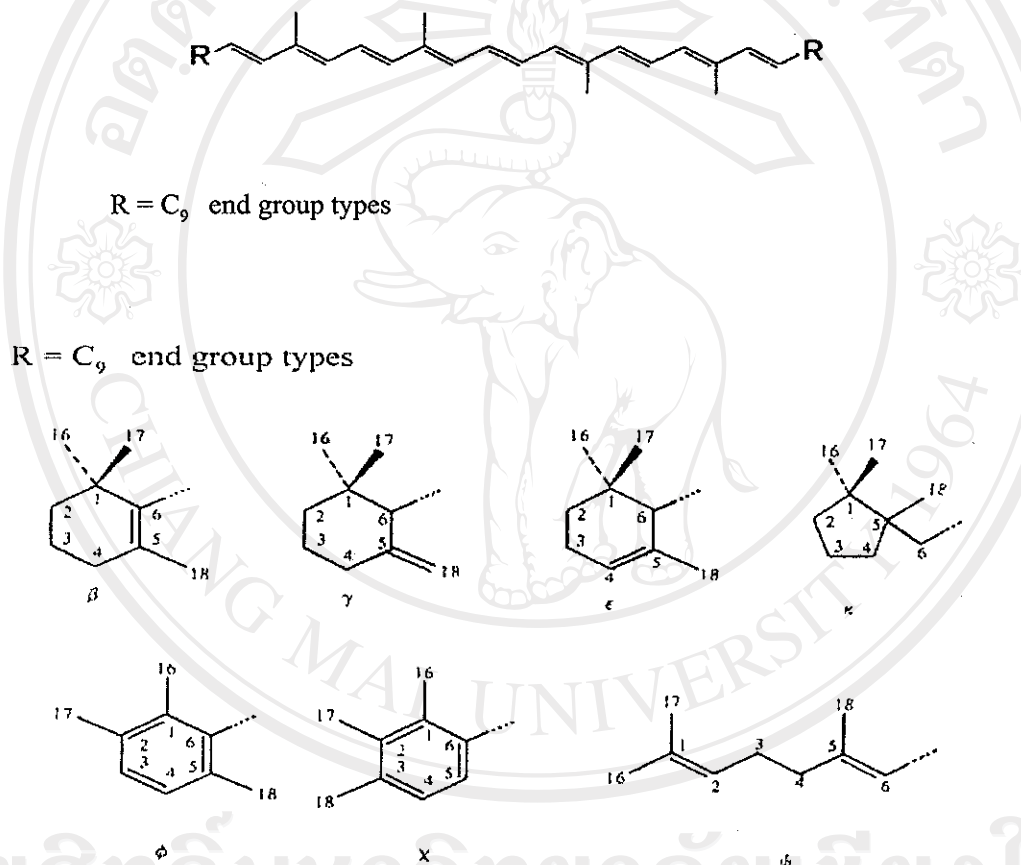


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์

(ที่มา : Garry, 1996 ; Britton, 1996)

วิธีการอ่านชื่อจากโครงสร้างของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์

หลักการอ่านชื่อสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ prefixes และ suffixes โดยส่วน prefixes ได้จากลักษณะของหมู่ด้านปลายของโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งใช้อักษรกรีกในการเรียกชื่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ตัวอย่างการอ่านชื่อไลโคพีน คือ ψ, ψ - carotene และ เบต้า - แคโรทีน คือ β, β - carotene เป็นต้น (Britton, 1996)



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Cyclohexane	: β = beta	Cyclohexane	: ϵ = epsilon
Acyclic	: ψ = psi	Cyclopentene	: κ = kappa
Methylenecyclohexane	: γ = gamma	Aryl	: ϕ = phi
Aryl	: χ = chi		

รูปที่ 2.12 ลักษณะกลุ่ม prefixes และวิธีการอ่านอักษรของกรีก (ที่มา : Britton, 1996)

การจำแนกสารกลุ่มแคโรทีนอยด์

สารกลุ่มแคโรทีนอยด์สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางเคมี ได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

1. กลุ่มไฮโดรคาร์บอนแคโรทีน (hydrocarbon carotenes) เป็นกลุ่มที่โครงสร้างของโมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมกับไฮโดรเจนอะตอมเท่านั้น ตัวอย่างเช่น ลูทีน (lutein : acyclic) เบต้า-แคโรทีน (β -carotene : cyclic) และไลโคพีน (lycopene) เป็นต้น

2. กลุ่มออกซิเจนเตดแซนโทฟิลล์ (oxygenated xanthophylls) เป็นกลุ่มของสารแคโรทีนอยด์ที่มีหมู่อนุพันธ์ที่ประกอบด้วยออกซิเจนอะตอมอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุลด้วย ได้แก่ สารพวกแซนโทฟิลล์ (xanthophylls) เช่น ซีแซนทีน (zeaxanthin) มีอนุพันธ์ของไฮดรอกซิล สไปฟิลโลแซนทีน (spililloxanthin) มีอนุพันธ์ของ เมทอกซิล เป็นต้น

นอกจากนี้ยังจำแนกกลุ่มของสารแคโรทีนอยด์ได้อีก 4 กลุ่ม คือ (Goodwin, 1980)

- ก. Retro-carotenoids เป็นกลุ่มของแคโรทีนอยด์ที่พันธะเดี่ยวและคู่ในโครงสร้างเกิดการเคลื่อนไปหนึ่งตำแหน่งทุกพันธะ
- ข. Seco และ Apocarotenoids แคโรทีนอยด์ในกลุ่มนี้เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเป็น 2 แบบ คือ
 - Secocarotenoids เป็นแคโรทีนอยด์ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่วงแหวน แต่ไม่เกิดการสูญเสียคาร์บอนอะตอม
 - Apocarotenoids เป็นแคโรทีนอยด์ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สายพันธะ และมีการสูญเสียคาร์บอนอะตอม ทำให้สายของโครงสร้างโมเลกุลมีจำนวนคาร์บอนสั้นลง
- ค. Nor-carotenoids เกิดการสูญเสียคาร์บอนอะตอมของโมเลกุล แต่ไม่ทำลายพันธะของโครงสร้าง
- ง. Higher carotenoids เป็นกลุ่มของแคโรทีนอยด์ที่มีคาร์บอนอะตอม 45 หรือ 50 อะตอม

การแบ่งแคโรทีนอยด์ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่นั้น จะเห็นได้ว่ากลุ่มของออกซิเจนเตดแซนโทฟิลล์ มีความเป็นประจุ (polar) มากกว่ากลุ่มไฮโดรคาร์บอนแคโรทีน ดังนั้นจากสมบัตินี้เองเมื่อต้องการแยกแคโรทีนอยด์ 2 กลุ่มนี้ออกจากกัน ในการสกัดจึงใช้ตัวทำละลายที่มีความเป็นประจุเข้ามาใช้เพื่อแยกสารทั้ง 2 กลุ่ม หากตัวทำละลายมีความเป็นประจุมากขึ้นสารในกลุ่มของแคโรทีน ก็ จะละลายในตัวทำละลายได้น้อยลง

แคโรทีนอยด์เป็นสารที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยากระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) ของพืช โดยแคโรทีนอยด์จะอยู่รวมกับคลอโรฟิลล์ ในรูป pigment-protein complex ใน

คลอโรพลาสต์ (chloroplast) ซึ่งแคโรทีนอยด์เมื่ออยู่ร่วมกับโปรตีน จะทำให้ทั้งแคโรทีนอยด์และโปรตีนมีความเสถียรมากขึ้น แคโรทีนอยด์ที่อยู่ในเซลล์ของพืชนั้นมีหน้าที่ ดังนี้

1. ช่วยในกระบวนการสังเคราะห์แสง คือแคโรทีนอยด์จะช่วยดูดกลืนแสง (light-harvesting) ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่คลอโรฟิลล์ไม่สามารถดูดกลืนได้ แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานและถ่ายเทให้แก่คลอโรฟิลล์ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงต่อไป

2. ช่วยป้องกันและปกป้องเซลล์ของพืชจากการถูกทำลาย เนื่องจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสงจะมีพลังงานเกิดขึ้นสูงมากและเกิดขึ้นรวดเร็ว แต่คลอโรฟิลล์ไม่สามารถดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นนี้ได้หมดทันที พลังงานที่มากเกินไปจะทำลายเซลล์ของพืช ซึ่งแคโรทีนอยด์จะไปรับพลังงานที่เกินนี้ แล้วจึงนำไปให้กับคลอโรฟิลล์ หรือไปรวมกับ singlet oxygen (1O_2) นอกจากนี้แคโรทีนอยด์ยังช่วยป้องกันการเกิด photo-oxidation ไม่ให้ 1O_2 ไปทำลายเซลล์พืช

หน้าที่ของแคโรทีนอยด์ที่ช่วยป้องกันการถูกทำลายของเซลล์เนื่องจากแสง จึงมีการนำมาใช้ประโยชน์ โดยนำเบต้า-แคโรทีนมาเป็นส่วนประกอบในลิปสติก สำหรับใช้ทาป้องกันแสงแดด (Wilhelm and Helmut, 1999) สำหรับในคนและสัตว์นั้นไม่สามารถผลิตสารแคโรทีนอยด์ได้ แต่สามารถดูดซึมเอาสารนี้จากอาหารที่บริโภคเข้าไปสู่ภายในร่างกายได้

แหล่งของแคโรทีนอยด์ (อนุสรณ์และสุรศักดิ์, 2534 ; กัณณพนต์, 2538 ; อนุตตราและบุญตา, 2540)

นอกจากจะพบแคโรทีนอยด์ในพืชและสัตว์แล้ว ยังสามารถพบได้ในจุลินทรีย์ ได้แก่ แบคทีเรีย รา และสาหร่ายอีกด้วย แคโรทีนอยด์พบได้หลายลักษณะ ดังนี้

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

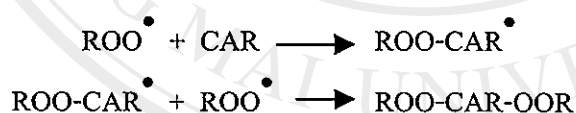
ประโยชน์ของสารแคโรทีนอยด์

1. เป็นสารสี เนื่องจากโครงสร้างของแคโรทีนอยด์มี conjugated double bonds เรียกว่า chromophore ทำให้แคโรทีนอยด์แต่ละชนิดดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแตกต่างกัน จึงมีผลต่อสีที่ปรากฏของผลไม้ที่มีสารแคโรทีนอยด์เป็นส่วนประกอบ โดยสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์จะถูกนำไป

ใช้เป็นสีผสมอาหาร ตัวอย่างเช่น เบต้า-แคโรทีน เบต้า-อะโป-8'-แคโรทีนอล (β -apo-8'-carotenal) แซนโทฟิลล์ และแคนทาแซนทีน (canthaxanthin) ในสหรัฐอเมริกาอนุมัติให้ใช้สารทั้ง 4 ชนิดนี้ผสมในอาหารได้ (Gordon and Bauernfeind, 1982) ซึ่งสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ให้สีเหลือง-ส้ม และส้ม-แดง แก่ผลิตภัณฑ์อาหาร

ลักษณะของแคโรทีนอยด์ที่ใช้เป็นสีผสมอาหาร จะอยู่ในรูปสารละลายในน้ำมันหรือน้ำ ตัวอย่างอาหารที่ใช้ เช่น ผลิตภัณฑ์เนย มาการีน และผลิตภัณฑ์ขนมอบ เป็นต้น และอาจเป็นสารที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ ตัวอย่างอาหารที่ใช้ เช่น เครื่องดื่ม และไอศกรีม (นิธิยา, 2545)

2. เป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidant) เนื่องจากโครงสร้างของแคโรทีนอยด์มีพันธะคู่ที่สายของโมเลกุล ทำให้แคโรทีนอยด์มีความสามารถจับกับ singlet oxygen (1O_2) จึงป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากออกซิเจนได้ โดยสารที่มีพันธะคู่มากยิ่งจับกับออกซิเจนได้ดี เช่น ไลโคพีน มีพันธะคู่ 11 คู่ จะจับ 1O_2 ได้ดีกว่าเบต้า-แคโรทีน ที่มีพันธะคู่ 9 คู่ นอกจากนี้โครงสร้างของแคโรทีนอยด์ที่มีหมู่อนุพันธ์ของออกซิเจนมาเกาะ จะมีความสามารถในการจับ peroxy radical (ROO^\bullet) ตัวอย่างเช่น ไวโอลาแซนทีนซึ่งมีหมู่อนุพันธ์กลุ่มคีโตและไฮดรอกซิลมาเกาะ จะจับกับ peroxy radical ได้ดีกว่าเบต้า-แคโรทีนซึ่งไม่มีหมู่อนุพันธ์ในโครงสร้างโมเลกุล (รูปที่ 2.13) จากสมบัติดังกล่าว ทำให้มีการนำสารกลุ่มแคโรทีนอยด์มาใช้เป็นส่วนประกอบ หรือเคลือบผิวอาหาร เพื่อป้องกันการออกซิเดชัน ทำให้อาหารมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น (Borenstein, 1979)



รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาระหว่างแคโรทีนอยด์กับ peroxy radical

(ที่มา : Britton, 1995)

3. เป็นสาร provitamin A กลุ่มของแคโรทีนอยด์ที่พบในปัจจุบันมีมากถึง 600 ชนิด แต่มีประมาณ 50-60 ชนิดเท่านั้นที่สามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ (ตารางที่ 2.5) และแคโรทีนอยด์ที่พบปริมาณมากในอาหารมี 4 ชนิด ได้แก่ แอลฟา-เบต้า- และแกมมา-แคโรทีน (α -, β - และ γ -carotene) และเบต้า-คริปโตแซนทีน (β -cryptoxanthin) (Ball, 1992)

4. ลดอัตราการเกิดโรค สืบเนื่องจากสมบัติต่างๆ ของสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ จึงมีการวิจัยถึงชนิดของสารแคโรทีนอยด์เพื่อใช้ในการรักษาโรค ตัวอย่างเช่น พบว่าเบต้า-แคโรทีนช่วยในการลดอัตราการเป็นมะเร็งปอดของกลุ่มผู้เสี่ยงต่อโรคนี (Wilhelm and Helmut, 1999) นอกจากนี้ยังพบว่าแคโรทีนอยด์มีอิทธิพลต่อระบบภูมิคุ้มกัน ควบคุมการเจริญและเปลี่ยนแปลงของเซลล์ มีอิทธิพลใน gap junction communication (Hughes *et al.*, 1997) และยังช่วยป้องกันการเจ็บป่วยจากโรคหัวใจอีกด้วย (Vince *et al.*, 1999)

ตารางที่ 2.5 สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์เมื่อเปรียบเทียบกับ activity ของวิตามินเอ

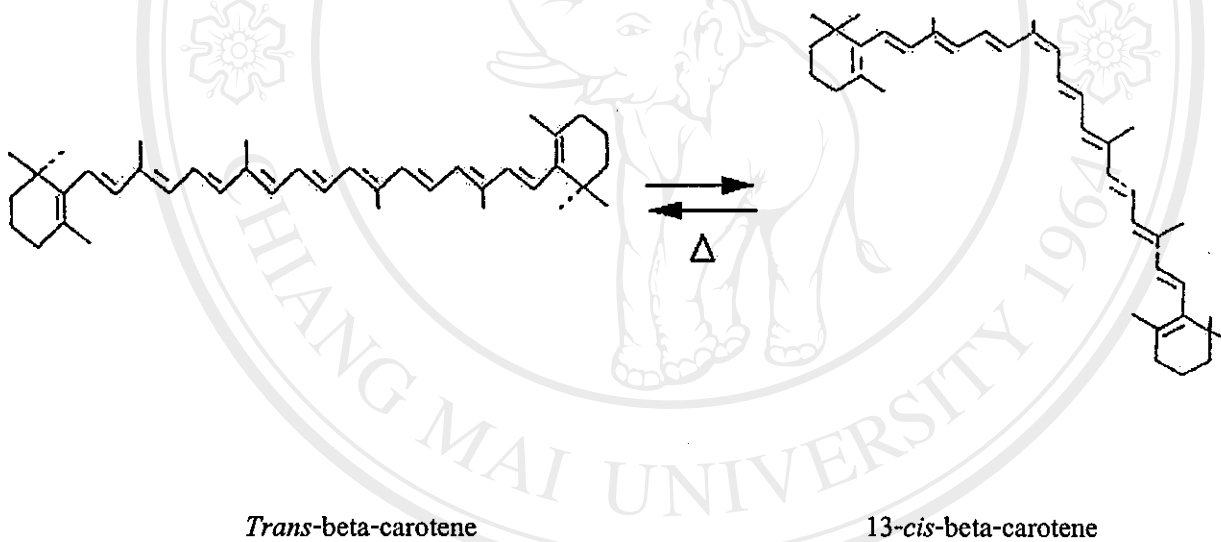
แคโรทีนอยด์	Activity (%)
all- <i>trans</i> - β -carotene	100
9- <i>cis</i> - β -carotene	38
13- <i>cis</i> - β -carotene	53
all- <i>trans</i> - α -carotene	53
9- <i>cis</i> - α -carotene	13
13- <i>cis</i> - α -carotene	16
all- <i>trans</i> -cryptoxanthin	57
9- <i>cis</i> -cryptoxanthin	27
15- <i>cis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

(ที่มา : กัณณพนต์, 2538)

การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์

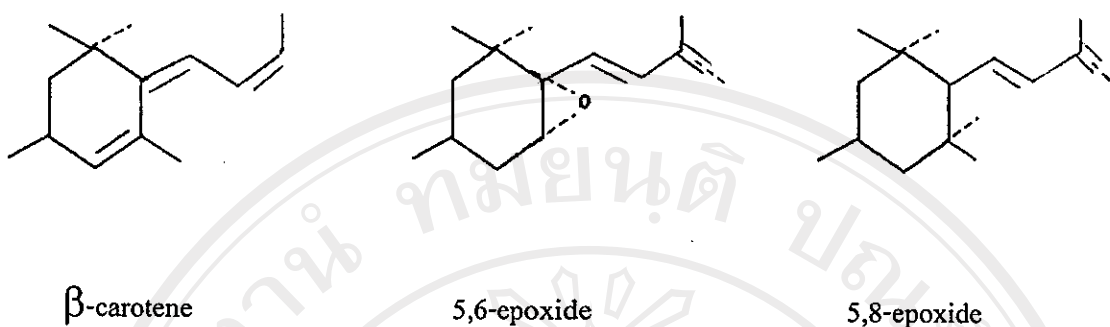
1. เกิดจากปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) ปฏิกิริยานี้เกิดจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้
 - ก. ความร้อน แคโรทีนอยด์ที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นรูป *tran* form หากได้รับแสงและมีความร้อนหรือรังสี จะทำให้โครงสร้างเกิดการบิดตัวไป 180 องศา เปลี่ยนเป็นรูป *cis* form

(รูปที่ 2.14) ซึ่งรูป *cis* form จะไม่ค่อยเสถียร มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสั้นลง และมี molecular extinction coefficient ต่ำ สีที่ปรากฏจะอ่อนกว่า *trans* form การเกิด thermal isomerization เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต โดยอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียแคโรทีนอยด์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนจะมีผลต่อการสูญเสียแคโรทีนอยด์มากกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงไม่ควรให้ความร้อนแบบ high temperature short time และควรการเก็บรักษาตัวอย่างอาหารที่มีสารแคโรทีนอยด์ที่อุณหภูมิต่ำ จะช่วยชะลอการสูญเสียแคโรทีนอยด์ไว้ได้ Lisiewska and Kmiecik (2000) รายงานว่าการเก็บรักษาขึ้นมะเขือเทศที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียสสูญเสียเบต้า-แคโรทีนและสารประกอบอื่นๆ น้อยกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเท่ากัน



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างโมเลกุลของเบต้า-แคโรทีนเนื่องจากความร้อน¹
(ที่มา : สิริมา, 2541)

ข. *ความเป็นกรด* ในสภาพเป็นกรดทำให้เบต้า-แคโรทีน เปลี่ยนเป็น epoxide isomer ซึ่งเกิดจากการจับตัวของออกซิเจนที่พันธะคู่ของวงแหวนในโครงสร้าง เกิดเป็น 5,6-epoxide ซึ่งมีสีจางกว่าเบต้า-แคโรทีน (รูปที่ 2.15) (อนุสรณ์และสุรศักดิ์, 2534; กัณณพนต์, 2538; อนุตตราและบุญตา, 2540)



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาการเกิด Epoxide isomerism
(ที่มา : อนุสรณ์และสุรศักดิ์, 2534)

2. เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ก. ออกซิเจน เมื่อแคโรทีนอยด์สัมผัสกับอากาศ ที่ตำแหน่งพันธะคู่ในโครงสร้างของโมเลกุล จะไปจับกับออกซิเจนเกิดเป็นสีน้ำตาลของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) สารประกอบคาร์บอนิล และสารระเหยอื่นๆ ปฏิกิริยานี้เป็น direct oxidation อัตราการสูญเสียแคโรทีนอยด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ไม่ได้ขึ้นกับออกซิเจนเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มของแสง และความร้อนเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วย การเก็บรักษาสารแคโรทีนอยด์ในสถานะที่มีออกซิเจน เบต้า-แคโรทีนจะสูญเสียเป็นอันดับแรก แคนตาแซนทีนไวต่อการเกิดออกซิเดชันน้อยสุด และ apo-carotenal มีอัตราการสูญเสียเร็วที่สุด แต่ bixin ที่สกัดได้จาก annatto มีความเสถียรมากเมื่อเก็บรักษาไว้ในสถานะที่มีอากาศ

การป้องกันการออกซิเดชันจากออกซิเจน สามารถกระทำได้โดยการเติมสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) เช่น กรดแอสคอร์บิก และบิวทิลเลทไฮดรอกซีโทลูอิน (Butylated hydroxytoluen ; BHT) เป็นต้น หรือไม่ให้อาหารสัมผัสกับอากาศขณะเก็บรักษา เช่น ใช้น้ำมันเคลือบผิวหรือบรรจุก๊าซเฉื่อยในภาชนะบรรจุ หรือบรรจุแบบสุญญากาศ (อนุสรณ์และสุรศักดิ์, 2534 ; กัณณพนต์, 2538 ; อนุตตราและบุญตา, 2540)

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

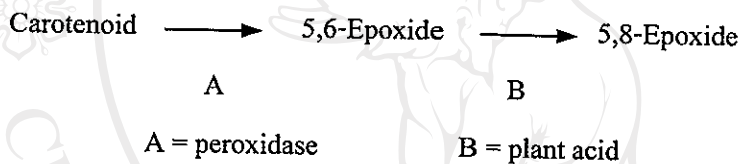
ค. การปนเปื้อนของโลหะ ไอออนของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้แคโรทีนอยด์เสื่อมสภาพ และถ้ามีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวรวมอยู่ด้วย การเสื่อมสลายจะยิ่งเร็วขึ้น ตัวอย่าง

เช่น โลหะทองแดงจะเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไลโคพีนให้เร็วขึ้น 3.5 เท่า เนื่องจากอิออนของทองแดงจะไปเร่งให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) เร็วขึ้น

ง. **แสงสว่าง** ปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากแสงสว่าง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี กลิ่น และรสชาติ การเกิดออกซิเดชันจากแสงสว่างจะรุนแรงมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนในอากาศด้วย

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

า. **เปอร์ออกซิเดส (Peroxidase : POD)** เอนไซม์นี้เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารแคโรทีนอยด์ทั้งทางตรงและทางอ้อม



การเสื่อมสภาพทางอ้อม คือ การเกิดออกซิเดชันของไขมัน ซึ่งมีผลกระทบทำให้แคโรทีนอยด์เกิดออกซิเดชันตามไปด้วย

การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเอนไซม์ในกลุ่มเปอร์ออกซิเดส ทำให้มีการวิจัยหาวิธีการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์นี้ เพื่อป้องกันการสลายตัวของแคโรทีนอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหาร ตัวอย่างเช่น การเก็บรักษา chive แบบไม่ลวกก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -20 และ -30 องศาเซลเซียส สามารถคงคุณภาพไว้ได้นาน 3 และ 6 เดือนตามลำดับ หากนำ chive ไปลวกที่อุณหภูมิ 94-96 องศาเซลเซียส นาน 90 วินาที ก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส สามารถป้องกันการสูญเสียวิตามินซี เบต้า-แคโรทีน และคลอโรฟิลล์ได้นาน 12 เดือน และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียสสามารถรักษาวิตามินซีได้ดีมาก (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 ภายหลังเก็บรักษานาน 9 เดือน มีการสูญเสียเบต้า-แคโรทีนเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ parsley ที่ไม่ได้ผ่านการลวกก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง (Lisiewska and Kmiecik, 1997) และ Sant' Ana et al. (1998) ได้ศึกษาการลวกแครอทด้วยวิธีการต่างๆ พบว่าการลวกแครอทด้วยน้ำโดยไม่ใช้

ความดันเป็นวิธีที่ดี และมีการสูญเสียแคโรทีนอยด์น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการลวกโดยใช้ไอน้ำ ใช้น้ำและความดัน และไม่ใช้น้ำ คือ ใช้ความชื้นในผลิตภัณฑ์

b. ไลปอกซิเดส (Lipoxidase) เอนไซม์นี้จะทำให้ไขมันเกิดอนุมูลอิสระ และอนุมูลอิสระของไขมันนี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแคโรทีนอยด์

c. ไลโปเปอร์ออกซิเดส (Liperoxidase) เอนไซม์นี้จะทำให้เกิดการสลายของแคโรทีนอยด์ต่อเมื่อมีเปอร์ออกไซด์ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวรวมอยู่ด้วย ซึ่งเกิดจากเอนไซม์ไลปอกซิเดส หรือเกิดจากการออกซิเดชันโดยอาศัยเอนไซม์

ด. น้ำ น้ำเป็นส่วนประกอบที่ช่วยให้เอนไซม์ทำงานได้ดี หากตัวอย่างถูกกำจัดน้ำออกไปบางส่วนจะทำให้เอนไซม์ทำงานได้ลดน้อยลง แต่การที่ไม่มีน้ำอยู่ในตัวอย่างเลยจะทำให้ผิวนอกของตัวอย่างมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศได้มากขึ้น และหากน้ำในตัวอย่างเหลือน้อยเกินไป จะทำให้เอนไซม์มีประสิทธิภาพมากขึ้น ที่สภาวะนี้เซลล์จะเกิดความเสียหายและตายลง เอนไซม์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารที่เกิดการออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในตัวอย่างที่มีน้ำอยู่น้อยจะเกิดการสูญเสียแคโรทีนอยด์ได้ง่าย (อนุสรณ์และสุรศักดิ์, 2534 ; กัณณพนต์, 2538 ; อนุตตราและบุญตา, 2540)

การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์

การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ที่เป็นส่วนประกอบทางเคมีในอาหาร วิธีที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่ คือ วิธี liquid chromatography โดยจะสกัดสารในกลุ่มของแคโรทีนอยด์ออกมาด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดมักเป็นตัวทำละลายผสม 2 ชนิดที่มีขั้ว (polar) มาก-น้อยแตกต่างกัน และจะต้องระวังในการเลือกใช้ตัวทำละลายบางชนิดเมื่อผสมกันแล้วอาจได้สารอื่นเกิดขึ้นได้ เช่น หากใช้คลอโรฟอร์มผสมกับเมทานอลในการสกัดจะเกิดเป็นกรดไฮโดรคลอริกขึ้น จึงไม่ใช้ตัวทำละลายละลาย 2 ชนิดนี้ผสมกันในการสกัดแคโรทีนอยด์

หลักการพื้นฐานของวิธี liquid chromatography คือ การให้สารที่ต้องการแยกอยู่ในรูปของสารละลาย โดยนำตัวอย่างมาผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลาย จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปผ่านสารดูดซับ (stationary phase) ซึ่งสารดูดซับจะอยู่ในรูปโคขึ้นกับชนิดของสารดูดซับและวิธี chromatography ที่ใช้ สารละลายตัวอย่างจะเคลื่อนที่ผ่านสารดูดซับ โดยมีตัวทำละลายพาเคลื่อนที่ไป (mobile phase) สารที่เป็นส่วนประกอบในสารละลายตัวอย่างชนิดใดที่ติดอยู่กับสารดูดซับได้ดี จะเคลื่อนที่ไปบนสารดูดซับได้ช้ากว่าสารที่ติดอยู่กับสารดูดซับได้ไม่ดี ดังนั้นสารประกอบที่ละลาย

อยู่ในสารละลายตัวอย่างจะแยกออกจากกันได้ ตามความสามารถในการจับอยู่กับสารดูดซับ วิธี liquid chromatography สามารถแบ่งออกเป็นได้หลายแบบ ได้แก่

1. Open Column Chromatography (OCC) เป็นการบรรจุสารที่สามารถแยกสารในกลุ่มของแคโรทีนอยด์ที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายมาแล้ว ตัวอย่างของสารดูดซับที่ใช้ในการบรรจุในคอลัมน์ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และ MgO-Hyflo Supercel ซึ่งการวิเคราะห์สารในกลุ่มของแคโรทีนอยด์ด้วยวิธีนี้จะแยกได้เพียงกลุ่มใหญ่ของแคโรทีนอยด์ คือ แคโรทีน และแซนโทฟิลล์ แต่วิธีนี้เป็นวิธีที่ยอมรับในการวิเคราะห์ตามวิธีของ AOAC (2002)

2. Thin Layer Chromatography (TLC) เป็นการนำสารดูดซับที่ใช้ในการแยกไปเคลือบบนแผ่นกระจก แล้วให้สารละลายตัวอย่างที่สกัดมาวิ่งไปบนแผ่นเคลือบ วิธีนี้สามารถจำแนกสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ได้ถึงไอโซเมอร์ของมัน ว่าเป็นชนิด α , β และ γ แต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่าอยู่ในรูปของรูป *trans* form หรือ *cis* form

3. High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ใช้หลักการในการแยกเหมือนกับ open column chromatography แต่วิธีนี้จะสามารถจำแนกชนิดของสารแคโรทีนอยด์ได้ละเอียดมาก ถึงระดับที่ สามารถแยกรูป *cis* และ *trans* form ได้

4. Gas Chromatography (GC) วิธีนี้ไม่นำมาใช้ในการแยกสารแคโรทีนอยด์ เนื่องจากสารแคโรทีนอยด์ที่แยกด้วยวิธีนี้จะไม่เสถียร

วิธีการแยกทั้ง 3 วิธีแรกจะต้องนำสารที่แยกได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง Spectrophotometer อีกครั้งหนึ่ง เพื่อวิเคราะห์ว่าสารที่แยกออกมาได้เป็นแคโรทีนอยด์ชนิดใด และมีปริมาณเท่าใด โดยใช้สมบัติที่ว่าสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์แต่ละชนิด จะสามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดแตกต่างกัน และตัวทำละลายต่างชนิดกันก็จะทำให้สารชนิดเดียวกันดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดได้แตกต่างกันด้วย (ตารางที่ 2.6)

นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีทางเคมีกายภาพ (Physico-chemical methods) ตัวอย่างเช่น Mass spectrometry และ Nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy

ตารางที่ 2.6 ค่าการดูดแสงสูงสุด (λ_{max} ; nm) ของสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ในตัวทำละลายต่างชนิดกัน

แคโรทีนอยด์	λ_{max} (nm)	ตัวทำละลาย
เบต้า-แคโรทีน (β -carotene)	449	ปีโตรเลียมอีเทอร์
	450	เอทานอล
	452	อะซีโตน
	461	คลอโรฟอร์ม
แอลฟา-แคโรทีน (α -carotene)	462	ปีโตรเลียมอีเทอร์
	460	เอทานอล
	461	อะซีโตน
	475	คลอโรฟอร์ม
ไลโคพีน (lycopene)	470	ปีโตรเลียมอีเทอร์
	472	เอทานอล
	474	อะซีโตน
	484	คลอโรฟอร์ม

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Britton, 1996)

การแช่เยือกแข็งผลไม้

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

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 ความหนืด และ redox potential ของเหลวส่วนที่ยังไม่แข็งตัว ขณะที่อุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ ตัวถูกละลายแต่ละชนิดอาจถึงจุดอิ่มตัวและบางชนิดก็อาจตกผลึกได้ อุณหภูมิที่เกิดผลึกของตัวถูกละลายแต่ละชนิดจะสมมูลกับของเหลวส่วนที่ไม่แข็งตัว และส่วนที่เป็นน้ำแข็ง เรียกว่า eutectic temperature ตัวอย่างเช่น ตัวถูกละลายที่เป็นน้ำตาลกลูโคสจะมี eutectic temperature เป็น -5 องศาเซลเซียส น้ำตาลซูโครสเป็น -14 องศาเซลเซียส โซเดียมคลอไรด์เป็น -21.13 องศาเซลเซียส และแคลเซียมคลอไรด์เป็น -55 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม ในอาหารแต่ละชนิดจะมีตัวถูกละลายผสมของสารหลายชนิด ทำให้หาค่า eutectic temperature ที่แน่นอนได้ยาก (นิธิยา, 2544)

ระหว่างการแช่เยือกแข็ง ความร้อนจะถูกพาจากภายในออกสู่ผิวนอกของชิ้นอาหารและถูกกำจัดออกไปด้วย freezing medium ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อน ได้แก่

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

ขั้นตอนการเตรียมผลไม้ก่อนแช่เยือกแข็ง

1. การคัดวัตถุดิบ (sorting/inspection) วัตถุดิบที่จะนำมาใช้จะต้องเลือกให้มีคุณภาพเหมาะสม เช่น เลือกวัตถุดิบที่มีคุณภาพดีไม่มีตำหนิหรือเน่าเสีย ขนาด และระยะการสุกเท่าๆ กันจึงนำไปแช่เยือกแข็ง
2. การล้างทำความสะอาด (cleaning/washing) เป็นการกำจัดเอาสิ่งสกปรกที่ผิวของวัตถุดิบออก และยังช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ผิวออกได้น้อยลงได้อีกด้วย
3. ปอกเปลือก (peeling) แยกเอาส่วนเปลือก หรือส่วนที่บริโภคไม่ได้ออก นอกจากนี้การปอกเปลือกออกยังช่วยทำให้อัตราการแช่เยือกแข็งเร็วขึ้น เนื่องจากการปอกเปลือก หรือเอาส่วนที่บริโภคไม่ได้ออก จะช่วยลดความต้านทานของอัตราการแช่เยือกแข็ง
4. การลดขนาด (cutting/shredding) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดเหมาะสมก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง หรือก่อนที่จะผ่าน ไปขั้นตอนอื่นๆ

5. การลวก (blanching) เป็นการใช้ความร้อนเพื่อช่วยกำจัดเอนไซม์ในผลไม้ ซึ่งมีผลต่อการเสื่อมเสียของผลไม้ให้ลดน้อยลงได้ ป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในเนื้อผลไม้ ช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ ช่วยให้มีสีความคงตัว และลดการเกิดการหดตัวที่ผิวของของชิ้นผลิตภัณฑ์ภายหลังจากการแช่เยือกแข็งของผลไม้

การลวกผลไม้ในน้ำร้อนยังอาจนำมาใช้ในการปกปิดเปลือกผลไม้บางชนิดได้ เช่น การปกปิดเปลือกของผลแอฟริคิโอท แต่ไม่นิยมทำการลวก ในขั้นหลังจากปกปิดเปลือกแล้ว เนื่องจากจะทำให้เนื้อสัมผัสของผลไม้นิ่มลง การยับยั้งการเสื่อมเสียและการเกิดสีน้ำตาลในเนื้อผลไม้ส่วนใหญ่ มักนิยมใช้สารเคมีเป็นตัวยับยั้ง ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก กรดซิตริก และกรดอะซิติก เป็นต้น หรือการใช้สารเคมีตั้งแต่ 2 ชนิดผสมกัน (นิธิยา, 2544)

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีระหว่างการเก็บรักษาผลไม้แช่เยือกแข็ง

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

1. เนื้อสัมผัส การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็งจะเกิดขึ้นระหว่างการแช่เยือกแข็งและระหว่างการเก็บรักษา เช่น ระหว่างการแช่เยือกแข็งเซลล์ของเนื้อผลไม้จะแตกออกเนื่องจากน้ำภายในเซลล์กลายเป็นผลึกน้ำแข็ง ซึ่งผลึกน้ำแข็งนี้จะมีขนาดใหญ่ หรือเล็กขึ้นอยู่กับอัตราการแช่เยือกแข็งของผลไม้ที่เกิดขึ้น โดยหากอัตราการแช่เยือกแข็งช้า (slow freezing) ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ และจะไปทำลายเซลล์เนื้อผลไม้ให้เสียหายมาก หากอัตราการแช่เยือกแข็งเร็ว (quick freezing) ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก เซลล์เนื้อผลไม้จะเสียหายน้อย (รูปที่ 2.16) ซึ่งอัตราการแช่เยือกแข็งที่เกิดขึ้นจะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนของชิ้นผลไม้ โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาจากวิธีการที่ใช้ในการแช่เยือกแข็ง ชนิดและขนาดของผลไม้ และขั้นตอน pre-freezing treatment การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสของผลไม้แช่เยือกแข็งระหว่างการเก็บรักษานั้น เนื่องจากเกิด recrystallization คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงของจำนวน ขนาด รูปร่าง และ/หรือการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งขึ้นใหม่ หลังจากน้ำในผลิตภัณฑ์แข็งตัวสมบูรณ์แล้ว ทำให้ผลิตภัณฑ์มีผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่เกิดขึ้น ส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้

2. สี เกิดจากการสลายตัวของสารสีที่เป็นส่วนประกอบของผลไม้ และเกิดสีน้ำตาลขึ้นที่เนื้อผลไม้ เนื่องมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่าพีเอช) ของผลไม้ขณะแช่เยือกแข็ง และระหว่างการเก็บรักษา การทำงานของเอนไซม์ในเนื้อผลไม้ และปฏิกิริยาออกซิเดชันขณะเก็บรักษา

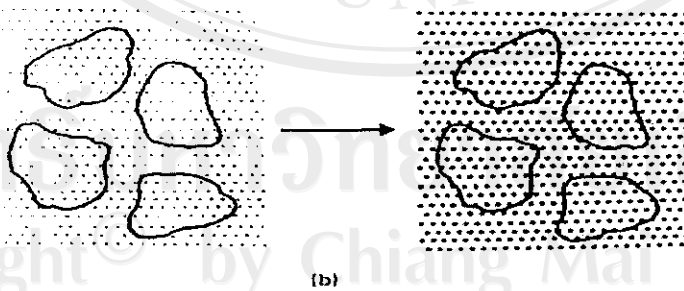
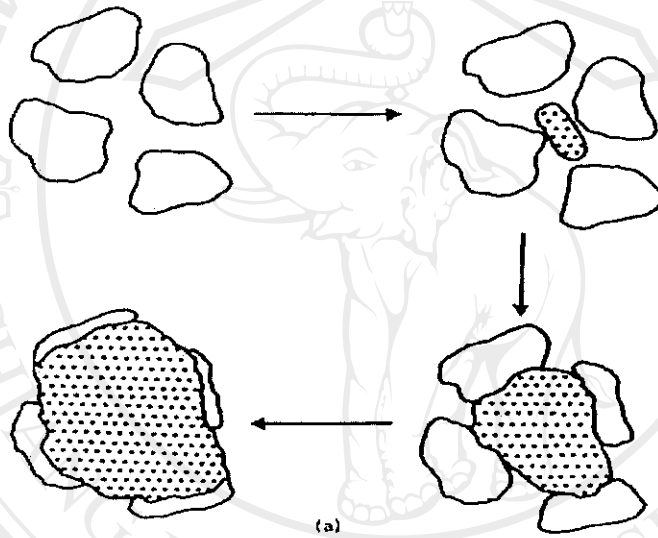
การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

1. การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เกิดขึ้นที่ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็ง ระหว่างการแช่เยือกแข็ง และระหว่างการเก็บรักษา ในขั้นตอนการเตรียมผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็ง สารอาหารประเภทวิตามินและส่วนประกอบทางเคมีที่ละลายได้ในน้ำ จะสูญเสียไปในขั้นตอนการล้าง และ/หรือการยับยั้งเอนไซม์ ในขั้นตอนระหว่างการแช่เยือกแข็ง น้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายของส่วนประกอบทางเคมีในเนื้อผลไม้จะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำแข็ง ทำให้ส่วนประกอบทางเคมีเกิดการตกตะกอนหรือเสียดสภาพไป และระหว่างการเก็บรักษาจะมีการสูญเสียส่วนประกอบทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากในเนื้อผลิตภัณฑ์มีจุลินทรีย์เกิดขึ้น ทำให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบทางเคมีภายในเนื้อผลไม้ได้ง่าย และเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ภายในเนื้อผลไม้ ถึงแม้ว่าจะเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิต่ำก็ตาม แต่การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการก็ยังเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะพวกวิตามินซึ่งสูญเสียได้ง่าย ตัวอย่างเช่น ผลไม้ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 12 เดือน สูญเสียเบต้า-แคโรทีนมากที่สุดถึง 78% และวิตามินซีสูงถึง 50% (นิริยา, 2544) การเก็บรักษามะเขือเทศที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียเบต้า-แคโรทีนและส่วนประกอบทางเคมีอื่นๆ ภายในเนื้อมะเขือเทศน้อยกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเท่ากัน ดังนั้นควรเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำๆ เพื่อให้มีการสูญเสียส่วนประกอบทางเคมีให้น้อยที่สุด (Lisiewska and Kmiecik, 2000)

2. การสลายตัวของสารสีและการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อผลไม้ ในระหว่างการแช่เยือกแข็ง ส่วนประกอบทางเคมีจะมีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในผลไม้เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และส่งผลต่อสารสี ตัวอย่างเช่น สารสีแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนเป็นสีแดงในสภาพเป็นกรด และเป็นสีน้ำเงินในสภาพเป็นด่าง และระหว่างการเก็บรักษาสารสีคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์จะเกิดการสลายตัวขึ้น อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และ/หรือถูกเอนไซม์ในผลไม้ทำลาย และการเกิดสีน้ำตาลทั้งก่อนการแช่เยือกแข็ง และระหว่างการเก็บรักษาผลไม้แช่เยือกแข็ง เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอล และจากการทำงานของเอนไซม์ ได้แก่ โพลีฟีนอลออกซิเดส และเปอร์ออกซิเดส (Skred, 1996)

3. การเปลี่ยนแปลงของรสชาติและกลิ่น เนื่องจากระดับของส่วนประกอบทางเคมีของผลไม้มีการเปลี่ยนแปลงไป ย่อมส่งผลกระทบต่อรสชาติและกลิ่นของผลไม้ให้เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยกลิ่นของผลไม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสได้ (Skred, 1996)

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของผลไม้แช่เยือกแข็งที่เป็นปัญหา คือ การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ คือ การสูญเสียวิตามินในเนื้อผลไม้ และการเปลี่ยนแปลงของสารสี ทำให้สีของผลไม้ที่ปรากฏมีสีเปลี่ยนไป และการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อผลไม้ ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงนี้ 2 ชนิด คือ โพลีฟีนอลออกซิเดส และเปอร์ออกซิเดส ซึ่งหากยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทั้งสองชนิดนี้ได้ จะช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะในเนื้อมะม่วง ดังนั้นการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจะช่วยป้องกันการสูญเสียแคโรทีนอยด์ในเนื้อมะม่วงได้ (Lisiewska and Kmiecik, 1997 and 2000)



(a) การแช่เยือกแข็งแบบช้า
(b) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

รูปที่ 2.16 ลักษณะของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งแตกต่างกัน

(ที่มา : Fellow, 1997)

วิธีการป้องกันการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกิจกรรมของเอนไซม์

สารเคมีหลายชนิดมีรายงานว่าสามารถช่วยยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ได้ ตัวอย่างเช่น

1. กรดแอสคอร์บิก นอกจากจะช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้แล้ว กรดแอสคอร์บิก ยังเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันได้อีกด้วย Saper and Ziolkowski (1987) ใช้สารละลายกรดแอสคอร์บิกความเข้มข้น 0.8-1.6% แช่เนื้อแอปเปิล นาน 90 นาที ช่วยชะลอการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อแอปเปิลให้ช้าลงได้ และพบว่าการแช่เนื้อฝรั่งในสารละลายกรดแอสคอร์บิกที่ความเข้มข้นสูงชัน และใช้เวลาในการแช่นาน จะช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อฝรั่งและลดกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ (บัวหลวง, 2545)

2. กรดซิตริก เนื่องจากกรดแอสคอร์บิกมีราคาแพง จึงมีการนำกรดชนิดอื่นมาใช้ทดแทน เช่น กรดซิตริกเป็นกรดที่พบได้ในผลไม้ทั่วไปอยู่แล้ว จึงมีการนำมาช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ตัวอย่างเช่น การใช้สารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 10% ป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของผักกาดหอมหั่นชิ้น (Castaner *et al.*, 1996)

3. สารอื่นๆ เช่น กรดอะซิติก EDTA และน้ำตาล มีการใช้สารเหล่านี้มาผสมกันเพื่อป้องกันการเกิดสีน้ำตาลอีกด้วย ทำให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเอนไซม์ได้ดีขึ้น เช่น การใช้สารละลายผสมของกรดซิตริก (1.0 หรือ 2.5%) กับกรดแอสคอร์บิก (0.25%) ป้องกันการเปลี่ยนแปลงสีผลของมะเฟืองผ่านชิ้น (Weller *et al.*, 1997)