บทที่ 2
เอกสารที่เกี่ยวข้องและงานวิจัย

2.1 มะม่วง

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae มะม่วงเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ สูงประมาณ 10–30 เมตร ใบเดี่ยวสีเขียว ขอบใบเรียบ ฐานใบมน ปลายใบแหลม ออกดอกเป็นช่อ กลีบดอกมี 5 กลีบ เกสรสีแดง ออกดอกช่วงเดือนธันวาคมถึงกุมภาพันธ์ ช่วงฤดูร้อนจะติดผล ผลมีขนาดยาวประมาณ 5–20 เซนติเมตร กว้าง 4–8 เซนติเมตร ผลดิบเปลือกมีสีเขียว เมื่อผลสุกเปลือกจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง หรือเหลืองส้ม มีเมล็ดภายใน 1 เมล็ด (วีรจินต์, 2552) มะม่วงเป็นผลไม้เขตร้อนชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ และเป็นที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมะม่วงมีรสชาติดี มีกลิ่นหอมและมีคุณค่าทางโภชนาการ (ภูวนาท , 2543) ดังตารางที่ 2.1 และตลาดต่างประเทศมีความต้องการสูง ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมะม่วงรวมทุกพันธุ์ มากกว่า 2.2 ล้านไร่ (ตารางที่ 2.2) มีพันธุ์มะม่วงต่างๆ มากมายหลายพันธุ์ โดยประมาณกันว่ามีอยู่ประมาณ 300 กว่าพันธุ์ แบ่งเป็นพันธุ์มะม่วงที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศไทย มากกว่า 200 พันธุ์ ส่วนที่เหลือเป็นพันธุ์มะม่วงที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ แต่พันธุ์ที่นิยมปลูกกันเป็นการค้าในขณะนี้มีอยู่ ประมาณ 15-20 พันธุ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความนิยมในการบริโภคทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ หากจำแนกผลมะม่วงตามรูปแบบการบริโภค สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. มะม่วงกลุ่มที่บริโภคผลดิบ เป็นผลมะม่วงที่ใช้บริโภคผลดิบ คือ ผลแก่เต็มที่แต่ยังดิบอยู่เปลือกมีสีเขียว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ พันธุ์ที่นิยมปลูกกันเป็นการค้า คือ เขียวเสวย พิมเสน แรด ฟ้าลั่น และหนองแซง (กรมวิชาการเกษตร, 2545; ประเสริฐ, 2548)

2. มะม่วง กลุ่มที่บริโภคผลสุก เป็นผลมะม่วง ที่ผลดิบมีรสเปรี้ยวมาก เมื่อผลสุกมีรสหวานเก็บเกี่ยวผลจากต้น เมื่อผลแก่เต็มที่แล้วนำไปบ่มให้สุกจึงมีคุณภาพดี มีรสหวานหอม พันธุ์ที่นิยมปลูกเป็นการค้า คือ น้ำดอกไม้ หนังกลางวัน อกร่อง ทองดำ โชคอนันต์ พิมเสนแดง ศรีสยาม มหาชนก และนวลจันทร์ (กรมวิชาการเกษตร, 2545; ประเสริฐ, 2548; นฤมล, 2553)

3. มะม่วงกลุ่มที่ใช้แปรรูป เป็นผลมะม่วงที่ออกผลจำนวนมาก ผลแก่จะมีรสเปรี้ยว ผลแก่จัดจะมีรสมันออกเปรี้ยว เมื่อผลสุกจะมีรสหวานอมเปรี้ยว สามารถนำผลมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายอย่าง เช่น มะม่วงกวน มะม่วงดอง แยมมะม่วง ไวน์มะม่วง มะม่วงตากแห้ง มะม่วงบด น้ำมะม่วง และเนื้อมะม่วงแช่เยือกแข็ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลมะม่วงที่ไม่สามารถนำมาแปรรูป เป็นผลิตภัณฑ์ได้ทุกพันธุ์ ผลิตภัณฑ์มะม่วงบางชนิดต้องการพันธุ์มะม่วงที่มีลักษณะเฉพาะ เช่น มะม่วงดอง ต้องการผลมะม่วงที่มีเนื้อแน่น คือ มะม่วงแก้ว น้ำมะม่วงต้องทำจากมะม่วงพันธุ์สามปี ไวน์มะม่วงที่ทำจากมะม่วงน้ำดอกไม้ และมหาชนก จึงจะมีกลิ่นหอมชวนดื่ม เป็นต้น พันธุ์ที่นิยมปลูกกันเป็นการค้า คือ พันธุ์แก้วชนิดต่างๆ เช่น แก้วดำ หรือแก้วแดง แก้วขาว แก้วเขียว และแก้วจุก พิมเสน และพันธุ์อื่นๆ เช่น สามปี หรือสามฤดู และตลับนาก (กรมวิชาการเกษตร, 2545; ประเสริฐ, 2548)

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของผลมะม่วง

คุณค่าทางโภชนาการ	**ปริมาณสาร**
พลังงาน (กิโลแคลอรี/100 กรัม)	70.0
คาร์โบไฮเดรต (กรัม/100 กรัม)	17.0
โปรตีน (กรัม/100 กรัม)	0.5
ไขมันทั้งหมด (กรัม/100 กรัม)	1.0
เส้นใย (กรัม/100 กรัม)	4.5
วิตามินซี (มิลลิกรัม/ กรัม)	30.5
วิตามินเอ (มิลลิกรัม/ กรัม)	25.5
วิตามินอี (มิลลิกรัม/ กรัม)	7.5
วิตามินเค (มิลลิกรัม/ กรัม) โพแทสเซียม (มิลลิกรัม/	3.5
กรัม)	3.0
แคลเซียม (มิลลิกรัม/ กรัม)	1.0
ทองแดง (มิลลิกรัม/ กรัม)	12.0
บีตา-แคโรทีน (ไมโครกรัม/100 กรัม)	445.0
แอลฟา-แคโรทีน (ไมโครกรัม/100 กรัม)	17.0

(ที่มา : USDA National Nutrient Database, 2009)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

นอกจากนี้ยังจำแนกมะม่วงตามแหล่งที่มาของสายพันธุ์ออกได้เป็น 2 กลุ่มสายพันธุ์ คือ

1. มะม่วงกลุ่มอินเดีย เป็นมะม่วงที่พบในตอนเหนือของประเทศอินเดีย และปากีสถาน ปลูกมากในรัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา และเม็กซิกัน มะม่วงกลุ่มนี้มีลักษณะเด่นคือ เมล็ดที่เพาะจะให้ต้นกล้า 1 ต้นต่อเมล็ด เปลือกของผลมีสีแดง สีม่วงส้ม ได้แก่ มะม่วงพันธุ์อัลฟองโซ เออร์วินและเฮเดน

ตารางที่ 2.2 พื้นที่ปลูกรวม ผลผลิตรวม และราคาของผลมะม่วงทางการค้าบางพันธุ์ในประเทศไทย

พันธุ์	พื้นที่ปลูกรวม (ไร่)	ผลผลิตรวม (ตัน)	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)
เขียวเสวย	598,287	326,141	20.11
แก้ว	557,691	446,341	6.15
น้ำดอกไม้	351,295	217,656	18.28
อกร่อง	163,838	127,724	12.60
แรด	84,014	54,691	13.68
หนังกลางวัน	67,182	38,812	14.15
หนองแซง	64,570	36,183	14.03
ทองดำ	48,167	32,066	2.99
พิมเสนเปรี้ยว	45,419	37,665	8.05
โชคอนันต์	27,404	14,074	14.02
รวมทุกพันธุ์	2,220,807	1,461,773	13.71

(ที่มา : ธวัชชัย และคณะ, 2546)

2. มะม่วงกลุ่มอินโดจีน เป็นมะม่วงที่มีถิ่นปลูกอยู่ในแนวเส้นศูนย์สูตร ได้แก่ ประเทศไทย อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์ เป็นมะม่วงที่คนไทยรู้จักกันดี เมื่อนำมาเพาะเมล็ดจะได้ต้นกล้ามากกว่า 1 ต้นต่อเมล็ด ต้นกล้าที่ได้ส่วนมากจะตรงกับพันธุ์เดิม เปลือกของผลมีสีเขียวหรือสีเหลือง (ภูวนาท, 2543)

มะม่วงที่ปลูกเป็นการค้าในประเทศไทยจัดอยู่ในกลุ่มอินโดจีน มีลักษณะพิเศษ คือ เมื่อผลสุกเปลือกมีสีเหลืองทอง หรือเหลืองอมเขียว มีรสหวานจนถึงหวานจัด หรือหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย เนื้อนิ่ม เก็บรักษาได้ไม่นาน ทำให้ผลมะม่วงของไทยไม่สามารถพัฒนาสู่ตลาดส่งออกแข่งขันกับต่างประเทศได้ ผลมะม่วงที่ตลาดต่างประเทศนิยมบริโภค จะเป็นมะม่วงในกลุ่มอินเดีย ซึ่งผลค่อนข้างกลม เมื่อผลสุกผิวจะมีสีแดงจัดหรือเหลืองแดง รสชาติหวานอมเปรี้ยว (จุลภาค, 2542; จุลภาคและเฉลิมพล, 2543)

ลักษณะประจำพันธุ์ของมะม่วง

1. พันธุ์แก้ว เป็นพันธุ์พื้นบ้านของไทยที่รู้จักกันมาช้านาน แบ่งออกได้ 3 สายพันธุ์ด้วยกัน คือ แก้วขาวหรือแก้วทอง แก้วดำหรือแก้วแดง และแก้วจุก ผลมะม่วงแก้วขาวเมื่อผลดิบเปลือกจะมี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สีเหลือ งอมเขียวหรือสีขาวนวล เมื่อผลสุกเนื้อผลมีสีจางกว่าเนื้อมะม่วงแก้วดำ ส่วนพันธุ์แก้วดำ เปลือกผลดิบมีสีเขียวคล้ำ เนื้อผลสุกมีสีส้มแดง สำหรับพันธุ์แก้วจุกนั้นมีสีคล้ายๆ ทั้งแก้วขาวและแก้วดำ แตกต่างกันตรงที่ผลมีขนาดใหญ่กว่าและที่หัวมีจุก มะม่วงแก้ว สายพันธุ์ ที่ควรปลูกเป็นการค้า คือ มะม่วงแก้วจุก เพราะผลมีขนาดใหญ่ เปลือกหนา เนื้อหนา ให้ผลดก และเหมาะ สำหรับนำไปแปรรูป ขนาดผลเฉลี่ยยาว 9 เซนติเมตร กว้าง 6.1 เซนติเมตร และหนา 5.5 เซนติเมตร ผลรูปไข่ ที่ขั้วผลนูนขึ้นเล็กน้อย น้ำหนัก ผลประมาณ 200-300 กรัม ผลดิบเปลือกมีสีเขียวเข้มและหนา ปานกลาง เนื้อผลสีขาวหยาบ มีสตาร์ชมาก และรสเปรี้ยว ผลสุกเปลือกมีสีเหลือง เนื้อมีสีเหลืองเข้ม เนื้อแน่น และรสหวาน (ภูวนาท, 2543; อุไร, 2547; ประเสริฐ, 2548)

2. มะม่วงโชคอนันต์ เป็นพันธุ์ที่กำเนิดมาจากการเพาะเมล็ดมะม่วงสามปี ยังคงมีกลิ่นหอมของมะม่วงสามปีไว้ สามารถออกดอกได้ตลอดปี ผลรูปไข่ มีน้ำหนักผลประมาณ 300-400 กรัม เปลือกหนา เนื้อแน่น ผลดิบเปลือกมีสีเขียวอ่อน ผิวเรียบ รสชาติจืด เมื่อผลสุก เปลือกจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวอมส้ม เนื้อผลมีสีเหลืองเข้ม รสหวาน และมีเสี้ยนน้อย

3. พันธุ์เขียวเสวย ผลค่อนข้างใหญ่ มีน้ำหนักผลประมาณ 250-500 กรัม ลักษณะผลกลมเรียวยาว ปลายงอนเล็กน้อย ส่วนหัวผลใหญ่ หนาและเรียวลงสู่ส่วนปลาย ขนาดผลเฉลี่ยยาว 14.7 เซนติเมตร กว้าง 6.9 เซนติเมตร และหนา 6.4 เซนติเมตร ผลดิบมีสีเขียวเข้ม มีนวลสีขาวปกคลุม เมื่อผลดิบมีรสมัน และผลสุกมีรสหวานหอม

4. พันธุ์น้ำดอกไม้ ผลรูปไข่ ปลายแหลมผลมีขนาดปานกลางถึงใหญ่ ขนาดผลเฉลี่ยยาว 16 เซนติเมตร กว้าง 7.2 เซนติเมตร และหนา 6.9 เซนติเมตร น้ำหนักผล 280-300 กรัม ผลดิบผิวเปลือกสีเขียวนวล เนื้อแน่น และมีสีขาว รสเปรี้ยวจัด เมื่อผลแก่จัดมีรสมัน เมื่อผลสุกผิวมีสีเหลืองทอง เปลือกบาง ช้ำได้ง่ายและมักเป็นโรคแอนแทรกโนส รสหวานและมีกลิ่นหอม

5. พันธุ์มหาชนก ผลเรียวยาว คล้ายพันธุ์หนังกลางวัน แต่ปลายงอนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น มีน้ำหนักผล 300-600 กรัม เปลือกมีสีเขียวปนม่วงแดง เมื่อผลสุกมีสีเหลืองเข้ม หรือเหลืองอมแดง เล็กน้อย เนื้อมีเสี้ยนน้อย เหมาะสำหรับทำน้ำผลไม้ มีกลิ่นหอมมาก และรสชาติหวานหอม

6. พันธุ์หนังกลางวัน หรือ ทางภาคเหนือเรียกว่า มะม่วงงา บางแห่งเรียกว่า มะม่วงแขนอ่อน ผลมีขนาดปานกลางถึงใหญ่ ผลเรียวยาว ปลายโค้งงอนขึ้น เล็กน้อย ขนาดผลเฉลี่ยยาว 17.5 เซนติเมตร กว้าง 6.9 เซนติเมตร และหนา 6 เซนติเมตร มีน้ำหนักผลประมาณ 300-350 กรัม ผลดิบเปลือกมีสีเขียวเข้ม เนื้อสีขาวนวล เนื้อละเอียดกรอบ มีเสี้ยนน้อย รสเปรี้ยว เมื่อผลแก่จัดรสมัน อมเปรี้ยว สำหรับผลสุกเปลือกมีสีเหลืองทอง รสชาติหวานหอม อร่อย (ภูวนาท, 2543; อุไร, 2547; ประเสริฐ, 2548)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ดัชนีการเก็บเกี่ยวผลมะม่วง

ผลมะม่วงจะมีคุณภาพดีและเก็บรักษาได้นาน หากเก็บเกี่ยวในระยะที่มีความแก่บริบูรณ์ เพราะการเก็บเกี่ยวผลมะม่วงที่มีอายุอ่อนหรือยังไม่แก่บริบูรณ์ จะทำให้ได้ผลมะม่วงสุกที่มีคุณภาพต่ำ และเก็บรักษาได้ไม่นาน อาจเกิดการสุกที่ไม่เป็นไปตามธรรมชาติ ถ้าเก็บเกี่ยวช้าเกินไปจะทำให้ผลมะม่วงมีคุณภาพต่ำ เน่าเสียง่ายไม่เหมาะแก่การขนส่งระยะทางไกล (ดนัยและนิธิยา, 2548)

อายุการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม

อายุการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมของผลมะม่วงแต่ละพันธุ์แตกต่างกัน อายุการเก็บเกี่ยวผลมะม่วงแต่ละพันธุ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น แหล่งพื้นที่ปลูก ฤดูกาลที่มะม่วงออกดอกและติดผล การให้ปุ๋ย ความชื้นในดิน การตัดแต่งกิ่ง การใช้สารเคมี ตำแหน่งของผลในทรงพุ่ม การเก็บเกี่ยวผลที่อ่อนเกินไปมักจะทำให้ผลเหี่ยว เนื่องจากสูญเสียน้ำหนักเร็ว ทำให้บ่มสุกช้า ผลสุกมีรสเปรี้ยว อายุการวางจำหน่ายสั้นลง หากเก็บเกี่ยวผลมะม่วงที่แก่เกินไปจะทำให้เนื้อผลบริเวณติดกับเปลือกหุ้มเมล็ดสุกมากเกินไป เนื้อนิ่มเร็ว และผลบอบช้ำได้ง่าย กา รศึกษาระยะเวลาที่เหมาะ สมในการเก็บเกี่ยวผลมะม่วงสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การนับอายุผล การ วัดความถ่วงจำเพาะของผล ดูนวลที่ผิว และดูลักษณะของผล แต่วิธีที่นิยมใช้กันมากและทำได้ง่ายคือการนับอายุผล

1. การนับอายุผล การนับอายุของผลมะม่วงเป็นที่นิยมใช้เพื่อหา ระยะ ความแก่ที่เหมาะสมของผลมะม่วง อายุของผลอาจนับตั้งแต่วันที่ช่อดอกเริ่มบาน 50 เปอร์เซ็นต์หรือบานเต็มที่ วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก แต่จะต้องบันทึกอายุของผลที่เก็บเกี่ยวได้เป็นเวลาติดต่อกันมากกว่า 1 ฤดูกาลของการออกดอกติดผล เพื่อหาค่าเฉลี่ยที่แน่นอนจึงจะนำมาใช้ได้ผลดี เช่น มะม่วงเขียวเสวย นับอายุตั้งแต่เริ่มออกดอกถึงวันเก็บเกี่ยวประมาณ 110 วัน น้ำดอกไม้ 115 วัน หนังกลางวัน นับอายุตั้งแต่ดอกบานเต็มที่ ถึงวันเก็บเกี่ยวประมาณ 110-115 วัน ดังตารางที่ 2.3

2. ความถ่วงจำเพาะของผล เมื่อผลมะม่วงมีอายุมากขึ้นจะมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ความถ่วงจำเพาะของผลมะม่วงมีค่ามากขึ้น ในทางปฏิบัติ จะไม่คำนวณหาความถ่วงจำเพาะของผลมะม่วง แต่จะสังเกตจากการจม -การลอยของผลมะม่วงในน้ำ ผลมะม่วงที่มีอายุแตกต่างกันจะมีลักษณะการจม -ลอยในน้ำ แตกต่าง กัน ผลมะม่วงที่แก่จัดจะมีความถ่วงจำเพาะมากกว่ามะม่วงที่ยังไม่แก่ วิธีการนี้ทำโดยการนำผลมะม่วงมาแช่ในน้ำ หากผลมะม่วงจมน้ำแสดงว่าผลแก่จัด แต่ถ้าผลมะม่วงลอยน้ำแสดงว่าผลยังอ่อนอยู่ (ดนัยและนิธิยา, 2548)

3. นวลผิวผล ผลมะม่วงเกือบทุกพันธุ์เมื่อผลแก่จัดจะมีนวลหรือไขเกิดขึ้นที่ผิว จะมีสีขาวนวล เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะผลมะม่วงที่มีผิวสีเข้ม ดังนั้นเมื่อใช้มือถูหรือใช้ผ้าเช็ดเปลือกของผลมะม่วงนวลหรือไข ของผลมะม่วงจะหลุดออกมา และเห็นเป็นรอยของนวลหรือไขที่ไม่ได้ถูหรือเช็ดบนผิวของผลมะม่วง (ภูวนาท, 2543; ประเสริฐ, 2548)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4. ขนาดและรูปร่าง ผลมะม่วงจะเปลี่ยนรูปร่างในระหว่างการแก่บนต้นได้ ผลมะม่วงบางพันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สัมพันธ์กับ ระยะความแก่ โดยพิจารณาจากระยะระหว่างไหล่ของผลถึงจุดที่ก้านติดอยู่กับผลมะม่วง ผลมะม่วงที่ยังอ่อนไหล่จะลาดออกจากก้านผล เมื่อผลแก่มากขึ้นไหล่จะยกขึ้น และในบางกรณีอาจจะยกสูงขึ้นมากกว่าบริเวณก้านขั้วด้วย (พานิ ชย์, 2544; ดนัยและนิธิยา, 2548)

ตารางที่ 2.3 การนับอายุการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมของผลมะม่วงบางพันธุ์

พันธุ์	อายุการเก็บเกี่ยวโดยประมาณ (วัน)	นับตั้งแต่
เขียวเสวย	110	เริ่มออกดอก
	95-105	ดอกบานเต็มที่
น้ำดอกไม้	115	เริ่มออกดอก
	100	ดอกบานเต็มที่
หนังกลางวัน	110-115	ดอกบานเต็มที่
แรด	77	หลังช่อดอกติดผล 50%
ทองดำ	105	ดอกเริ่มบาน
โชคอนันต์	110-120	เริ่มออกดอก

(ที่มา: ประเสริฐ, 2548; ภูวนาท, 2543)

2.2 การสุกของผลไม้

ผลไม้หลายชนิด ระหว่างกระบวนการสุกจะมีปฏิกิริยาทางชีวเคมีเกิดขึ้น ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกและสีเนื้อ เช่น เนื้อสัมผัสนิ่มลง มีกลิ่นหอมและรสหวาน ภายในระยะเวลาอันสั้น (จริงแท้ , 2549) ขณะที่ผลไม้เจริญเติบโตมีขนาดผลใหญ่ขึ้นนั้น สามารถแบ่งระยะการเจริญเติบโตได้เป็น 4 ระยะคือ ระยะการเจริญเติบโต การแก่ การสุก แล ะการเสื่อมสภาพ การสุกของผลไม้เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทั้งทางสรีรวิทยา ทางกายภาพ และทางชีวเคมี ซึ่งมีปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่างๆ เกิดขึ้นมากมายภายในเซลล์ของผลไม้

ผลไม้สามารถแบ่งตามลักษณะการหายใจระหว่างกระบวนการสุก ออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. ผลไม้กลุ่ม climacteric เป็นกลุ่มของผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูง ขณะที่กำลังเจริญเติบโตและค่อยๆ ลดลงเมื่อผลแก่ และมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อผลไม้เริ่ม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สุก จึงมีรูปแบบของอัตราการหายใจแตกต่างกับผลไม้กลุ่ม non-climacteric ดังนั้นอัตราการหายใจของผลไม้กลุ่มนี้จึงมีความสัมพันธ์กับกระบวนการสุก และการสังเคราะห์ก๊าซเอทิลี น ตัวอย่างของผลไม้ในกลุ่มนี้ ได้แก่ กล้วย มะม่วง ขนุน มะเขือเทศ แอปเปิล มะละกอ และทุเรียน เป็นต้น และผลไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นระหว่างการสุกแตกต่างกัน ผลไม้กลุ่มนี้ต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่จัดแล้วนำไปบ่มให้ผลสุกจึงจะได้ผลไม้สุกที่มีคุณภาพดีในการนำมาบริโภค หากปล่อยให้ผลไม้กลุ่มนี้สุกบนต้นจะทำให้ผลไม้สุกที่ได้มีคุณภาพต่ำลง (ดนัย, 2540)

2. ผลไม้กลุ่ม non-climacteric คือ กลุ่มของผลไม้ที่มีอัตราการหายใจขณะที่กำลังเจริญเติบโตสูง และค่อยๆ ลดลงเมื่อผลแก่เต็มที่ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจระหว่างผลสุก ตัวอย่างของผลไม้กลุ่มนี้ เช่น ชมพู่ ส้ม ลิ้นจี่ ลำไย สตรอเบอรี องุ่น และสับปะรด เป็นต้น โดยผลไม้กลุ่มนี้จะต้องปล่อยให้ผลเจริญเติบโต แก่ และสุกบนต้น จึงสามารถเก็บเกี่ยวและนำมาบริโภคได้ (จริงแท้, 2544) ซึ่งการแบ่งผลไม้ตามลักษณะรูปแบบการหายใจดังกล่าว (ภาพที่ 2.1) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการสุกของผลไม้แตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการสุกของผลไม้มีดังนี้ (ดนัย, 2540)

2.2.1 การเปลี่ยนสี

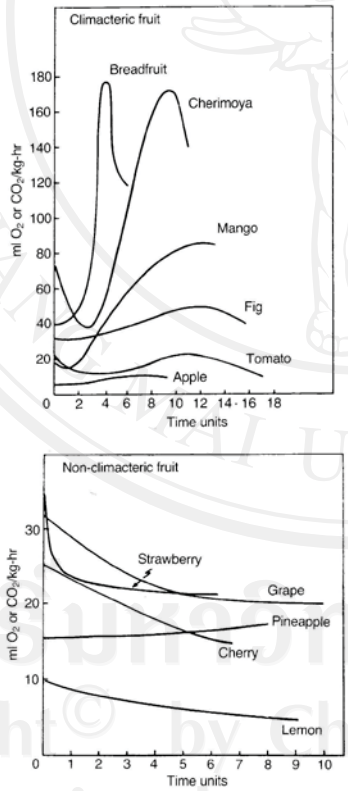
การเปลี่ยนสีของผลไม้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในระหว่างการสุก สีของผลไม้ที่ปรากฏให้เห็นเกิดจากสารสีต่างๆ ที่มีอยู่ภายในเซลล์ แบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือ พวกที่ละลายในน้ำ ซึ่งพบอยู่ในแวคิวโอล ได้แก่ สารสีแอนโทไซยานินต่าง และสารที่ละลายได้ในไขมัน พบอยู่ในพลาสติด มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น สารสีเขียวคลอโรฟิลล์เอและบี สารสีเหลือง ส้ม แคโรทีน และสารสีแดงไลโค พีน สารสีเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทำให้สีของผลไม้เปลี่ยนไปตามชนิดและปริมาณของสารสีเหล่านี้ (ดนัย, 2540)

ก. คลอโรฟิลล์ โมเลกุลของคลอโรฟิลล์ประกอบด้วยส่วนหัวที่มีอะตอมของแมกนีเซียมล้อมรอบด้วยวงแหวนของคาร์บอนและไนโตรเจน และส่วนหางที่เป็นโซ่ยาวของไฮโดรคาร์บอน เรียกว่า ไฟตอล (phytol) (ภาพที่ 2.2) โมเลกุลของคลอโรฟิลล์จะถูกสร้างขึ้นและสลายตัวอยู่ตลอดเวลา แต่ในระยะผลแก่จัดจะมีการสลายตัวเกิดขึ้น จึงทำให้คลอโรฟิลล์หมดไปในที่สุด กลไกของการสลายตัวของคลอโรฟิลล์นี้ยังไม่ทราบแน่ชัด แต่อาจเกิดขึ้นจากสภาพที่เป็นกรด ทำให้อะตอมของแมกนีเซียมหลุดออกไปจากส่วนหัวของโมเลกุล ได้สาร ฟีโอไฟทิน (phaeophytin) ซึ่งยังมีสีเขียวอยู่ (จริงแท้, 2544) (ภาพที่ 2.3) และอาจเกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์คลอโรฟิลเลส เป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

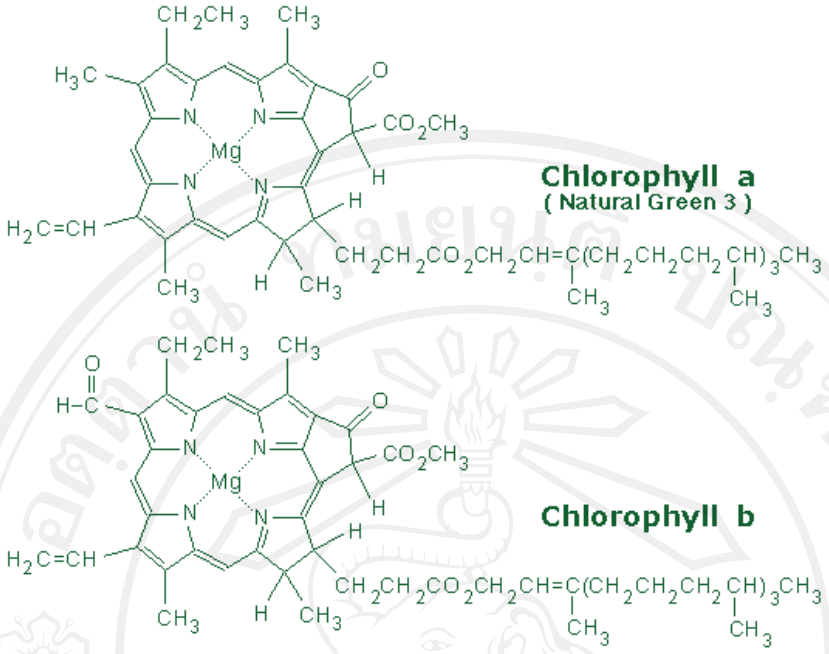
ผลทำให้สีเขียวหายไปและปรากฏสีเหลืองขึ้น เช่น ผลมะม่วง และแอปเปิล ซึ่งเป็นผลไม้ชนิด climacteric ซึ่งมีการสูญเสียสีเขียวเมื่อผลสุก (Will *et al*., 1998)

เอทิลีนเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ เช่น ในผลส้มพันธุ์โรบินสัน (Robinson) และคาลามอนดิน (Calamondin) ที่บ่มด้วยเอทิลีนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเปลือกของผลส้มทั้ง 2 พันธุ์มีปริมาณของคลอโรฟิลล์ลดลง (Purvis and Barmore, 1981) นอกจากจะมีการเปลี่ยนแปลงสารสีแล้ว ออร์แกเนลล์ที่บรรจุสารสี มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นด้วย เช่น คลอโรพลาสต์ ซึ่งมีสีเขียวอาจเปลี่ยนไปเป็นโครโมพลาสต์ ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากคลอโรพลาสต์ ถึงแม้ว่าการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์จะลดลงหรือหมดไป แต่ยังคงมีการสังเคราะห์สารสีชนิดอื่น เช่น แคโรทีนอยด์ ซึ่งทำให้ผลมะม่วงสุกมีสีเหลือง (ดนัย, 2540)

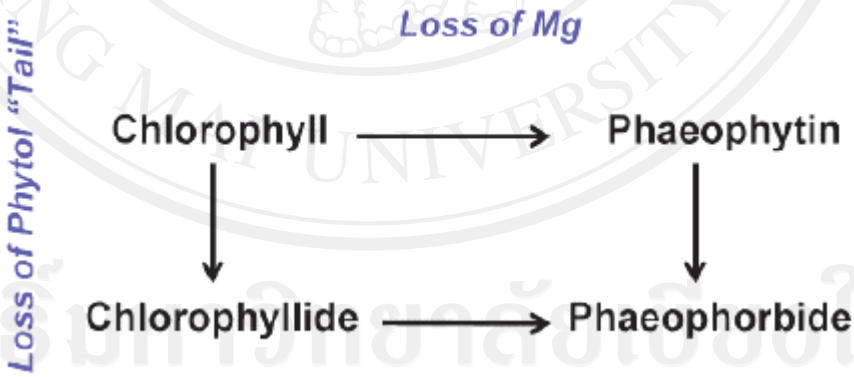


ภาพที่ 2.1 รูปแบบการหายใจของผลไม้ชนิดต่างๆ ในแต่ละกลุ่ม (ก) climacteric (ข) non-climacteric (ที่มา : Tucker, 1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ชนิดต่างๆ (ที่มา: Hodgkiss, 2009)



ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยาการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ (ที่มา : The Secchi Dip-In, 1996)

ข. แคโรทีนอยด์ แคโรทีนอยด์เป็นสารสีที่ไม่ละลายน้ำ ละลายได้ดีในไขมัน น้ำมัน และตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นสารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว พบในเนื้อเยื่อพืชที่มีสีเขียว คือ คลอโรพลาสต์ หรือเนื้อเยื่อที่มีสีเหลืองส้มหรือแดง คือ โครโมพลาสต์ และพบได้ทุกส่วนของพืช ได้แก่ ราก ใบ ดอก ผล และเมล็ด ในเนื้อมะม่วงนั้นพบว่ามีแคโรทีนอยด์สูง (ตารางที่ 2.4)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

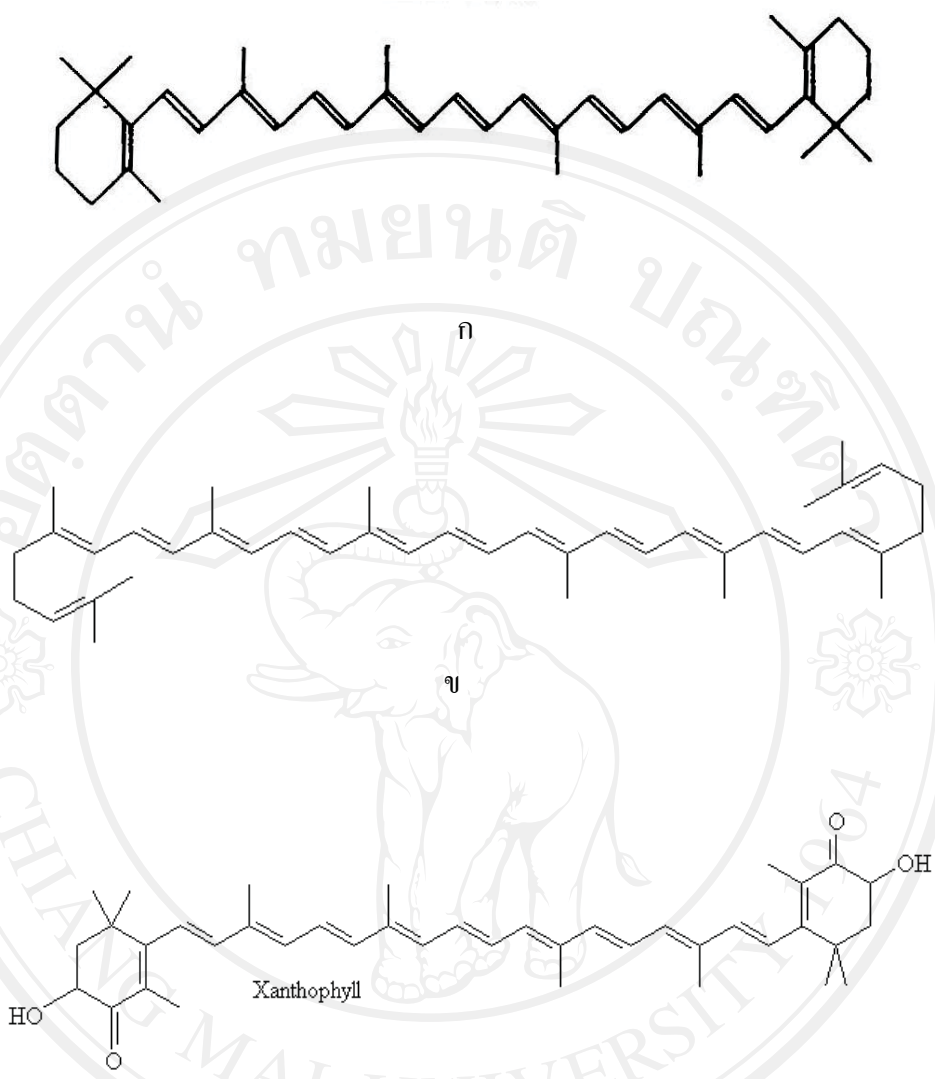
แคโรทีนอยด์สามารถสกัดแยกได้จากธรรมชาติมากกว่า 600 ชนิด และพบเฉพาะในผักและผลไม้มากกว่า 100 ชนิด โครงสร้างของโมเลกุลมีพันธะคู่มากและอยู่ในรูป all-*trans* (all-*E*)-form มีอยู่ในรูป *cis* (*Z*)-form บ้างเล็กน้อย ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยเครื่อง High performance liquid chromatography (HPLC) ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดที่พบในพืชจะผันแปรตามชนิด ของพืช พืชที่มีสีเขียวเข้มจะมีแคโรทีนมากกว่าพืชที่มีสีเขียวอ่อน (Britton and Hornero-Mendez, 1998) แคโรทีนอยด์แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ แคโรทีน ไลโคพีน และแซนโทฟิลล์ (ภาพที่ 2.4) แคโรทีนจัดเป็นโปรวิตามินเอ ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นวิตามินเ อได้ในร่างกายคนและสัตว์ ส่วนไลโค พีนและแซนโทฟิลล์นั้นไม่มีสมบัติดังกล่าว (จริงแท้, 2544) ในผลไม้ปริมาณแคโรทีนอยด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อผลสุก เช่น ผลมะม่วงพันธุ์ราสบุริ (Rasburi) และบาดามิ (Badami) ซึ่งพบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในเปลือกของผลมะม่วงสุกเพิ่มขึ้นมากกว่าผลดิบ (Ajila *et al*., 2007)

ตารางที่ 2.4 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของเนื้อมะม่วงสุกพันธุ์ต่างๆ

พันธุ์มะม่วง	ปริมาณแคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัม/100 กรัม น้ำหนักสด)
คาราบาว	2.75
เคนท์	5.46
เคนซิงตัน	5.06
เคียทท์	3.87
โชคอนันต์	6.72
ดาชีฮาริ	5.44
ทอมมี อัทคินส์	>5
น้ำดอกไม้	4.78
บาดามิ	8.92
มหาชนก	6.77
อัลฟอนโซ	4.76
เออวิน	3.23
เฮเดน	6.82

(ที่มา : ภัทรามาศ, 2547; รุจิภรณ์, 2546; Lizada, 1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



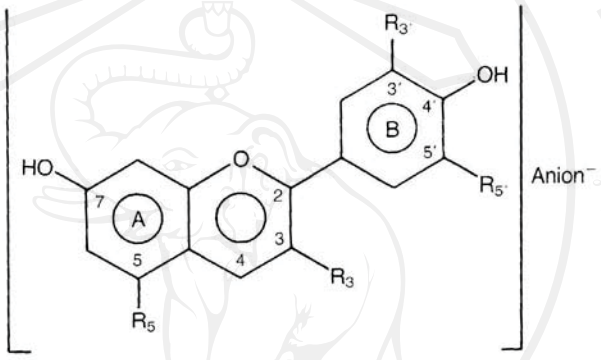
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ชนิดต่างๆ (ก) บีตา-แคโรทีน (ข) ไลโคปีน (ค) แซนโทฟีล (ที่มา: Helmenstine, 2001; Tucker, 1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ค. แอนโทไซยานิน คือสารสีที่จัดเป็นสารประกอบฟีนอล ซึ่งให้สีแดงและน้ำเงิน ละลายได้ดีในน้ำ อยู่ในแวกคิวโอล มักจะมีโมเลกุลของน้ำตาลเกาะ อยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 (ภาพที่ 2.5) แอนโทไซยานินเป็นสารสีหลักของผลไม้หลายชนิด เช่น องุ่น สตรอเบอรี และ บลูเบอรี (Weichmann, 1987; Tucker, 1993) สีของแอนโทไซยานิน จะไม่ค่อยเสถียร ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง ออกซิเจน ความร้อน เอนไซม์เพอร์ออกไซด์ วิตามินซี ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไอออนของโลหะ โมเลกุลน้ำตาล ฟีนอล และสารสีอื่นๆ เช่น การเปลี่ยนสีของเปลือกผลลิ้นจี่เป็นสี

น้ำตาลซึ่งถูกเร่งโดยเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส และเพอร์ออกซิเดส และพบว่าปริมาณแอนโท - ไซยานินในเปลือกของลิ้นจี่ลดลง (Zhang *et al*., 2005)

การเกิดสีของผลแอปเปิลถูกควบคุมโดยแสง และ ไฟโตโครม เอทิลีนและสารประกอบที่ให้เอทิลีนสามารถกระตุ้นให้เนื้อเยื่อสร้างแอนโทไซยานินได้ (ดนัย, 2540; จริงแท้, 2544) และปริมาณของแอนโทไซยานินยังเกี่ยวข้องกับระยะการสุกในผลไม้โดยปริมาณของแอนโทไซยานินในผลไม้สุกมีมากกว่าผลดิบ เช่น ปริมาณแอนโทไซยานินในเปลือกของผลมะม่วงสุกที่ปลูกในประเทศอินเดียมีมากกว่าในเปลือกของผลมะม่วงดิบ (Ajila *et al*., 2007)



Anthocyanidins : R_3 = OH, R_5 = OH

		$R_{3'}$	$R_{5'}$
Pelargonidin	(Pg)	H	H
Cyanidin	(Cy)	OH	H
Peonidin	(Pn)	OCH_3	H
Delphinidin	(Dp)	OH	OH
Petunidin	(Pt)	OCH_3	OH
Malvidin	(Mv)	OCH_3	OCH_3

Anthocyanins: Pg, Cy, Pn, Dp, Pt, Mv with
R_3 = O–sugar or O–acylated sugar
R_5 = OH or O–glucose

ภาพที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของแอนโทไซยานินบางชนิด (ที่มา : Tucker, 1993)

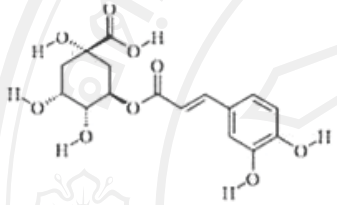
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.2 สารประกอบฟีนอล

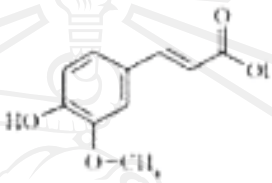
ชนิดและปริมาณ ของสารประกอบฟีนอลพบแพร่หลายมากในพืช และจะผันแปร ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช พันธุ์ อายุ และสภาพแวดล้อม โครงสร้างทางเคมีหลักของสารประกอบฟีนอลประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน ซึ่งมีหมู่ hydroxyl (-OH) เกาะอยู่กับคาร์บอนตำแหน่งหนึ่งตำแหน่งหรือตำแหน่งที่ หนึ่งหรือมากกว่า และอาจมีกลุ่มเคมีอื่นๆ เกาะกับคาร์บอนอื่นๆ ด้วย (ภาพที่ 2.6) สารประกอบฟีนอลเหล่านี้นอกจากจะเป็นสับสเตรตของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส และ

ก่อให้เกิดสีน้ำตาล แล้ว ยังมีบทบาทเกี่ยวข้องกับรสชาติของพืชด้วย เช่น รสฝาด และรส ขม สารประกอบฟีนอล แบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มคือ

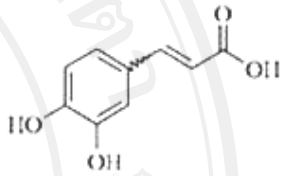
2.2.2.1 สารประกอบฟีนอลพื้นฐานที่เป็นสับสเตรตของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส ได้แก่ ฟีนอล แคทีคอล (catechol) และ พารา-ครีซอล (ρ-cresol) สำหรับแคทีคอลนั้นนิยมใช้เป็นสับสเตรตในการศึกษาเกี่ยวกับกลไกการเกิดสีน้ำตาล หรือศึกษาถึงเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสในปฏิกิริยาไดฟีนอลออกซิเดชัน (diphenol oxidation) อื่นๆ เพราะสับสเตรตของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสในพืชต่างๆ มักมีโครงสร้างบางส่วนคล้ายกับแคทีคอล



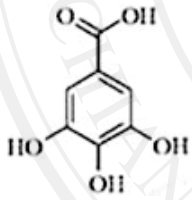
chlorogenic acid



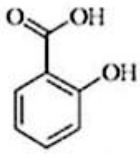
ferulic acid



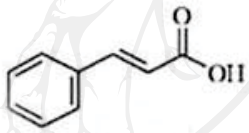
caffeic acid



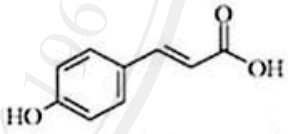
gallic acid



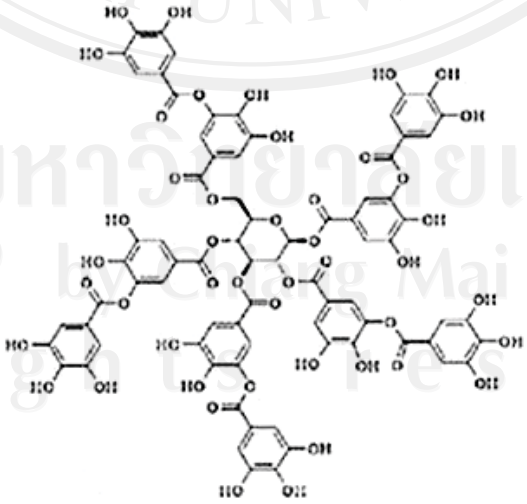
salicylic acid



ρ-cinnamic acid



ρ-coumaric acid



tannic acid

ภาพที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ (ที่มา : Chrzanowski *et al*., 2007)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.2.2 อนุพันธ์ของกรดเบนโซอิก (benzoic acid) เช่น กรดแกลลิก (gallic acid) กรดไซ-รินจิก (syringic acid) และกรดแวนนิลิก (vannilic acid)

2.2.2.3 อนุพันธ์ของกรดซินนามิก (cinnamic acid) เช่น กรดซินพิก (sinpic acid) กรดพารา-คูมาริก (*ρ*-coumaric acid) กรดฟีรูลิก (ferulic acid) และกรดคอลโรจีนิก (chlorogenic acid)

2.2.2.4 ไทโรซีน (tyrosine) เป็นกรดแอมิโนชนิดแอโรแมติก และเมื่อถูกออกซิไดส์แล้วได้เป็นไดไฮดรอกซีฟีนิลแอลานีน (dihydroxyphenylalanine) ซึ่งเป็นจัดเป็นไดฟีนอล (diphenol)

2.2.2.5 สารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ ได้แก่ แอนโทไซยานิน และฟลาโวนอล ทั้งนี้อนุพันธ์ของกรดซินนามิก อาจจัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้ สารในกลุ่มนี้โดยเฉพาะฟลาโวนอล เช่น เคอซีทิน (quercetin) เมริซีทิน (mericetin) และ แคมพ์เฟอรอล (kaempferol) เป็นฟลาโวนอลที่พบบ่อยและมักพบว่าเกาะอยู่กับโมเลกุลของน้ำตาล สารในกลุ่มนี้มีส่วนของโครงสร้างของโมเลกุล คือ วงแหวน B เหมือนกับแคทีคอล เช่น เคทีชิน (catechin) (จริงแท้, 2549)

2.2.3 การเปลี่ยนคุณภาพของรสชาติ

การสุกของผลไม้ทำให้เกิดรสหวานขึ้น เพราะสตาร์ชที่สะสมไว้ระหว่างการเจริญเติบโตถูกไฮโดรไลซ์ ไปเป็นน้ำตาล ปริมาณกรด อินทรีย์ จะลดลงในระหว่างสุกของผลไม้ เนื่องจากนำไปใช้ในกระบวนการหายใจ ซึ่งเกิดขึ้นกับผลไม้ประเภท climacteric เช่น ทุเรียน กล้วย และมะม่วง มักพบว่าผลสุกมีสตาร์ชลดลงพร้อมๆ กับมีน้ำตาลเพิ่มขึ้น ซึ่งผลไม้ต่างๆ มีน้ำตาลที่สำคัญ 3 ชนิด คือ น้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรักโทส (ตารางที่ 2.5) น้ำตาลจะสะสมอยู่ในแวกคิวโอลเป็นส่วนใหญ่ น้ำตาลทั้ง 3 ชนิดอาจเปลี่ยนรูปกันได้ด้วยเอนไซม์หลายชนิด เช่น อินเวอร์เทสซึ่งจะเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำตาลซูโครสไปเป็นกลูโคสและฟรักโทส แต่ในผลไม้สกุลส้ม เช่น ส้มโอ ซึ่งเป็นผลไม้ประเภท non-climacteric ซึ่งไม่มีการสะสมสตาร์ชระหว่างการเจริญเติบโตนั้น ภายหลังการเก็บเกี่ยวอาจมีปริมาณน้ำตาลสูงขึ้นได้ ทั้งนี้เพราะการสูญเสียน้ำออกจากผลไม้ทำให้ความเข้มข้นสูงขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในกรณีนี้มิใช่สาเหตุทำให้รสของส้มหวานขึ้น แต่เป็นเพราะกรดอินทรีย์ มีปริมาณลดลง (จริงแท้, 2544; 2549) ผลไม้ที่มีคาร์โบไฮเดรตต่ำ การสะสมน้ำตาลจะเกิดจากการดึงอาหารมาจากต้น เช่น ผลองุ่น อาจสะสมน้ำตาลได้สูงถึง 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก หากเก็บเกี่ยวผลองุ่นก่อนที่จะแก่จัด ผลองุ่นอาจจะไม่หวานเพราะไม่ได้รับน้ำตาลจากต้น

รสเปรี้ยวของผลไม้เกิดจากกรดอินทรีย์ซึ่งอยู่ในแวคิวโอลของเซลล์ กรด อินทรีย์ที่พบมากในผลไม้ คือ กรดซิตริก และกรดมาลิก ในองุ่นมีกรดตาร์ตาริกอยู่มาก โดยทั่วไปปริมาณน้ำตาลและอัตราส่วนของน้ำตาลต่อกรดนั้นใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพด้านรสชาติของผลไม้ และยังใช้ประเมินคุณภาพในการเก็บเกี่ยวของส้มและองุ่นด้วย (ดนัย, 2540)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลการศึกษาปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทร ตได้ในผลมะม่วงพันธุ์มหาชนกเริ่มตั้งแต่หลังดอกบานจนกระทั่งผลมีอายุ 133 วันหลังดอกบานพบว่า ปริมาณกรดที่ไทเทร ตได้มีค่าสูงในช่วงแรกและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผลอายุตั้งแต่ 98-133 วันหลังดอกบาน ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อผลมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วง 35-119 วันหลังดอกบาน แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุผลมะม่วงเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรด ทั้งหมดที่ไทเทรตได้มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ผลอายุ 98-133 วันหลังดอกบาน (สรรพมงคล, 2545) เช่นเดียวกับการศึกษาในผลมะม่วงพันธุ์แฟร์ชายด์ และเฮเดน ที่ปลูกในรัฐฮาวายในระยะการสุกที่แตกต่างกัน พบว่าผลมะม่วงทั้ง 2 พันธุ์ เมื่อระยะการสุกมากขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทร ตได้ลดลง โดยพบน้ำตาลซูโครสมากที่สุด และกรดซิตริกเป็นกรดที่พบมากที่สุดในผลมะม่วงทั้ง 2 พันธุ์ (Yoneya *et al*., 1990)

ตารางที่ 2.5 ชนิดและปริมาณน้ำตาลในผลไม้ (กรัมต่อ100 กรัม)

ชื่อผลไม้	ปริมาณน้ำตาล (กรัม)			
	ฟรักโทส	กลูโคส	ซูโครส	น้ำตาลทั้งหมด
มะม่วงเขียวเสวยสุก	1.15	0.62	9.53	11.30
มะม่วงน้ำดอกไม้	3.05	0.39	8.82	12.26
มะม่วงอกร่อง	5.46	0.49	7.50	13.45
มังคุด	0.71	0.74	7.24	8.69
เงาะโรงเรียน	1.75	1.77	8.99	12.51
ลำไย (กะโหลก)	2.20	2.53	5.93	10.66
ส้มเขียวหวานบางมด	2.17	1.83	6.20	10.21
สับปะรด (ภูเก็ต)	2.10	2.01	6.07	10.18
ลองกอง	7.40	7.09	1.53	16.02
มะปรางหวาน	1.65	0.91	9.72	12.28
ทุเรียน (หมอนทอง)	0.38	0.40	7.74	8.52

(ที่มา : กองโภชนาการ, 2550)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

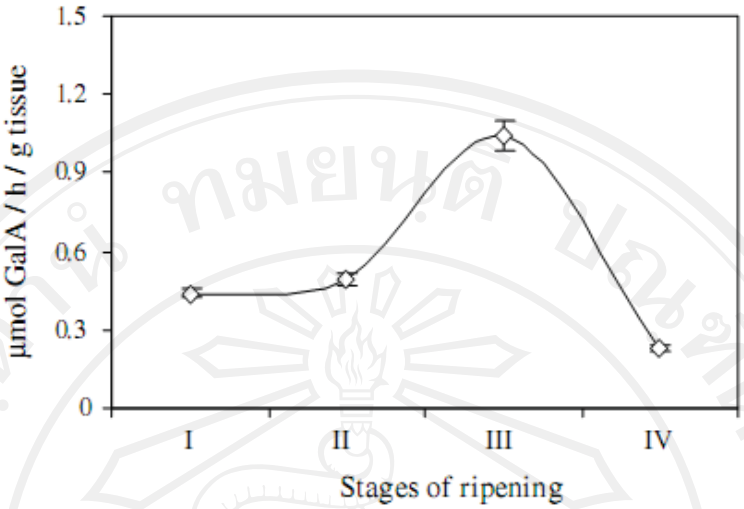
2.2.4 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของผนังเซลล์

ผนังเซลล์ประกอบด้วยเซลลูโลส เพกทิน เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และคิวทิน (ภาพที่ 2.7) ซึ่งทำหน้าที่ยึดเซลล์ให้ติดกัน ผลไม้ดิบจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็ง เมื่อผลสุกจะมีลักษณะเนื้ออ่อนและนิ่มลง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพกทินจากสารประกอบเพกทินที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งมีอยู่ในผลไม้ที่ยังไม่แก่ เมื่อผลไม้แก่และเริ่มสุก จะเปลี่ยนเป็น สารประกอบเพกทินที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นโดยเอนไซม์พอลิกาแล็กทูโรเนส และเพกทินเอสเทอ - เรส ซึ่งกิจกรรมของเอนไซม์จะเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการสุก (ดนัย, 2540; สุนีย์, 2543) (ภาพที่ 2.8) โดยเอนไซม์พอลิกาแล็กทูโรเนสเริ่มปฏิกิริยาการสลายโมเลกุลของเพกทินที่พันธะ α-1,4 เอนไซม์นี้มีทั้ง exo และ endo พอลิกาแล็กทูโลเนส (exo PG และ endo PG) endo PG จะช่วยไฮโดรไลซ์พันธะ α-1,4 โดยสุ่มทั่วทั้งโมเลกุลของเพกทิน ส่วน exo PG จะช่วยไฮโดรไลซ์พันธะ α-1,4 จากปลายของโมเลกุลเพกทิน ด้าน non-reducing เท่านั้น ดังนั้นการทำงานของ endo PG จะช่วยให้โมเลกุลของเพกทินสลายตัวเป็นโมเลกุลเล็กๆ อย่างรวดเร็ว และทำให้ผลไม้อ่อนนุ่มในระยะเวลาอันสั้น

เพกทินเมทิลเอสเทอเรส (PME) เป็นเอนไซม์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งพบมากในเนื้อผลไม้ทั่วไป ระหว่างการสุก ปริมาณของหมู่เมทิลบนโมเลกุลของเพกทินจะลดลงอย่างมาก เนื่องจาก PME ทำหน้าที่ไฮโดรไลซ์ตัดเอาหมู่เมทิลออกไป ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ ค่าพีเอช และประจุภายในผนังเซลล์ ทำให้เกิดพันธะไอออนเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลของเพกทิน โดยอาศัยไอออนของแคลเซียมเป็นตัวเชื่อม และทำให้ PG เข้าไปไฮโดรไลซ์ โมเลกุลของเพกทินให้เล็กลง (จริงแท้, 2549)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพที่ 2.7 องค์ประกอบและโครงสร้างของผนังเซลล์พืช (ที่มา: Davidson, 2005)



ภาพที่ 2.8 กิจกรรมของเอนไซม์พอลิกาแล็กทูโรเนสในระยะการสุกที่แตกต่างกันในผลมะม่วงพันธุ์อัลฟอนโซ I. Mature unripe (dark green); II. Pre-climacteric (light green); III. Post-climacteric (yellowish); IV. Ripe (yellow, soft). (ที่มา: Prasanna *et al*., 2006)

ผลการศึกษากิจกรรมของเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส และพอลิกาแล็กทูโรเนสในมะละกอพันธุ์ปากช่อง 1 และพันธุ์เรดเลดี ที่มีอายุ 130 วันหลังดอกบาน พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ทั้งสองชนิดเพิ่มสูงขึ้นในระหว่าง การสุก โดยส่วนกลางของผลมะละกอมีกิจกรรมของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิด สูงกว่าส่วนปลายของผล และพบว่าในมะละกอพันธุ์เรดเลดีมีกิจกรรมของเอนไซม์เพกทิน - เมทิลเอสเทอเรสเพิ่มสูงสุดในวันที่ 4 ของการเก็บรักษาพร้อมกับการลดลงของความแน่นเนื้ออย่างรวดเร็ว (สุกัญญา, 2545) เช่นเดียวกับผลการศึกษากิจกรรมของเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสและพอลิกาแล็กทูโรเนส ในผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์และพันธุ์มหาชนกที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 วัน พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส และพอลิกาแล็ก-ทูโรเนสของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์เพิ่มสูงขึ้นและความแน่นเนื้อของผลลดลง ส่วนในผลมะม่วงพันธุ์มหาชนกกิจกรรมของเอนไซม์พอลิกาแล็กทูโรเนสเท่านั้นที่เพิ่มสูงขึ้นโดยเกิดขึ้นพร้อมกับการลดลงของความแน่นเนื้อ (ศมาพร, 2545) ในผลท้อ (*Prunu persica* L. Batsch cv. Coronet และ Flavorcrest) กิจกรรมของเอนไซม์ exo-PG เพิ่มสูงขึ้นในช่วงหลังของระยะการสุก และพบว่าผลท้อมีเนื้อสัมผัสอ่อนนิ่มลงในทั้ง 2 พันธุ์ (Downs *et al.*, 1992) เช่นเดียวกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผนังเซลล์ในผลมะม่วงพบว่าการลดลงของความแน่นเนื้อสัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณเพกทิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เมื่อผลมะม่วงสุก (Hosakote *at el*., 2005)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.5 การสังเคราะห์กรดไรโบนิวคลีอิก

ในช่วงเริ่มต้นของ climacteric peak จะมีการสังเคราะห์ RNA เพิ่มมากขึ้นมีทั้ง mRNA ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางนำข้อมูลทางพันธุกรรมจาก DNA ในนิวเคลียสผ่านผนังนิวเคลียสไปยังไรโบโซม ภายในไซโทพลาซึม เพื่อใช้ในการสร้างโปรตีน และมี tRNA เป็นตัวพากรดแอมิโนที่มีอยู่ในไซโทพลาซึมไปยังตำแหน่งที่มีการสร้างโปรตีนหรือไปที่ไรโบโซม ซึ่งการสังเคราะห์ mRNA จะมีมากขึ้นเมื่อเซลล์ต้องการสร้างโปรตีนหรือเอนไซม์ แต่ mRNA จะถูกทำลายเมื่อหมดความต้องการที่จะสร้างโปรตีนหรือเอนไซม์นั้นๆ ดังนั้น ปริมาณของ mRNA ภายในเซลล์จึงเปลี่ยนแปลงตามความต้องการของเซลล์ (สุนีย์, 2543) เช่น ในผลมะเขือเทศพันธุ์มินิโพเพลา และพันธุ์เอมเบอร์เลย์ - ครอสมีปริมาณ RNA ลดลงเมื่อผลมีการสังเคราะห์ไลโค พีนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นระยะที่มะเขือเทศสุก (Rattanapanone *et al*., 1978) mRNA ของอะโวกาโด ในระยะ climacteric rise เพิ่มขึ้น 3 ชนิด ซึ่งพบว่า mRNA ทั้ง 3 ชนิดนี้มีน้ำหนักโมเลกุล 16,500 36,000 และ 89,000 ดาลตัน (Rolf *et al*., 1982) mRNA ในผลอะโวกาโดจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเกิด climacteric rise และหลังจากนั้นจะลดลงหลังจากเกิด climacteric peak (Christoffersen, 1984) ส่วน rRNA ในผลมะเขือเทศดิบพบ 30% ของ rRNA ผลมะเขือเทศเริ่มสุกพบ 50% ของ rRNA ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้สอดคล้องกับกิจกรรมของการสังเคราะห์โปรตีน และในผลไม้หลายชนิด (Spiers *et al*., 1984)

2.2.6 การสังเคราะห์โปรตีนชนิดใหม่

กรดแอมิโนเป็นสารประกอบ อินทรีย์ที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก และหมู่แอมิโนอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน โปรตีนเป็นพอลิเมอร์ของกรดแอมิโนชนิดต่างๆ ต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ โปรตีนจัดเป็นสาร ชีวโมเลกุลที่มีปริมาณมากที่สุด ภายในเซลล์สิ่งมีชีวิต (พรงาม, 2545) แต่โปรตีนและกรดแอมิโนที่เป็นอิสระเป็นส่วนประกอบที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อย ในผลไม้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเจริญเติบโตและการพัฒนาระยะต่างๆ รวมทั้งในช่วงระหว่างการเกิด climacteric ของผลไม้หลายชนิด กรดแอมิโนอิสระจะลดลง แสดงว่ามีการสังเคราะห์โปรตีนเพิ่มขึ้น ซึ่งเชื่อว่าเกี่ยวข้องกับการเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ต่างๆ ระหว่างการสุก (Brady, 1987)

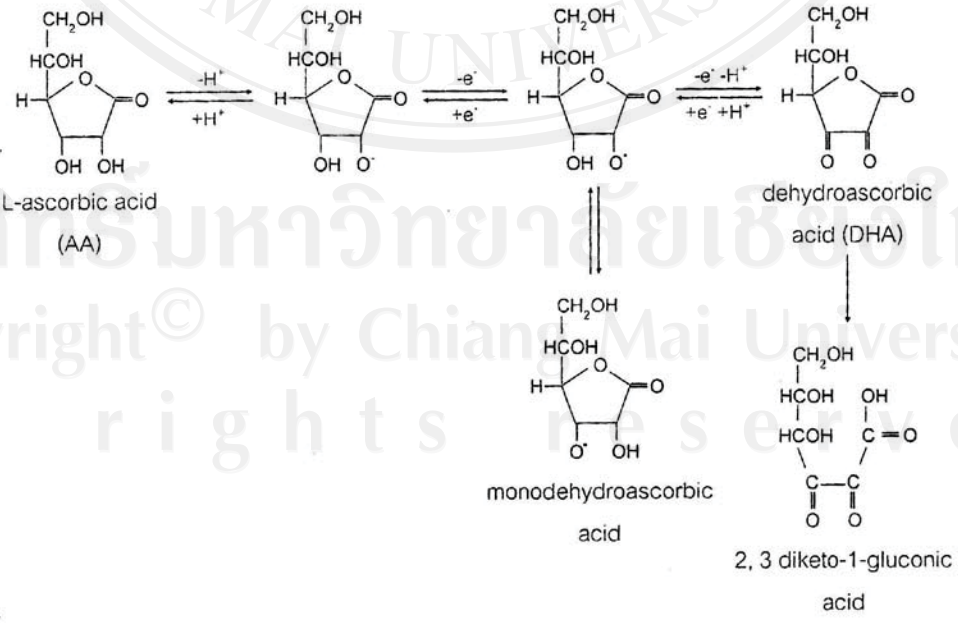
เนื่องจากโปรตีนส่วนใหญ่ ทำหน้าที่เป็นเอนไซม์เร่งปฏิกิริยาทาง ชีวเคมีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารต่างๆ ในกระบวนการสุก เช่น เอนไซม์แอลฟา และบีตา -อะไมเลส เอนไซม์ฟอสฟอริเลส ซึ่งเกี่ยวข้องกับการ ไฮโดรไลซ์ สตาร์ชให้เป็นน้ำตาล เอนไซม์ที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการสุกของผลไม้ เช่น เอนไซม์พอลิกาแล็กทูโลเนส เพกทินเอสเทอเรส แคตาเลส เพอร์ - ออกซิเดส ฟอสฟาเทส คลอโรฟิลเลส และเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เอทิลีน (ดนัย ,

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2540; Whitaker, 2003) เช่นเดียวกับผลการวัดกิจกรรมของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสของ ผลมะม่วงพันธุ์ลิปเปน และ สมิช พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสเพิ่มขึ้นสูงสุดในขณะเกิด climacteric rise (Marin and Cano, 1992) กิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสและเพอร์ออกซิเดสในผลมะกอก (olive) ที่ต่ำลงในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นในระยะการพัฒนาของผลจนกระทั่งผลสุก (Hassan *et al*., 2003) เช่นเดียวกับผลการวัดกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสในระหว่างการสุกของผลแอปเปิลป่า (*Mespilus germanica* L.) ซึ่งพบว่ามีกิจกรรมของเอนไซม์เพิ่มขึ้นตามจำนวนวันหลังดอกบาน คือ 476 U/mg (193 วันหลังดอกบาน) 1256 U/mg (207 วันหลังดอกบาน) และ 2222 U/mg (214 วันหลังดอกบาน) (Ayaz *et al*., 2007)

2.2.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณวิตามินซี

ในผลไม้มีวิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิกอยู่ 3 รูป คือ รูปรีดิวซ์ (L-ascorbic หรือ AA) ที่อาจถูกออกซิไดส์ไปอยู่ในรูปออกซิไดส์ที่ไม่เสถียรซึ่งจะเปลี่ยนรูป ต่อไปเป็น กรดดีไฮโดร - แอสคอร์บิก (dehydroascorbic acid, DHA) และ DHA นี้อาจถูกออกซิไดส์ต่อไปเป็น กรด 2,3-ไดคีโท-1-กลูโคนิก (2,3-diketo-1-gluconic acid) (ภาพที่ 2.9) ซึ่งไม่มีสมบัติของวิตามินซี ระหว่างการสุกของผลไม้จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณวิตามินซี ตัวอย่างเช่น ในผลมะละกอ บ๊วย และท้อ มีปริมาณวิตามินซีเพิ่มขึ้นเมื่อผลสุก แต่ ผลมะม่วง ส้ม และแอปเปิล มีปริมาณวิตามินซีลดลงเมื่อผลสุก ดังแสดงในตารางที่ 2.6 (จริงแท้, 2549)



ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของวิตามินซีที่อยู่ในรูปรีดิวซ์และออกซิไดส์ (ที่มา Levine , 1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.6 ปริมาณของวิตามินซีในผลไม้บางชนิดที่ระยะการสุกต่างๆ

ผลไม้	ปริมาณวิตามินซี (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด)		
	ระยะผลสีเขียว	ระยะสุกปานกลาง	ระยะผลสุกเต็มที่
บ๊วย (พันธุ์ Tilton)	11.70	12.90	14.30
ท้อ (พันธุ์ Elberta)	7.80	10.20	12.20
มะละกอ (พันธุ์ Solo)	72.00	95.00	102.00
แอปเปิล (พันธุ์ Baldwin)	18.70	18.50	50.00
มะม่วง (พันธุ์ Pirie)	60.00	12.40	14.00

(ที่มา: Lee and Kader, 2000)

2.2.8 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบที่ให้เกิดกลิ่น

สารระเหยที่ให้กลิ่นและรสชาติ ถูกสร้างมากขึ้น ส่วนใหญ่เป็น oxygenated compounds เช่น เอสเทอร์ (ester) แอลกอฮอล์ (alcohol) แอลดีไฮด์ (aldehyde) และคีโทน (ketone) เมื่อผลไม้สุกจะทำให้มีกลิ่นหอมและมีกลิ่นเฉพาะแตกต่างกันในแต่ละชนิดของผลไม้ เช่น ผลแอปเปิลดิบ พบสารประกอบที่ทำให้เกิดกลิ่นคือ เฮกซาน าล (hexanal) ส่วนเมื่อผลสุกพบเอทิล (ethyl) และ 2-เมทิล-บิวทิเรต (2-methyl-butyrate) ในผลกล้วยดิบพบสารประกอบที่ทำให้เกิดกลิ่นคือ 2-เฮกซา-นาล (2-hexanal) เมื่อ ผลกล้วย สุกพบยูจีน าล (eugenal) และกล้วยที่สุกงอม มีสารให้กลิ่น คือ ไอโซเพนทานอล (isopentanol) ส่วนในผลเกรพฟรุต เป็นสารนูตาคาโทน (nootakatone) (Tucker, 1993)

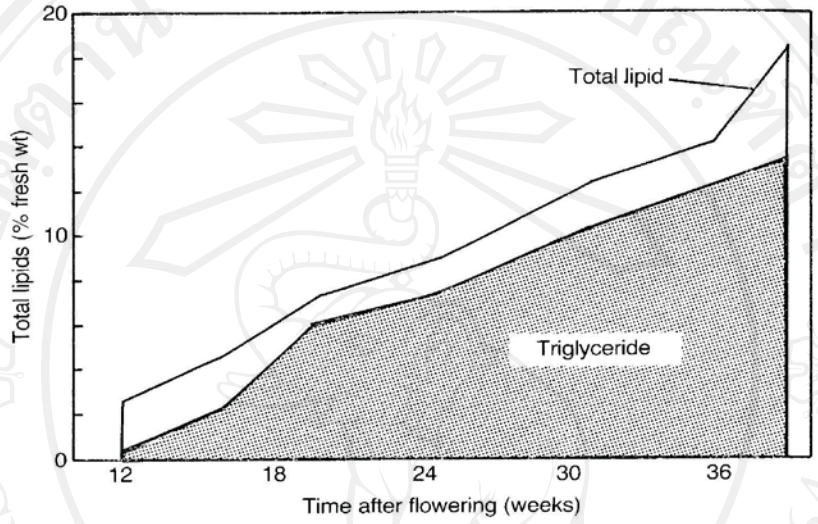
ในผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง มีสารประกอบที่ทำให้เกิดกลิ่นหลัก คือ กรดบิวทิริก (butyric acid) และพบว่า ผลมะม่วงมี 3-carene และ β-phellandren เพิ่มขึ้นเมื่อผลมะม่วงสุกมากขึ้น (ธีระ, 2545) เช่นเดียวกับสารประกอบที่ทำให้เกิดกลิ่นของผลมะม่วงพันธุ์เคนซิงตันไพรด์ (Kensington pride) ที่พบว่าเป็นสาร ในกลุ่มของเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการสุก (Herianus, 2003) และในผลกีวีดิบพบ สาร*แทรนส์*-เฮก-2-อีนอล (*trans*-hex-2-enal) ส่วนความเข้มข้นของสารประกอบที่ทำให้เกิดกลิ่นพบว่ากลุ่มของเอสเทอร์เพิ่มขึ้นในขณะผลกีวีสุก (Given, 1993)

2.2.9 การเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบอื่นๆ

นอกจากนี้ระหว่างการสุกของผลไม้ยังมีการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ อีก เช่น ขณะผลสุกมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นในผลไม้กลุ่ม climacteric มีการตอบสนองต่อเอทิลีน การควบคุมการซึมผ่าน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เข้าออกของสารต่างๆ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ลดน้อยลง ผลไม้บางชนิดมี ลิพิดเพิ่มขึ้น เช่น อะโวกาโด มีลิพิดทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนวันหลังดอกบานเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.10 และฮอร์โมนต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น มีฮอร์โมนออกซินเพิ่มมากขึ้นในระยะแรกของการเจริญเติบโตจนกระทั่งเมื่อผลโตเต็มที่หลังจากนั้นปริมาณออกซินจึงจะลดลง (Brady,1987; ดนัย, 2540; จริงแท้, 2544)



ภาพที่ 2.10 ปริมาณลิพิดทั้งหมดในเปลือกของผลอะโวกาโด (Given, 1993)

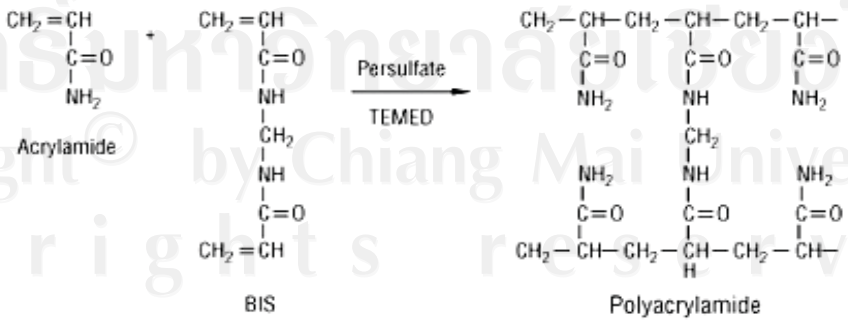
2.3 เทคนิคในการวิเคราะห์และแยกชนิดของโปรตีน

อิเล็กโทรโฟรีซิส เป็นวิธีการแยกโมเลกุลโปรตีนที่อาศัยสนามไฟฟ้า โปรตีนที่มีประจุสุทธิเป็นบวกจะเคลื่อนที่ไปทางขั้วลบ ส่วนโปรตีนที่มีประจุสุทธิเป็นลบจะเคลื่อนที่ไปทางขั้วบวก ทั้งนี้อัตราเร็วของการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับปริมาณประจุสุทธิ ขนาดและรูปร่างของโปรตีน (พรงาม, 2545) โดยอาศัยสมบัติดังกล่าวนี้ เทคนิคอิเล็กโทรโฟรีซิสจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสมบัติต่างๆ ของแมกโครโมเลกุล ตัวอย่างเช่น มวลโมเลกุลของโปรตีน ความแตกต่างของโมเลกุลในแง่ประจุสุทธิและรูปร่างของโปรตีน รวมทั้งการแยก ขนาดของโมเลกุลที่แตกต่างกันด้วย (อาภัสสรา, 2537; สุกัญญา, 2549) ในการทำอิเล็กโทรโฟรีซิสจะต้องมีเนื้อสารค้ำจุน เช่น เซลลูโลส อะกาโรส ซิลิกา พอลิสไตรีน เนื้อสารค้ำจุนที่นิยมใช้คือ พอลิอะคริลาไมด์ หรือ สตาร์ชเจล ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการแยกได้ดียิ่งขึ้น (Harris and Angel, 1990; พรงาม, 2545; สุกัญญา, 2549)

พอลิอะคริลาไมล์มีสมบัติทางเคมีที่เฉื่อย ทนต่อสภาพความเป็นกรด -ด่าง ทนต่ออุณหภูมิ และความแรงของไอออนต่างๆได้ดี มีลักษณะใส ติดตามโมเลกุลที่แยกออกจากกันได้ง่าย และเป็นตัวกลางที่มีขนาดรูพรุนที่ยอมให้สารชีวโมเลกุลผ่านไปได้ ขนาดรูพรุนมีบทบาทมากในการคัด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กรองโมเลกุล การเคลื่อนที่ของโมเลกุลขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ ขนาดและชนิดของประจุ และขนาดของโมเลกุล เพราะสามารถปรับขนาดรูพรุนของเจลให้สอดคล้องกับโปรตีนที่สนใจได้โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของอะคริลาไมด์ ส่วนพอลิอะคริลาไมด์เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการต่อมอโนเมอร์ของอะคริลาไมด์ให้เป็นสาย แล้วเชื่อมระหว่างสายด้วย เอ็น, เอ็น'-เมทิลีนบีสอะคริลาไมด์ (N, N' methyl bis acrylamide) ทำหน้าที่เชื่อมโยงสายโซ่พอลิอะคริลาไมด์ เป็นตาข่ายร่างแห (ภาพที่ 2.12) ปฏิกิริยานี้ต้องการอนุมูลอิสระที่ได้จากการสลาย ตัวของแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต โดยมี เอ็น, เอ็น เอ็น' เอ็น'-เททระเมทิล-เอทิลีนไดเอมีน (tetramethylethylenediamine, TEMED) เป็นตัวรักษาอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น จึงเร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ ความเข้มข้นเป็นร้อยละของ อะคริลาไมด์ทั้งสองชนิดรวมกัน (%T) โดยความเข้มข้นของอะคริลาไมด์เป็นตัวกำหนดความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ ในขณะที่เอ็น, เอ็น'-เมทิลีนบีสอะคริลาไมด์เป็นตัวกำหนดขนาดของการเชื่อมโยงเป็นตาข่ายร่างแห ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นของมอโนเมอร์ทั้ง 2 จึงเป็นตัวกำหนดสมบัติของพอลิอะคริลาไมด์เจล เช่น %T สูงจะให้รูพรุนขนาดเล็ก จึงเหมาะต่อการคัดกรองโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กด้วย (อาภัสสรา, 2537; สุกัญญา, 2549) ดังตารางที่ 2.7 ในเนื้อเจลและในระบบจะต้องควบคุมค่าพีเอชของสารละลายไว้ด้วยบัฟเฟอร์ ซึ่งจะสัมผัสอยู่กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองประจุของโปรตีนจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในเจล ค่าพีเอชที่แตกต่างกันจะทำให้โปรตีนมีประจุ สุทธิแตกต่างกันไปด้วย ในการแยกโปรตีน จะเติมโปรตีนที่ต้องการแยกลงไปบนเจลแล้ว ปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไป โปรตีนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก และเมื่อสิ้นสุดการทำอิเล็กโทรโฟรีซิส สามารถย้อมให้เห็นแถบโปรตีนได้โดยใช้สีย้อม เช่น Coomassie Blue หรือถ้าเป็นเอนไซม์ จะย้อมโดยอาศัยการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ชนิดนั้นได้ โดยเลือกใช้สับสเตรตที่จำเพาะ และเมื่อ สับสเตรตถูกเปลี่ยนให้เป็นผลิตภัณฑ์จะให้สีที่เห็นได้ชัดเจน หรือด้วยเทคนิคอื่นๆ



ภาพที่ 2.11 การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของอะคริลาไมด์มอโนเมอร์ไปเป็นสายโซ่ยาวของพอลิอะคริลาไมด์ (Thermo Fisher Scientific, 2009)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.7 เปอร์เซ็นต์ของอะคริลาไมด์ที่ใช้ในการแยกโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

ช่วงน้ำหนักของโปรตีน (ดาลตัน)	เปอร์เซ็นต์อะคริลาไมด์ที่เหมาะสม
200,000-60,000	5.0%
120,000-30,000	7.5%
75,000-18,000	10.0%
60,000-15,000	12.5%
45,000-12,000	15.0%

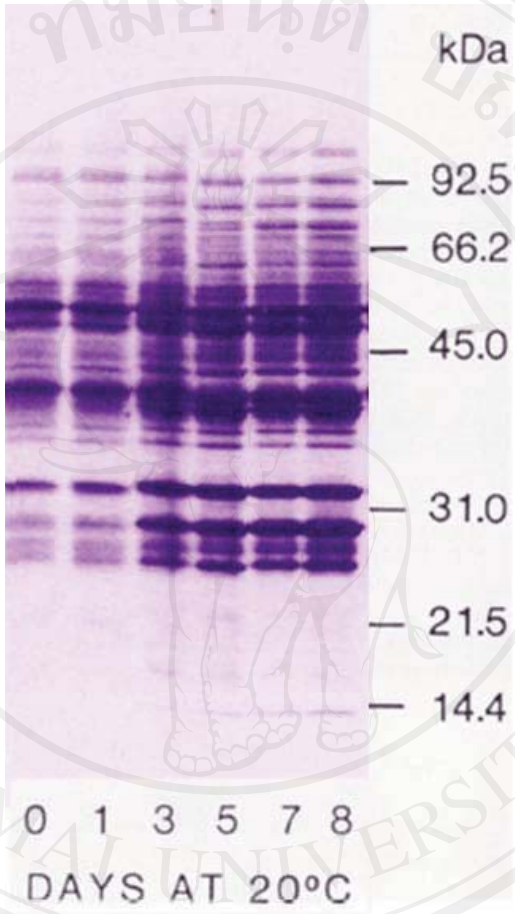
(ที่มา : Copeland, 1994)

นอกจากนี้ยังมี เอสดีเอส -พอลิอะคริลาไมด์เจลอิเล็กโทรโฟรีซิส (SDS-PAGE) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกหน่วยย่อยของโปรตีนและหามวลโมเลกุลของโปรตีน โดยใช้ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) จับเข้ากับโปรตีน ในขณะที่ตัวอย่างโปรตีนซึ่งถูกต้มกับ β-mercaptoethanol จะไปทำลายพันธะไดซัลไฟด์บนโมเลกุลของโปรตีน ความร้อนทำลายพันธะไฮโดรเจนและอื่นๆ ที่ตรึงให้โมเลกุลอยู่ในรูปร่างตามธรรมชาติ SDS จับกับโปรตีนในอัตราส่วนประมาณ 1 โมเลกุลของ SDS ต่อ 3 พันธะเพปไทด์ นอกจากจะทำให้โปรตีนทุกชนิดมีประจุสุทธิเป็นลบแล้ว และยังทำให้ประจุลบของ SDS ยังผลักกัน ทำให้โปรตีนยืดออกเป็นแท่ง เนื่องจากสายพอลิเพปไทด์เมื่อถูกจับด้วย SDS จะคลายการขดม้วนออกเป็นสายยาว มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 18 อังสตรอม ซึ่งคงที่ในขณะที่ความยาวของ สายพอลิเพปไทด์ จะเป็นสัดส่วนกับมวลโมเลกุลของสายพอลิเพปไทด์ สายพอลิเพปไทด์นี้มีประจุลบ (เนื่องจากประจุของ SDS ไปบดบังประจุของโปรตีน) มีอัตราส่วนของประจุต่อมวลหรือมีความหนาแน่นของประจุคงที่เท่ากัน และมีรูปร่างเหมือนกัน จึงทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเพปไทด์ขึ้นกับมวลโมเลกุลของสายโซ่พอลิเพปไทด์ และทุก สายพอลิเพปไทด์ จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันคือเข้าหาขั้วบวก (อาภัสสรา, 2537; ไพโรจน์, 2538; สุกัญญา, 2549)

ผลการศึกษารูปแบบของโปรตีนในผลอะโวกาโด (*Persea americana* Mill.) ที่เก็บเกี่ยวในระยะ pre-climacteric แล้วนำมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยใช้วิธี SDS-PAGE ความเข้มข้น 18% พบว่ารูปแบบของโปรตีนมีการเปลี่ยนแปลง โดยแถบของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุล 110, 90.5, 51.5, 43.8, 41.6, 39.5, 37.7,32.3, 28.8 และ 25.7 กิโลดาลตัน แถบโปรตีนเข้มขึ้นเมื่อระยะการสุกเพิ่มขึ้น แถบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุล 81.9, 65.9 กิโลดาลตัน แถบโปรตีนทั้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2 แถบจางลงในวันที่ 4 แถบของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุล 74, 61, 57 และ 16.6 กิโลดาลตัน แถบโปรตีนจางลงเมื่อระยะการสุกเพิ่มขึ้น และไม่พบแถบของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุล 54.5 กิโล-ดาลตัน ในระยะผลอะโวกาโดสุก (Kanellis *et al*., 1989) ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 รูปแบบของแถบโปรตีนในผลอะโวกาโดระหว่างการสุกที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (ที่มา : Kanellis *et al*., 1989)

การศึกษาเทคนิคอิเล็กโทรโฟรีซิสศึกษารูปแบบของโปรตีนในมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ที่สุกบนต้น และมะม่วงพันธุ์มหาชนกที่บ่ม และไม่บ่มด้วยแคลเซียมคาร์ไบด์ในระยะต่างๆ โดยการสกัดโปรตีนที่ละลายได้ด้วยสารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ พีเอช 6.2 ที่มีเอสดีเอส ละลายอยู่ 1% และแยกโปรตีนที่สกัดได้ด้วยวิธี SDS-PAGE ความเข้มข้น 10% ผลการทดลองพบว่าระหว่างการสุกของผลมะม่วงทั้ง 2 พันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของโปรตีน และโปรตีนในผลมะม่วงทั้งสองพันธุ์ส่วนใหญ่เป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

โดยในระหว่างการสุกบนต้นของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์มีแถบโปรตีนที่เห็นได้ชัดเจน 12 แถบ มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 14.4-85.0 กิโลดาลตัน ตามลำดับ และในผลมะม่วงดิบพันธุ์โชคอนันต์ไม่ปรากฏแถบโปรตีนที่น้ำหนักโมเลกุล 39.3 กิโลดาลตัน แต่พบในผลมะม่วงตั้งแต่เริ่มสุกจนสุกเต็มที่ ส่วนผลมะม่วงพันธุ์มหาชนกมีแถบโปรตีนลักษณะเช่นเดียวกับผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ ยกเว้นแถบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุล 36.7 กิโลดาลตันเท่านั้นที่พบเฉพาะผลมะม่วงสุกพันธุ์มหาชนก (นิธิยาและคณะ, 2546) และเช่นเดียวกับการใช้วิธี SDS-PAGE ความเข้มข้น 12.5% ศึกษารูปแบบโปรตีนของผลเกรพฟรุต 2 พันธุ์ คือพันธุ์บลอนด์ (Blond) และสตาร์รูบี (Star ruby) โดยผลเกรพฟรุตทั้ง 2 พันธุ์มีโปรตีนทั้งหมด 32 แถบ และแถบโปรตีนที่มองเห็นได้ชัดเจนมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 20-43 กิโลดาลตัน โดยทั้ง 2 พันธุ์มีรูปแบบของโปรตีนต่างกันเล็กน้อย (Gorinstein *et al*., 2006)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved