บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมะม่วง (เกศิณี , 2528 และ วิจิตร , 2529)

มะม่วงเป็นพืชใบเลี้ยงคู่จัดอยู่ในวงศ์ Anacardiaceae สกุล *Mangifera* มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Mangifera indica* Linn. เป็นไม้ยืนต้นที่มีทรงสูงประมาณ 15 เมตร ต้นตั้งตรงกิ่งก้านสาขาแผ่เป็นทรงพุ่มที่แน่นทึบเป็นรูปครึ่งวงกลมหรือรูปไข่ค่อนข้างยาว มีอายุยืนนานมากกว่า 100 ปี ส่วนของต้นขณะสดมีกลิ่นหอมเฉพาะ

ราก มีระบบรากแก้วที่สามารถชอนไชลงสู่ระดับน้ำใต้ดินได้ลึกประมาณ 6 เมตร รากหาอาหารจะอยู่หนาแน่นบริเวณผิวดินตอนบนลึกลงไปประมาณ 1 - 2 ฟุต และแผ่กว้างออกไปเป็นรัศมีราว 25 ฟุตโดยรอบลำต้น

ลำต้น มีลำต้นประธาน (main stem) เด่นชัดสีน้ำตาลเทาหรือเกือบดำ เปลือกของลำต้นแข็งแรงมีลักษณะขรุขระ กิ่งก้านสาขาใหญ่และแข็งแรง กิ่งอ่อนมีลักษณะผิวเกลี้ยงเปลือกสีน้ำตาลปนเทาอ่อน ๆ

ใบ เป็นใบเดี่ยวเรียงตัวแบบสลับ แต่ที่ปลายกิ่งมักมีใบเกิดฉิ่ทำให้มีลักษณะใบเรียงตัวแบบเกลียว ใบไม่มีขน ไม่มีหูใบ ผลิใบเป็นระยะ ๆ ใบอ่อนมีสีแดงหรือสีม่วง เมื่อแก่จะเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้มและเป็นมัน มีรูปร่างเป็นแบบรูปโล่ รูปหอก รูปไข่ หรือเรียวยาว แผ่นใบเหนียวคล้ายแผ่นหนัง ปลายใบแหลม ฐานใบแคบ ขอบใบเรียบ เส้นกลางใบเด่นชัดและมีเส้นใบย่อยไม่เกิน 30 คู่ ปากใบอยู่ที่ผิวทั้งสองด้าน แต่ผิวด้านล่างมีจำนวนปากใบมากกว่าผิวด้านบน

ช่อดอก มีช่อดอกแบบ panicle เกิดที่ปลายกิ่งยาว 10 - 16 เซนติเมตร ช่อดอกมีทรงกว้าง จำนวนดอกในช่อหนึ่งมีประมาณ 1,000 - 1,600 ดอก ก้านช่อดอกมักเจือสีแดงและมักมีขน ในช่อดอกประกอบด้วยดอกหลายเพศ คือ มีทั้งดอกเพศผู้ และดอกสมบูรณ์เพศอยู่ด้วยกัน ปกติจะมีดอกสมบูรณ์เพศเพียง 1 - 36 % ของจำนวนดอกทั้งหมด

ดอก ดอกเรียงตัวบนช่อดอกย่อยแบบ cyme ดอกมีหลายเพศ (polygamous) เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 - 8 มิลลิเมตร ก้านดอกสั้นมาก กลิ่นหอม กลีบเลี้ยงมักมี 5 กลีบ (อาจพบว่ามี 4 - 7 กลีบ) กลีบดอกยาวเป็นสองเท่าของกลีบเลี้ยง มีสีเหลืองอ่อนและมีร่องสีเหลืองเข้มที่ผิวด้านใน เมื่อแก่กลีบดอกจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู เกสรตัวผู้มี 5 อัน (อาจพบว่ามี 3 - 7 อัน) มีสีชมพูยาว

2 มิลลิเมตร เมื่อแก่จะเปลี่ยนเป็นสีม่วง เกสรตัวผู้ที่ทำงานได้มีจำนวนเพียง 1 หรือไม่เกิน 2 ส่วนที่เหลือจะไม่ทำงาน ในดอกตัวผู้เกสรตัวเมียจะฝ่อไป ส่วนในดอกสมบูรณ์เพศจะมีรังไข่ที่มี 1 ช่อง รูปร่างเบี้ยว ไม่มีก้าน ก้านและยอดเกสรตัวเมียมีขนาดเล็ก ขนาดใกล้เคียงกับความยาวของเกสรตัวผู้ที่ทำงานได้ บางครั้งพบว่าดอกหนึ่งอาจมีเกสรตัวเมียจำนวน 3

ผล เป็นผลสด (flesh drupe) มีความแตกต่างกันมากในเรื่องของขนาด รูปร่าง สี ปริมาณเสี้ยน (เส้นใยในผล) รสชาติ และกลิ่น ขนาดความยาวของผลมีตั้งแต่ 2.5 - 30 เซนติเมตร รูปร่างมีตั้งแต่กลมไปจนถึงรูปไข่ค่อนข้างยาว ผลมักแบนด้านข้างรูปร่างของผลอาจแตกต่างกันในส่วนของแก้ม (sinus) ไหล่ (shoulder) หลัง (back) ปลาย (apex) คาง (nak) และจงอยปาก (beak) สีของผลประกอบด้วยส่วนผสมของสีต่าง ๆ คือ เขียว เหลือง และแดง อาจมีเสี้ยนหรือไม่มี รสชาติและกลิ่นมีตั้งแต่หวานและฉ่ำน้ำมากไปจนถึงมีกลิ่นและค่อนข้างแข็ง ผลมะม่วงมี 3 ชั้น คือ เนื้อผลชั้นนอก (exocarp) หนาและมีต่อมเกิดเป็นจุด ๆ เนื้อผลชั้นกลาง (mesocarp) เป็นเนื้อที่รับประทานได้ ความหนาของเนื้อมากน้อยขึ้นกับชนิดและพันธุ์ และเนื้อผลชั้นใน (endocarp) มีลักษณะเป็นเสี้ยนและแข็งคล้ายไม้ เนื้อผลชั้นในอาจล่อนหรือมีเสี้ยนยึดติดกับเนื้อผลชั้นกลาง

เมล็ด เมล็ดอยู่ถัดจากเนื้อผลชั้นในเข้าไป ขนาดแตกต่างกันตั้งแต่ขนาดใหญ่ไปจนถึงเกือบไม่มีเมล็ด (เมล็ดลีบ) เปลือกหุ้มเมล็ดมีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น คือ ชั้นนอก (testa) และชั้นใน (tegmen) ใบเลี้ยงมีจำนวน 2 อาหารเลี้ยงคัพภะไม่อยู่ในใบเลี้ยง เมล็ดบางชนิดเป็น monoembryonic ประกอบด้วย zygotic embryo เพียงอันเดียว ส่วนเมล็ดบางชนิดเป็น polyembryonic ประกอบด้วย embryo จำนวน 2 - 12

แบบแผนการเจริญเติบโตของผลมะม่วง

ผลมะม่วงมีการเจริญเติบโตเป็นแบบซิกมอยด์ (Sigmoid shape , S-shape) ในลักษณะเดียวกับการเจริญของเซลล์ เนื้อเยื่อ หรือสิ่งมีชีวิตทั่วไป โดยอัตราการเจริญเติบโตของผลไม่ว่าจะเป็นน้ำหนัก ปริมาตร ความยาว และความกว้างของผลจะมีการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามอายุของผล และจะลดลงเมื่อผลเริ่มแก่จนกระทั่งผลอยู่ในระยะเก็บเกี่ยวซึ่งจะมีอัตราการเจริญเติบโตคงที่ จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทาง metabolism ในผลมะม่วงที่กำลังพัฒนาและการพัฒนาของผลตั้งแต่ติดผลจนกระทั่งผลแก่เต็มที่แบ่งการเจริญเติบโตของผลออกได้เป็น 4 ระยะ คือ (วิจิตร , 2529)

1. ระยะ juvenile เป็นระยะที่เปลือกผลมีสีเขียว ใช้เวลาประมาณ 21 วันหลังจากไข่ได้รับการปฏิสนธิ การเจริญเติบโตของเซลล์ของรังไข่จะเป็นไปอย่างรวดเร็ว มีอัตราการหายใจและ

อัตราการเจริญเติบโตสูง ปริมาณน้ำในเนื้อเยื่อสูงที่สุด ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ไนโตรเจนและกรดเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ อัตราส่วนของคาร์โบไฮเดรตต่อไนโตรเจนต่ำ

2. ระยะ adolescent เป็นระยะที่เปลือกผลมีสีเขียวแก่ ระยะนี้นับตั้งแต่วันที่ 21 - 49 หลังการปฏิสนธิ โดยขนาดของผลจะขยายออกโตเต็มที่ มีการสร้างกลิ่นและรสธรรมชาติ มีอัตราการหายใจปานกลาง อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณน้ำ และเปอร์เซ็นต์น้ำตาลกลูโคสลดลง ในขณะที่แรงดันออสโมติก และน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้ง กรดและไนโตรเจนยังคงมีปริมาณสูง อัตราส่วนของคาร์โบไฮเดรตต่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น

3. ระยะ climacteric ระยะนี้นับตั้งแต่วันที่ 49 – 77 หลังการปฏิสนธิ สีของเปลือกผลจะเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวแก่เป็นสีเขียวอมเหลือง ซึ่งถือว่าเป็นระยะวิกฤตในการเจริญเติบโตของผล โดยมีอัตราการหายใจต่ำที่สุด แป้งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลด้วยอัตราคงที่ ปริมาณกรด และไนโตรเจนลดต่ำลง อัตราส่วนของคาร์โบไฮเดรตต่อไนโตรเจนสูงขึ้น และมีเปอร์เซ็นต์ซูโครสสูงที่สุด เมื่อถึงจุดที่เรียกว่า climacteric peak ผลจะมีคุณภาพในการรับประทานสูงสุด และต่อจากจุดนี้ไปแล้วผลจะเริ่มเข้าสู่ระยะการเสื่อมสภาพ (senescence)

4. ระยะ senescence ในระยะนี้เปลือกผลเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอย่างเด่นชัด เนื้อผลจะค่อย ๆ อ่อนตัวลง ต่อมาเนื้อเยื่อผลเริ่มสลายตัว ในที่สุดจะเน่าตายไป ใช้เวลาตั้งแต่วันที่ 77 หลังจากการปฏิสนธิเป็นต้นไป จะใช้เวลามากน้อยขึ้นอยู่กับพันธุ์ โดยอัตราการหายใจของผลสูงขึ้นแล้วจะลดลง การเจริญเติบโตของผลไม่เด่นชัด แรงดันออสโมติกเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำตาลลดลงจนถึงระดับต่ำสุด น้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นและลดลงตามจังหวะการลดของการหายใจ (respiratory intensity) ในขณะที่ซูโครสและแป้งลดลงอย่างเห็นได้ชัด ปริมาณกรดและไนโตรเจนในผลลดลง และอัตราส่วนของคาร์โบไฮเดรตต่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีบางชนิดของผลมะม่วงในระหว่างการเจริญเติบโต

ในระหว่างการเจริญเติบโตของผลมะม่วงมีการเปลี่ยนแปลงสารประกอบทางเคมีที่สำคัญบางชนิดดังต่อไปนี้ (เกศิณี , 2528)

1. แป้ง (starch) พบว่าแป้งจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นจนกระทั่งผลแก่ ผลจะมีความถ่วงจำเพาะและน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นในระหว่างที่ผลมีการเจริญเติบโต สัดส่วนของน้ำหนักแห้งและแป้งคงที่ในช่วง 2 วันสุดท้ายก่อนเก็บเกี่ยว ซึ่งนับว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมแก่การเก็บเกี่ยวผลผลิต หรือสังเกตจากสัดส่วนของแป้งกับกรด (starch : acid) ถ้ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 คือระยะที่เหมาะสมแก่การเก็บเกี่ยว

2. น้ำตาล (sugar) พบว่ามีปริมาณน้ำตาลกลูโคส และฟรุกโตสในขณะที่ผลใกล้แก่ ซึ่งน้ำตาลทั้งสองชนิดนี้จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งผลสุก ในขณะที่ระยะแรกของการเจริญเติบโตของผลไม่พบน้ำตาลทั้งสองชนิดดังกล่าว

3. กรด (acid) ปริมาณของกรดเป็นสัดส่วนผกผันกับน้ำตาล นั่นคือในระยะที่ผลเจริญเติบโตจะมีปริมาณของกรดอยู่มาก และปริมาณของกรดเริ่มลดลงเมื่อผลใกล้แก่ หลังจากนั้นปริมาณกรดจะมีน้อยมาก

4. แทนนิน (tannin) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับปริมาณกรด โดยการที่มีความเข้มข้นของแทนนินลดลงเมื่อผลเริ่มแก่มากขึ้นอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแทนนินเอง นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของแทนนินมีความสัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณน้ำยางใสน้ำยางขาว และความทนทานต่ออากาศร้อน

การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกผลมะม่วงในระหว่างการเจริญเติบโต

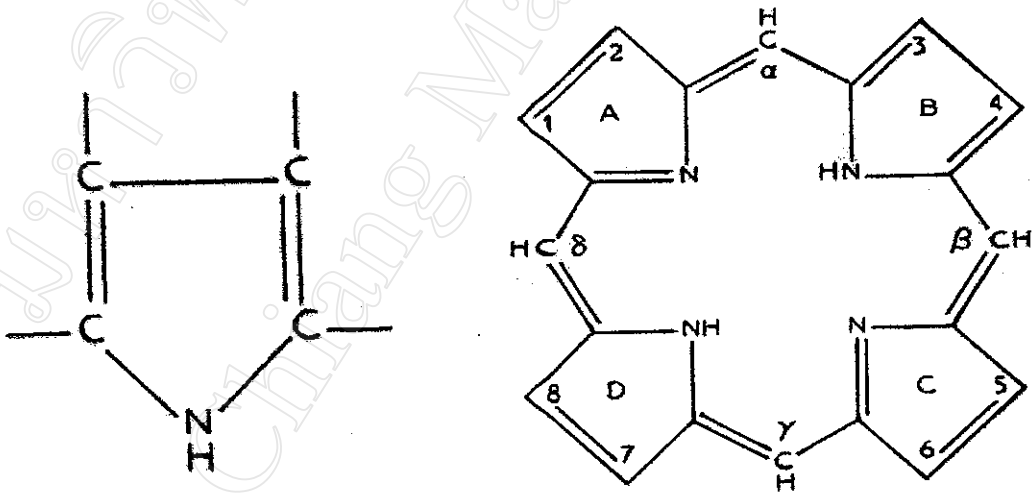
การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกผลเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกอย่างหนึ่ง ซึ่งสีสันของผลไม้มีความสำคัญมากในการแสดงคุณภาพของผลไม้ประการหนึ่ง สีของผลไม้ที่ปรากฏอยู่นั้นเกิดจากกลุ่มของรงควัตถุ(pigment)ต่างๆที่มีอยู่ในเซลล์พืช โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งชนิดและปริมาณของรงควัตถุตลอดระยะเวลาของการเจริญพัฒนาของผลิตผลแต่ละชนิด รงควัตถุหลักที่พบมากในผลไม้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ คลอโรฟีลล์ (chlorophylls) มีสีเขียว คาโรตินอยด์ (carotenoids) มีสีเหลืองจนถึงแดง และ ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) มีตั้งแต่สีแดงไปจนถึงสีม่วงหรือน้ำเงิน ซึ่งในแต่ละกลุ่มมีรงควัตถุที่สำคัญได้แก่ คลอโรฟีลล์ คาโรทีน (carotene)

และแอนโทไซยานิน (anthocyanins) ตามลำดับ (ดนัย , 2540) โดยรงควัตถุแต่ละกลุ่มมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังนี้

1. คลอโรฟีลล์ (chlorophylls)

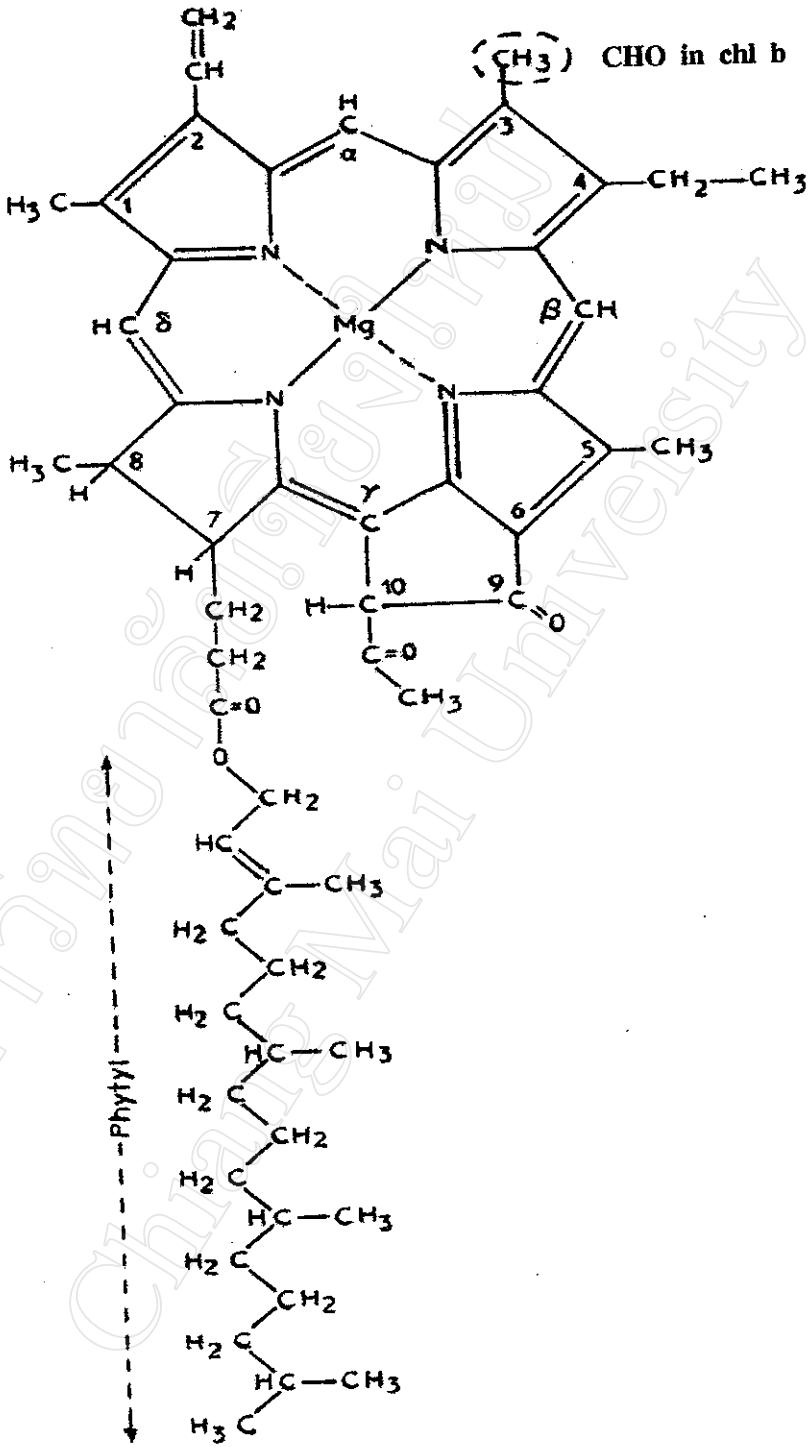
คลอโรฟีลล์เป็นกลุ่มของรงควัตถุที่มีสีเขียว ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสงของพืช กระจายตัวอยู่ในคลอโรพลาสต์ (chloroplasts) ซึ่งพบในส่วนไซโตพลาสซึม (cytoplasm) ของเซลล์ คลอโรฟีลล์มีหลายชนิด เช่น คลอโรฟีลล์ เอ คลอโรฟีลล์ บี คลอโรฟีลล์ ซี และคลอโรฟีลล์ ดี เป็นต้น ในพืชชั้นสูงทั่วไปจะมีคลอโรฟีลล์ เอ และคลอโรฟีลล์ บี เป็นองค์ประกอบที่สำคัญซึ่งจะพบอยู่ทั่วไปในส่วนที่มีสีเขียว เช่น ใบและผล โดยปริมาณของคลอโรฟีลล์อาจมีมากหรือน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอายุและส่วนต่างๆของพืชชนิดนั้น ๆ (Gross , 1987)

โครงสร้างของคลอโรฟีลล์ประกอบด้วย porphyrin ซึ่งประกอบด้วย pyrrole ring 4 วง เรียงตัวกันเป็นวง (รูปที่ 1) และ phytol ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 20 อะตอม มีลักษณะโครงสร้างแบบ isoprenoid ส่วนตรงกลางโมเลกุลคลอโรฟีลล์มีธาตุแมกนีเซียมอยู่ (รูปที่ 2) (Gross , 1987)



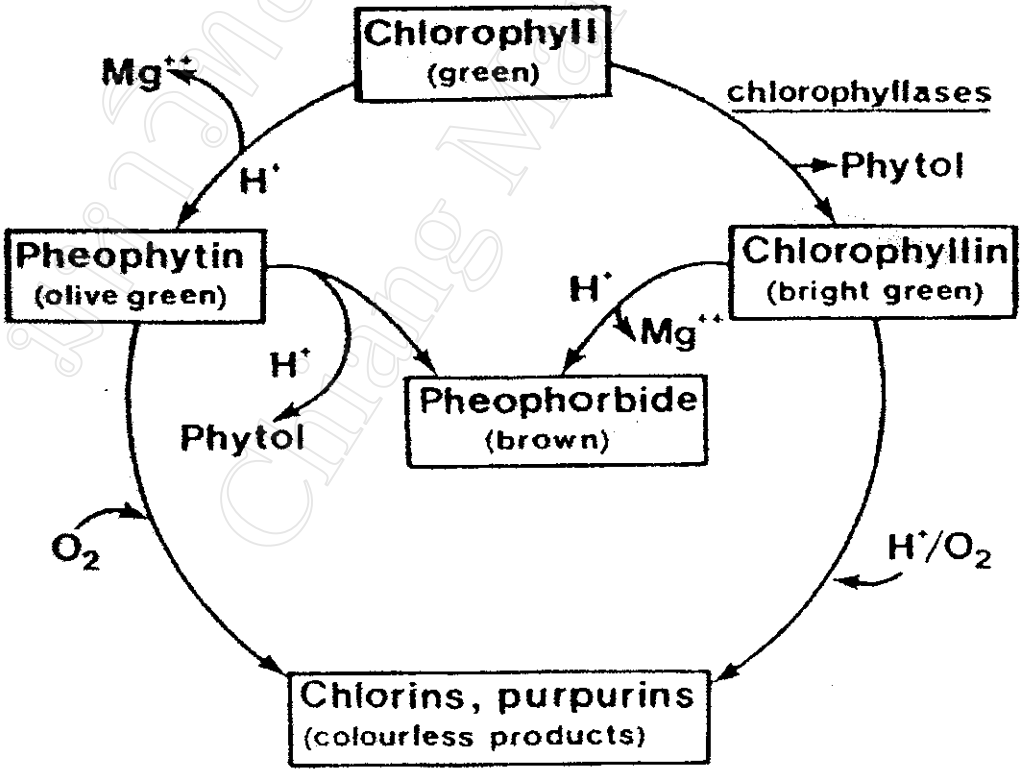
Pyrrole Porphyrin

รูปที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของ pyrrole และ porphyrin (Gross , 1987)



รูปที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ เอ (chlorophyll a) และคลอโรฟิลล์ บี (chlorophyll b) (Gross , 1987)

โมเลกุลของคลอโรฟิลล์จะถูกสร้างขึ้นและสลายตัวอยู่ตลอดเวลา โดยในระหว่างการชราภาพหรือการเสื่อมสภาพของพืชการสลายตัวจะเกิดขึ้นมากกว่าทำให้คลอโรฟิลล์หมดไปในที่สุด ซึ่งการสลายตัวของคลอโรฟิลล์อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก (1) สภาพที่เป็นกรดทำให้อะตอมของแมกนีเซียมหลุดออกไปจากส่วนหัวของโมเลกุลคลอโรฟิลล์ ได้สาร pheophytin ซึ่งยังมีสีเขียวอยู่ (2) การทำงานของเอนไซม์ chlorophyllase ซึ่งพบมากในขณะที่ผลกำลังสุกโดยมีรายงานว่าพบในผลแอปเปิ้ลและกล้วยหอม แต่อย่างไรก็ตามในมะเขือเทศไม่พบเอนไซม์นี้ (3) double bond ในวงแหวน porphyrin ถูกทำลายลง การสลายตัวของคลอโรฟิลล์แสดงในรูปที่ 3 ในผลไม้ส่วนใหญ่การเปลี่ยนแปลงสีจะเริ่มจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ทำให้สีเขียวหายไป ตามปกติจะเกิดร่วมกับการเกิดรงควัตถุชนิดอื่นๆ เช่น คาโรตินอยด์ และแอนโทไซยานิน ซึ่งในเนื้อเยื่อทั่วไปมักจะมีคาโรตินอยด์และแอนโทไซยานินปะปนอยู่ แต่สีของคาโรตินอยด์และแอนโทไซยานินจะถูกสีเขียวของคลอโรฟิลล์บังไว้ เมื่อคลอโรฟิลล์สลายตัวไปสีของคาโรตินอยด์และแอนโทไซยานินจึงปรากฏเด่นชัดออกมาได้ (ดนัย , 2540)



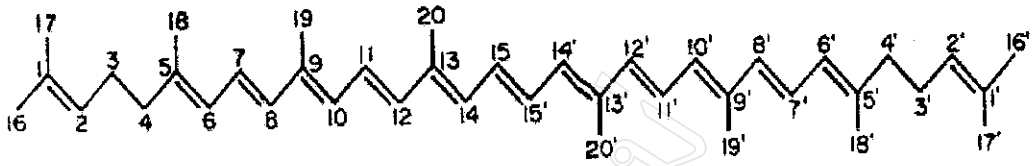
รูปที่ 3 การสลายตัวของรงควัตถุคลอโรฟิลล์ (Wills *et al.* , 1982 อ้างโดย ดนัย , 2540)

2. คาโรตินอยด์ (carotenoids)

คาโรตินอยด์เป็นกลุ่มของรงควัตถุที่มีสีเหลืองจนถึงสีแดงอยู่ภายในเม็ดโครโมพลาสต์ (chromoplast) ในเซลล์ของพืช คาโรตินอยด์เป็นรงควัตถุเสริมในกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยต้องถ่ายทอดพลังงานจากแสงที่ได้รับไปให้กับคลอโรฟีลล์ เอ เพื่อนำไปใช้ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสงต่อไป คาโรตินอยด์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon) ประกอบด้วย 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ คาโรทีน ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีออกซิเจน (oxygen free hydrocarbon) และแซนโทฟีลล์ (xanthophylls) ซึ่งมีออกซิเจนรวมอยู่ในโมเลกุลด้วย (ดนัย , 2540 และ Gross , 1987)

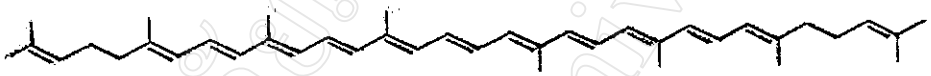
โครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของคาโรตินอยด์เป็นอนุพันธ์ที่ได้มาจาก acyclic polyene lycopene (รูปที่ 4) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{40}H_{56}$ ประกอบด้วย isoprenoid 8 กลุ่มต่อกัน โดยเมื่อถึงกลางโมเลกุล isoprenoid ที่ต่อกันจะต่อแบบกลับจากส่วนแรก ซึ่งสารประกอบนี้สามารถเกิดเป็นคาโรตินอยด์ชนิดอื่น ๆ ได้โดยกระบวนการ hydrogenation dehydrogenation cyclization oxidation หรือการเกิดร่วมกันของกระบวนการดังกล่าว โดยจะทำให้ carbon skeleton ของคาโรทีนมีการจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็นคาโรตินอยด์ชนิดต่าง ๆ เช่น คาโรทีน ไลโคพีน (lycopene) แซนโทฟีลล์ (xanthophyll) และคริพโตแซนธิน (cryptoxanthin) เป็นต้น ซึ่งสูตรโครงสร้างของรงควัตถุดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5 (Gross , 1987)

ในผักและผลไม้ทั่วไปมักจะมีรงควัตถุคาโรตินอยด์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย แต่ถูกสีเขียวของคลอโรฟีลล์บดบังไว้ เมื่อผักและผลไม้เริ่มเสื่อมสภาพลง คลอโรฟีลล์จะสลายตัวไป สีของคาโรตินอยด์จึงปรากฏให้เห็น ถึงแม้คาโรตินอยด์จะเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวแต่คาโรตินอยด์มีคุณสมบัติที่ค่อนข้างเสถียรกว่ารงควัตถุในกลุ่มคลอโรฟีลล์และแอนโทไซยานินโดยเฉพาะไลโคพีน และ เบต้า - คาโรทีน จะมีปริมาณและคงตัวมากกว่าตัวอื่น (จริงแท้ , 2541) ดังนั้นรงควัตถุในกลุ่มคาโรตินอยด์จะมีการเปลี่ยนแปลงและสลายตัวได้ยาก การสลายตัวของคาโรตินอยด์จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการเสื่อมสภาพหรือการหมดอายุขัยของพืชนั้น ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากปัจจัยภายในของพืช เช่น เซลล์ของพืชเสื่อมสภาพหรือมีการสะสมสารพิษเมื่อมีอายุมากขึ้นเป็นต้น การสร้างและการสลายตัวของคาโรตินอยด์จะขึ้นกับปัจจัยภายใน และปัจจัยภายนอก เช่น ระดับฮอร์โมนภายในพืช แสง ออกซิเจน ปุ๋ย และการปฏิบัติต่อต้นพืช เป็นต้น (ดนัย , 2540 และ จริงแท้ , 2541)

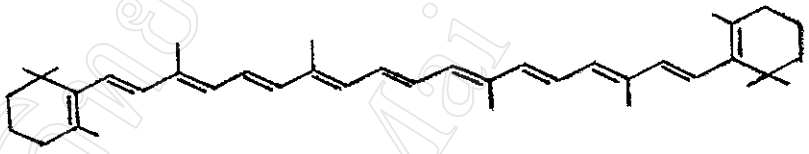


Lycopene (ψ,ψ- carotene)

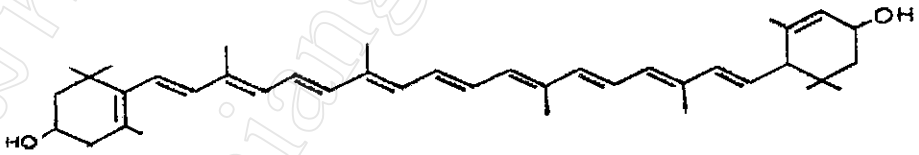
รูปที่ 4 โครงสร้างโมเลกุลของ acyclic polyene lycopene (Gross , 1987)



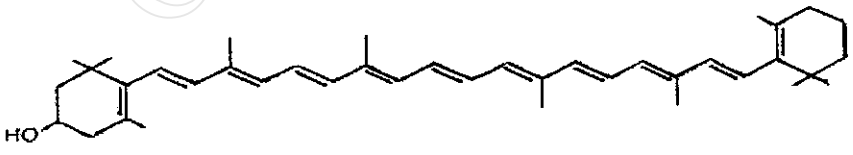
Lypene (Ψ, Ψ- carotene)



β- carotene (β, β- carotene)



Lutein (β,ε carotene – 3 , 3' - diol)



Cryptoxanthin (β, β- carotene – 3 - ol)

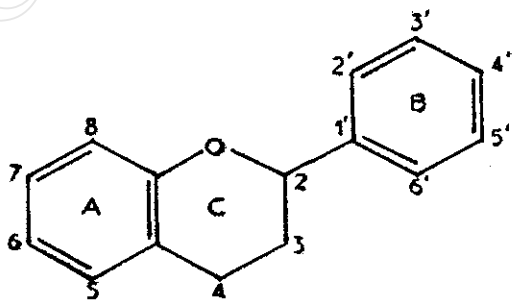
รูปที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลของคาโรตินอยด์ (ดัดแปลงจาก Gross , 1987 และ Wrolstod , 1982 อ้างโดย ดนัย , 2540)

โดยทั่วไปมะม่วงส่วนใหญ่ที่ปลูกในประเทศไทยมีสีเปลือกที่เห็นได้ชัดคือสีเขียวและสีเหลืองซึ่งเกิดจากรงควัตถุ 2 กลุ่มคือ สีเขียวของรงควัตถุคลอโรฟีลล์ และสีเหลืองของรงควัตถุคาโรตินอยด์ โดยสีเขียวของคลอโรฟีลล์จะหายไปเมื่อผลเข้าสู่ระยะการสุกในขณะที่สีเหลืองของคาโรตินอยด์ซึ่งมีอยู่แล้วจะปรากฏให้เห็นชัดขึ้นดังกล่าวข้างต้น (จิรา , 2531) สำหรับมะม่วงพันธุ์เคนท์นอกจากมีรงควัตถุ 2 กลุ่มดังกล่าวข้างต้นแล้วยังมีรงควัตถุอีกกลุ่มหนึ่งคือรงควัตถุแอนโทไซยานิน (ดิศร , 2541)

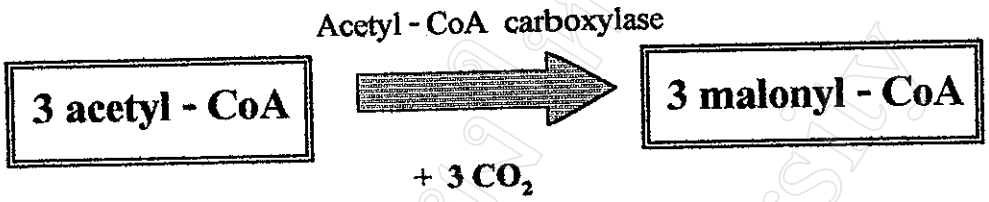
3. แอนโทไซยานิน (anthocyanins)

รงควัตถุแอนโทไซยานินเป็นกลุ่มของรงควัตถุที่มีสีแดงไปจนถึงสีม่วงหรือน้ำเงิน อยู่ในกลุ่มของรงควัตถุที่มีชื่อว่าฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ (จริงแท้ , 2541) พบอยู่ในแวคคิวโอของเซลล์ในชั้น sub - epidermis ของเนื้อเยื่อใบ ดอก และเปลือกผล โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสีไปตามค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลายในแวคคิวโอที่เปลี่ยนแปลงไป (Moskowitz and Harazadina , 1981)

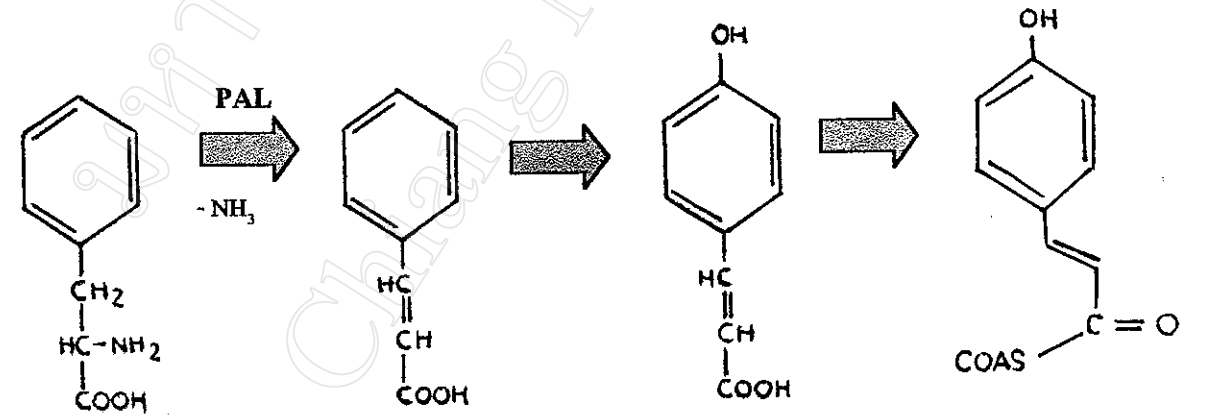
โครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญของแอนโทไซยานินเรียกว่า flavan nucleus ประกอบด้วย ring A ring B และ ring C โดย ring A และ ring B เป็น ring สำคัญที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นสารอนุพันธ์ตัวอื่น และมี ring C เป็นตัวเชื่อมระหว่าง ring A และ ring B ดังรูปที่ 6 (Gross , 1987) aromatic ring ของ flavan nucleus จะมาจาก precursor 2 ตัวแตกต่างกันคือ ring A มาจาก acetate และ ring B มาจาก phenylalanine ซึ่งทั้งสอง ring นี้จะมาเชื่อมกันโดยปฏิกิริยา condensation โดย active precursor ของ ring A คือ malonyl-CoA ซึ่งได้มาจากการเกิด carboxylation ของ acetyl - CoA โดยเอนไซม์ acetyl - CoA carboxylase (รูปที่ 7) ส่วน active precursor ของ ring B คือ *p* - coumaryl - CoA ซึ่งมาจากปฏิกิริยา general phenylpropanoid metabolism (รูปที่ 8)



รูปที่ 6 โครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของแอนโทไซยานิน (flavan nucleus) (Gross , 1987)



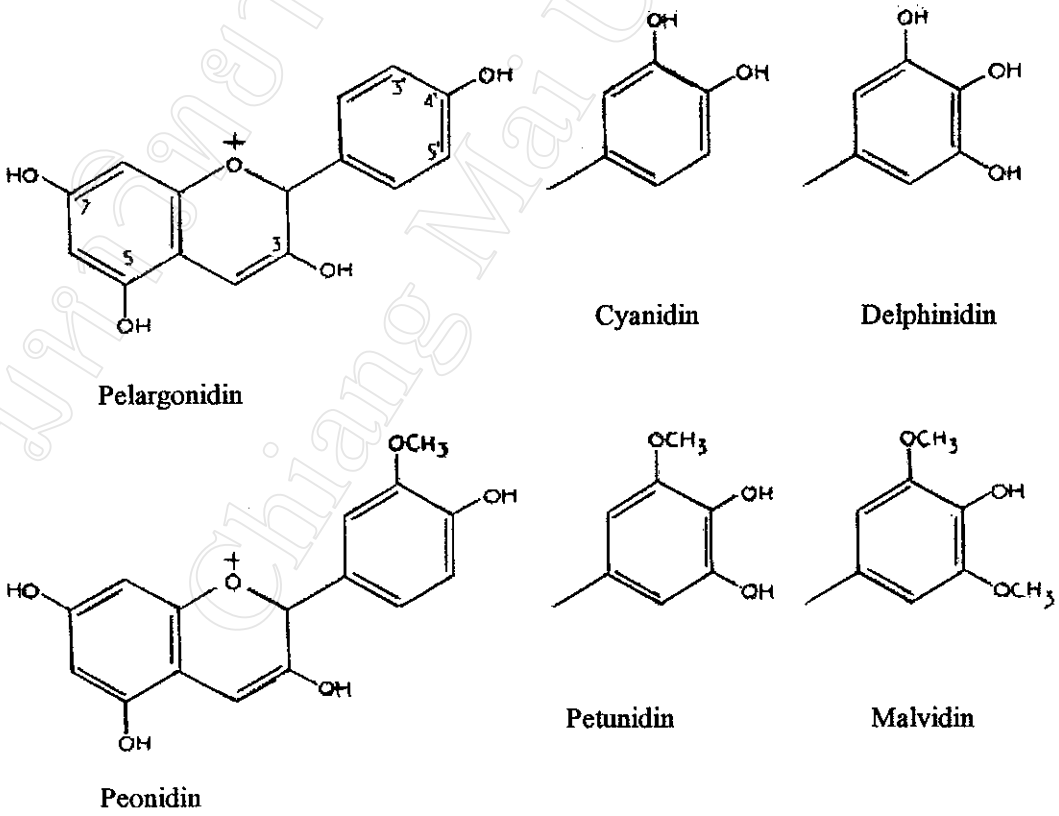
รูปที่ 7 กระบวนการสังเคราะห์ malonyl - CoA (ดัดแปลงจาก Mazza and Miniati , 1993)



Phenylalanine Cinnamic acid *p* – coumaric acid *p* – coumaryl - CoA

รูปที่ 8 กระบวนการสังเคราะห์ *p* - coumaryl - CoA (general phenylpropanoid metabolism) (Gross , 1987)

Gross (1987) ได้แบ่งชนิดของรงควัตถุแอนโทไซยานินออกเป็น 6 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้คือ pelargonidin cyanidin delphinidin peonidin petunidin และ malvidin ซึ่งสูตรโครงสร้างของแอนโทไซยานินทั้ง 6 กลุ่มนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 9 โดยในพืชแต่ละชนิดจะประกอบด้วยแอนโทไซยานินชนิดต่าง ๆ แตกต่างกันไป เช่น ในเปลือกผลสุกของ ornamental cherries (*Prunus sarganti* Rehd) ประกอบด้วย pelargonidin - 3 - glucoside cyanidin - 3 - glucoside และ cyanidin - 3 - diglucoside (Du *et al.* , 1975) และในเปลือกผลลิ้นจี่พันธุ์ Brewster มีแอนโทไซยานินชนิดหลักที่พบคือ cyanidin - 3 - glucoside และ malvidin - 3 - acetyl - glucoside (Lee and Wicker , 1991) นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาในเนื้อเยื่อชั้น sub - epidermis ของเปลือกผลองุ่นพันธุ์ De Chaunae ประกอบด้วย flavonol glycosides hydroxycinnamic acid esters organic acid น้ำตาล และ cations โดยแอนโทไซยานินจะอยู่ในรูป non - complexed (Moskowitz and Hrazdina , 1981)



รูปที่ 9 โครงสร้างโมเลกุลของแอนโทไซยานินทั้ง 6 กลุ่ม (Gross , 1987)

จากสูตรโครงสร้างของแอนโทไซยานินทั้ง 6 กลุ่ม (รูปที่ 9) จะเห็นได้ว่าแอนโทไซยานินจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเรื่อย ๆ โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณ side chain ของ ring B นั่นแสดงว่าแอนโทไซยานินในเซลล์ของพืชหรือในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพืชนั้นจะไม่ค่อยเสถียร เมื่อโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปก็จะทำให้สีเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น แสง อุณหภูมิ สภาพความเป็นกรด - เบส เป็นต้น (จริงแท้ , 2541)

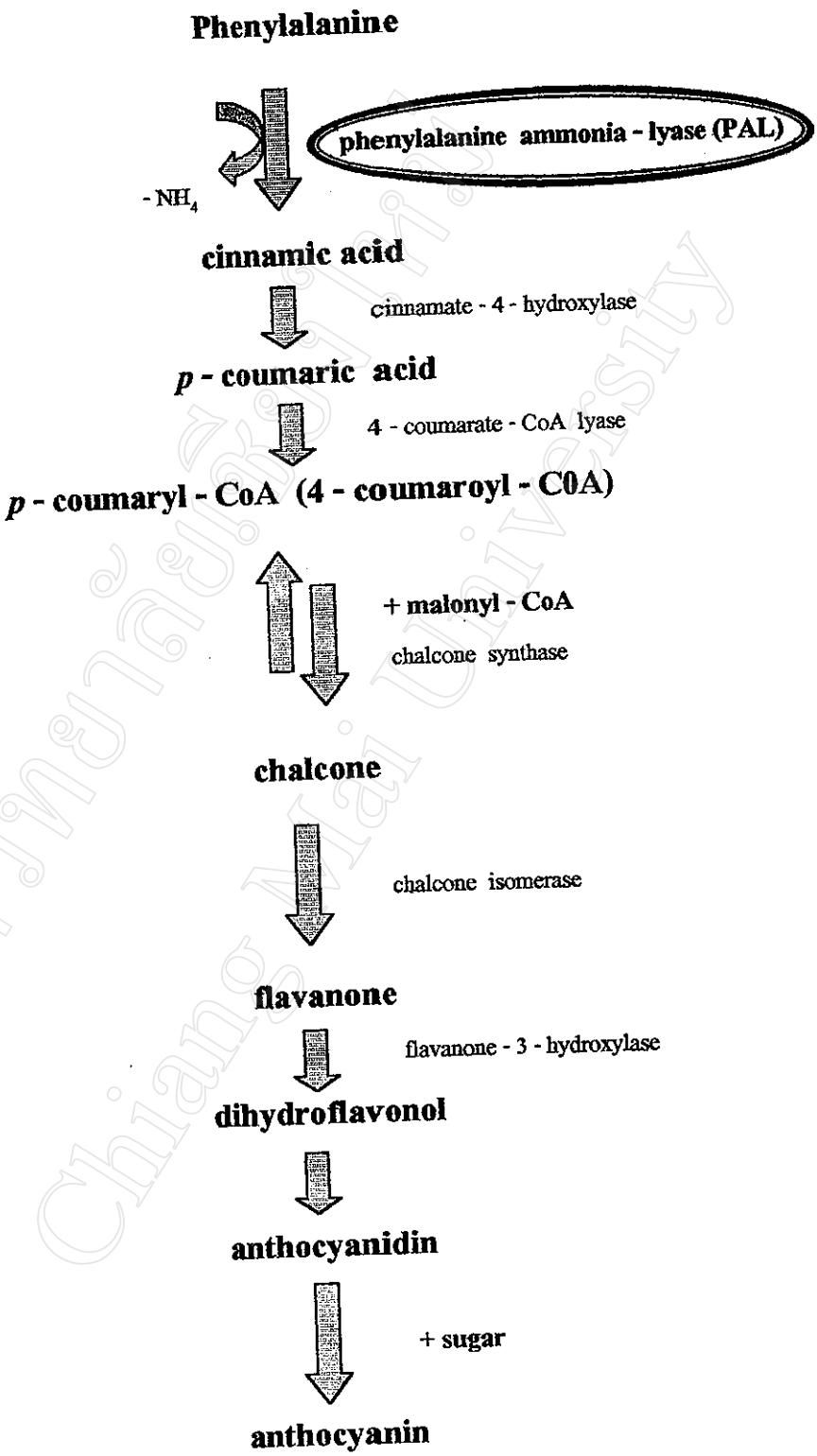
มะม่วงพันธุ์เคนท์ (Kent) ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นำมาทำการวิจัยในครั้งนี้เป็นพันธุ์ต่างประเทศที่เกิดจากการกลายพันธุ์ของมะม่วงพันธุ์บรูกส์ ผลมีขนาดเล็ก ทรงไข่อูม อกและแก้มผลนูน ปลายผลสอบมน มีเนื้อมาก ไม่มีจงอย น้ำหนักผลเฉลี่ย 350 - 500 กรัม ผิวเรียบเกลี้ยงเกลา เปลือกผลหนาและเหนียว ผลดิบสีเขียวคล้ำ บริเวณด้านบนของผลมีสีแดงอมชมพู เมื่อผลสุกจะเป็นสีเหลืองส้ม เนื้อผลสีเหลืองอมแดง เนื้อนุ่มละเอียด มีเสี้ยนน้อย มีน้ำมาก รสอร่อย หวาน มีกลิ่นหอมอ่อน ๆ (วิจิตร , 2529) เปลือกผลมีรงควัตถุปรากฏให้เห็นอยู่ 3 กลุ่ม คือ สีเขียวของกลุ่มคลอโรฟีลล์ สีเหลืองของกลุ่มคาโรตินอยด์ และสีแดงของกลุ่มแอนโทไซยานิน ซึ่งต่างจากมะม่วงในประเทศที่มีรงควัตถุเพียง 2 กลุ่ม คือ สีเขียวของกลุ่มคลอโรฟีลล์ และ สีเหลืองของกลุ่มคาโรตินอยด์เท่านั้น ซึ่งมีรายงานพบว่าในระหว่างการเจริญพัฒนาของผลมะม่วงพันธุ์นี้ (60 - 110 วันหลังจากดอกบาน) มีการเปลี่ยนแปลงทั้งชนิดและปริมาณของรงควัตถุทั้ง 3 กลุ่ม โดยปริมาณคลอโรฟีลล์จะลดลงเมื่อผลมีอายุมากขึ้น และในช่วงที่ผลสุกสีเหลืองของรงควัตถุคาโรตินอยด์จะมีปริมาณสูงขึ้น ในขณะที่รงควัตถุแอนโทไซยานินซึ่งมีสีแดงมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตลอดระยะเวลาการพัฒนาของผล (ดิศร , 2541)

มะม่วงพันธุ์เคนท์ที่ปลูกในประเทศไทยมีปัญหาที่สำคัญคือ มีการพัฒนาสีแดงที่เปลือกผลน้อยมาก เนื่องจากรงควัตถุแอนโทไซยานินบนเปลือกผลมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ทำให้ผลมีสีสันไม่สวยงามดึงดูดผู้บริโภค ส่งผลให้ระดับคุณภาพและราคาของผลลดลง โดยรงควัตถุที่มีความสำคัญต่อการเกิดสีแดงบนเปลือกผลก็คือ รงควัตถุแอนโทไซยานิน

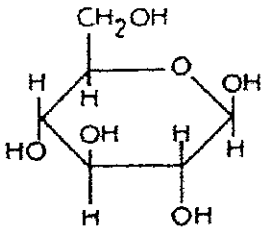
การสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานิน (anthocyanin biosynthesis)

การสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานิน (รูปที่ 10) เริ่มจากการเปลี่ยน phenylalanine มาเป็น cinnamic acid โดยเกิดปฏิกิริยา elimination ของแอมโมเนีย โดยมีเอนไซม์ phenylalanine ammonia – lyase (PAL) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นเอนไซม์ cinnamate - 4 - hydroxylase จะช่วยเปลี่ยนจาก cinnamic acid ไปเป็น *p* - coumaric acid ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่แอคทีฟ กระบวนการสังเคราะห์ *p* - coumaric acid จาก phenylalanine ดังกล่าวมานี้เรียกว่าปฏิกิริยา general phenylpropanoid metabolism (รูปที่ 8) จากนั้นเอนไซม์ 4 - coumalate - CoA lyase จะเปลี่ยน *p* - coumaric acid เป็น *p* - coumaryl - CoA (4 - coumaroyl - CoA) ซึ่งเป็นรูปที่แอคทีฟ *p* - coumaryl - CoA จะรวมกับ malonyl - CoA ได้เป็น chalcone โดยมีเอนไซม์ chalcone synthase ช่วยเร่งปฏิกิริยา ซึ่งถือว่าทั้ง *p* – coumaryl - CoA และ malonyl - CoA เป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน จากนั้น chalcone จะถูกเปลี่ยนเป็น flavanone โดยอาศัยเอนไซม์ช่วยเร่งปฏิกิริยาคือ chalcone isomerase ต่อจากนั้น flavanone จะเกิดปฏิกิริยา glycosylation และ acylation ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สามได้เป็น anthocyanidin โดยผ่านทาง dihydroflavonol จากนั้น anthocyanidin จะรวมตัวกับน้ำตาลได้เป็นรงควัตถุแอนโทไซยานินชนิดต่าง ๆ ซึ่งน้ำตาลที่มาเกาะอยู่กับโมเลกุลของแอนโทไซยานินมีมากมาย เช่น β - D – glucopyranose gentiobiose sambubiose rutinose และ 2^{G}- glucosylrutinose เป็นต้น (Gross , 1987) (รูปที่ 11)

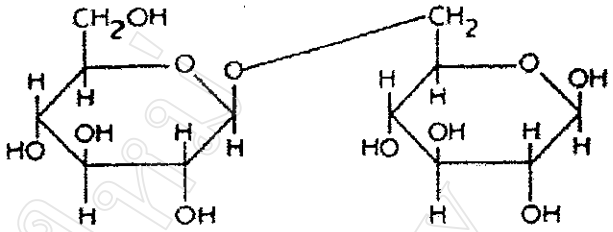
โดยทั่วไปพบว่ามีการสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานินในปริมาณมากในช่วงที่พืชเข้าสู่ระยะการสุกแก่ หรือผลิตผลอยู่ในระยะแก่เต็มที่ เช่น ในการพัฒนาของผลลิ้นจี่พันธุ์ Kway May Pink ภายหลังจากถ่ายละอองเกสรแล้ว 21 - 103 วัน ซึ่งเป็นช่วงที่ผลลิ้นจี่เข้าสู่ระยะการสุกแก่จะมีการสลายตัวของคลอโรฟีลล์และมีการสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานินขึ้นมาแทนที่เรื่อย ๆ (Underhill and Critchley ,1993) และในผลองุ่นพันธุ์ Shairaz grape berries จะเริ่มมีการสังเคราะห์แอนโทไซยานินภายหลังจากดอกบาน 10 สัปดาห์ และเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งผลสุก (Boss *et al.* ,1996) ส่วนในการพัฒนาของผลแอปเปิ้ลพันธุ์ Jonathan จากระยะอ่อน (immature) จนถึงระยะแก่ (mature) จะมีการสะสมแอนโทไซยานินในเปลือกผลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นดัชนีวัดความแก่ของแอปเปิ้ลในพันธุ์ที่มีสีแดงได้ (Chalmers *et al.*, 1973) แต่การศึกษาในใบไอวี่พบว่าในใบไอวี่ที่ยังอ่อนอยู่มีการสะสมรงควัตถุแอนโทไซยานิน ส่วนในใบแก่จะมีการสะสม quercetin แต่ไม่มีการสะสม แอนโทไซยานินเลยที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากในใบแก่ไม่มีแอคติวิตีของเอนไซม์ dihydroflavonol reductase (DFR) (Murray and Hackett , 1991)



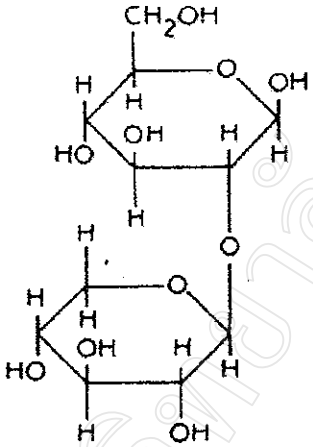
รูปที่ 10 การสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานิน (ดัดแปลงจาก Gross , 1987 : Mazza and Miniati , 1993 และ Friend and Rhodes , 1981)



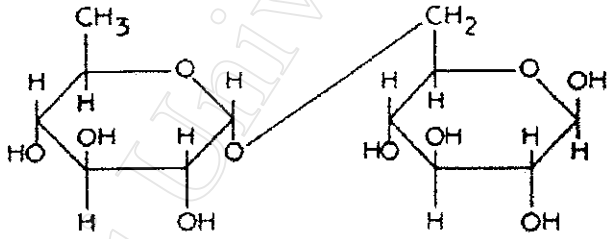
B – D – Glucopyranose



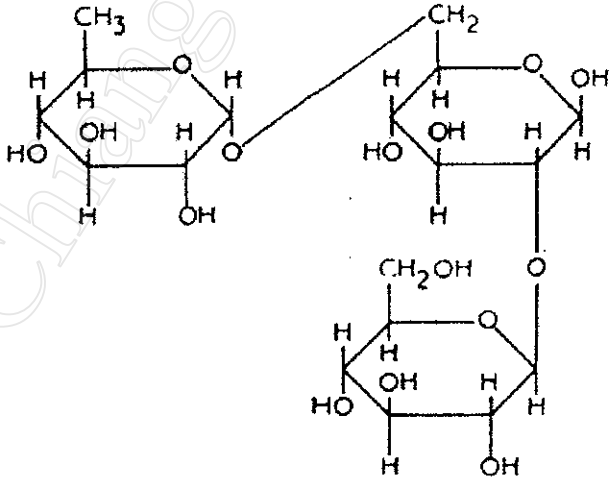
Gentiobiose



Sambubiose



Rutinose



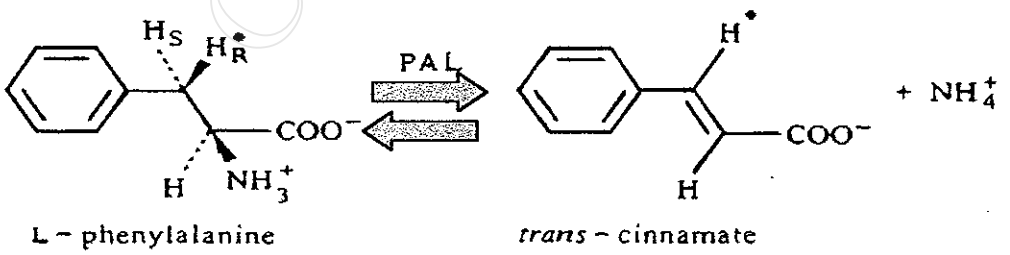
2^{G} – Glucosylrutinose

รูปที่ 11 โครงสร้างโมเลกุลของน้ำตาลที่ประกอบอยู่ในแอนโทไซยานิน (Gross , 1987)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาหาปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดในผลไม้ต่างประเทศหลายชนิดซึ่งพบว่ามีปริมาณแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้นั้นๆ โดยการวิเคราะห์ในระยะที่ผลสุกของ cranberry red currant sour cherry muscadine grape raspberry และ strawberry พบว่ามีปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดเท่ากับ 45 - 100 16 45 40 - 403 20 - 60 45 - 70 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด ตามลำดับ (Gross, 1987) ส่วนในประเทศไทยมีรายงานการศึกษาในเปลือกผลลิ้นจี่และมะม่วงพันธุ์เคนท์พบว่าในระยะสุกแก่มีค่าปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดเท่ากับ 40 - 50 และ 1.7 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม น้ำหนักสด ตามลำดับ (อัญชุลี , 2539 และ กอบเกียรติ และคณะ , 2540)

จากกระบวนการสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานิน (รูปที่ 10) เอนไซม์ PAL ถือว่าเป็นเอนไซม์ที่มีความสำคัญและเป็น key enzyme ในการสังเคราะห์รงควัตถุนี้ (Gross , 1987) โดยเอนไซม์ PAL มีผลโดยตรงต่อการสร้างสารตั้งต้นของแอนโทไซยานินซึ่งมีผลต่อการสร้าง flavan nucleus ที่เป็นโมเลกุลพื้นฐานของแอนโทไซยานิน (Saure ,1990) โดยเอนไซม์ PAL ถูกค้นพบครั้งแรกในต้นกล้าของข้าวบาร์เลย์เมื่อประมาณ 22 ปีที่ผ่านมาโดย Koukol and Conn (1961) อ้างโดย Jones (1984) เอนไซม์นี้เป็นเอนไซม์ที่เร่งการเกิด elimination ของแอมโมเนียและ *pro* - 3S hydrogen จาก L - phenylalanine ไปเป็น *trans* - cinnamic acid ดังในรูปที่ 12 ซึ่งตรงจุดนี้เป็นขั้นตอนแรกของการสังเคราะห์ phenylalanine skeleton ในพืชชั้นสูงทั่วไป (Jones , 1984) *trans* - cinnamic acid นี้จะเกิดเป็น *p* - coumaric acid ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์แอนโทไซยานินต่อไปดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและเชื้อราบางชนิดพบว่า *p* - coumaric acid นอกจากจะถูกเปลี่ยนมาจาก L - phenylalanine โดยเอนไซม์ PAL แล้ว ยังเปลี่ยนมาจาก L - tyrosine โดยเอนไซม์ tyrosine ammonia - lyase (Rosler *et al.* , 1997)



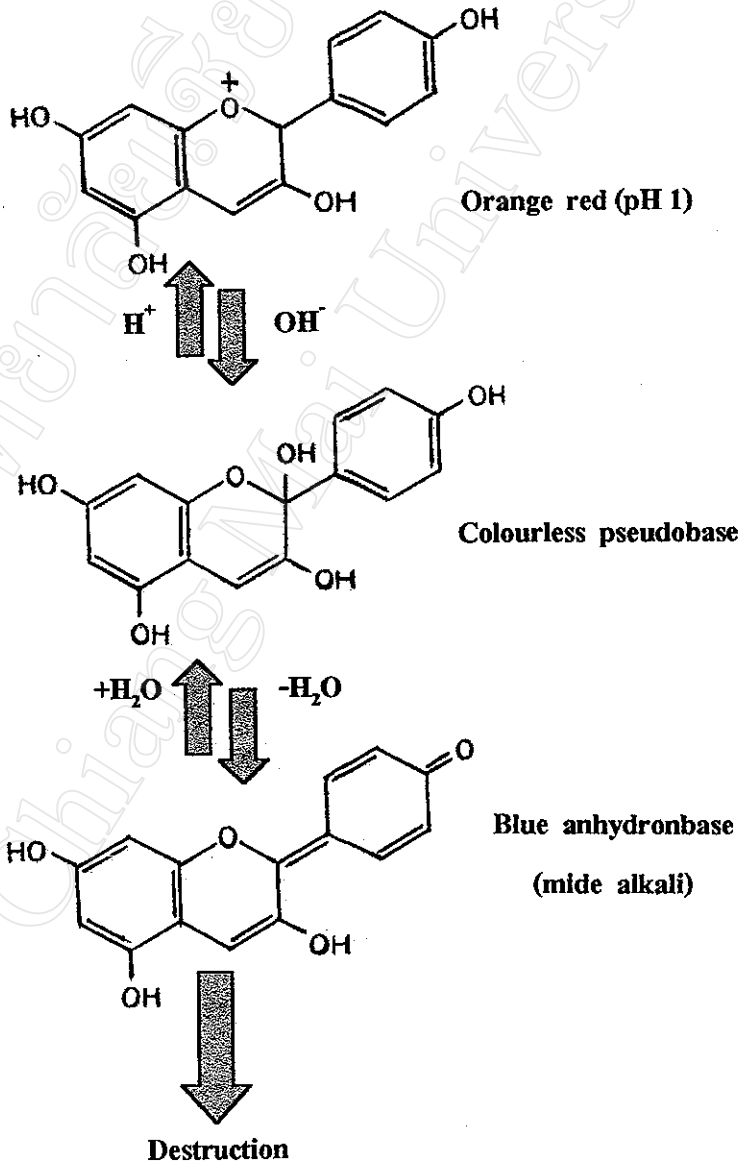
รูปที่ 12 กระบวนการ deamination ของ L – phenylalanine ซึ่งถูกเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ PAL (Jones , 1984)

การทำให้เอนไซม์ PAL บริสุทธิ์ (purification) นั้นสามารถทำได้โดยผ่านขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ การแยกส่วนของ ammonium sulphate การทำ chromatography โดย anion exchange การทำ gel filtration การทำ hydroxylapatile chromatography และการทำ polyacrylamide gel electrophoresis (PAGE) (Zimmerman and Hahlbrock , 1968 และ Havir , 1981 อ้างโดย Jones , 1984)

แอคติวิตีของเอนไซม์ PAL สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงการเจริญเติบโตของพืชโดยจะมีความ sensitive สูงมากต่อ physiological stage ในพืช นอกจากนี้ยังพบว่ามีปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL เช่น แสง อุณหภูมิ ฮอร์โมน การเกิดบาดแผล เป็นต้น มีรายงานการศึกษาการเปลี่ยนแปลงแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ในผลไม้บางชนิด เช่น ในระหว่างการสุกของผลสตรอเบอรี่พบว่าแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL มีความสัมพันธ์กับการสะสมแอนโทไซยานิน โดยในช่วงแรกจะมีการสะสมแอนโทไซยานินน้อยมากและจะเริ่มมีการสะสมมากขึ้นในวันที่ 23 หลังการถ่ายละอองเกสร ส่วนแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL จะเพิ่มขึ้นสองครั้ง โดยครั้งแรกเกิดในช่วงที่ผลยังไม่สุกคือในวันที่ 5 และอีกครั้งหนึ่งคือในวันที่ 27 หลังการถ่ายละอองเกสรซึ่งอยู่ในช่วงที่ผลกำลังสุก (Cheng and Breen ,1991) Lister *et al.* (1996) ได้ทำการศึกษาเอนไซม์ 3 ชนิดในการสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์คือ phenylalanine ammonia - lyasse (PAL) chalcone isomerase (CHI) และ glycosyltransferase (UFGT) ในช่วงการพัฒนาของผลแอปเปิ้ลพันธุ์ที่มีสีแดงพันธุ์ Splendour และในพันธุ์ที่มีสีเขียวพันธุ์ Granny Smith พบว่าแอคติวิตีของเอนไซม์จะสูงในช่วงที่ผลยังอ่อนอยู่และจะลดลงระหว่างช่วงกลางฤดู เมื่อผลเริ่มสุกจะเป็นสีแดง แอคติวิตีของเอนไซม์จะสูงขึ้นอีกครั้งแต่น้อยกว่าในผลอ่อน ซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟลาโวนอยด์ทั้งหมดกับแอคติวิตีของ PAL ในพันธุ์ Granny Smith ส่วนพันธุ์ Splendour ไม่พบความสัมพันธ์ดังกล่าว ยกเว้นในระหว่างที่ผลสุกซึ่งจะมีสีแดงเกิดขึ้น แต่พบว่าเอนไซม์ทั้ง 3 ดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับระดับแอนโทไซยานินในระหว่างที่เกิดสีแดงในทุก ๆ ระยะของการพัฒนาของผล โดยในพันธุ์ที่มีสีแดงมีความสัมพันธ์ดังกล่าวสูงกว่าในพันธุ์ที่มีสีเขียว

การสลายตัวของแอนโทไซยานิน

การสลายตัวของแอนโทไซยานินเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโทไซยานินในแวคคิวโออันเนื่องมาจากปัจจัยหลายประการ เช่น ระดับความเป็นกรด - ด่าง (pH) ในแวคคิวโอ (รูปที่ 13) ปริมาณน้ำตาลในเซลล์ อายุของพืช แสง อุณหภูมิ ระดับฮอร์โมนภายในพืช และฮอร์โมนหรือสารเคมีที่ให้จากภายนอก เป็นต้น (Saure , 1990 และ Gross , 1987)



รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโทไซยานินเนื่องจาก pH (Gross , 1987)

ปัจจัยบางประการที่มีผลต่อแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL และปริมาณรงควัตถุแอนโทไซยานิน

มีการศึกษาพบว่าแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL และการสะสมปริมาณรงควัตถุแอนโทไซยานินในพืชชั้นสูงขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมสำคัญหลายอย่าง เช่น แสง อุณหภูมิ สารควบคุมการเจริญเติบโต และแร่ธาตุอาหาร เป็นต้น

1. แสง (light)

แสงมีผลกระตุ้นหรือส่งเสริมการทำงานของเอนไซม์ PAL และการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในพืชโดยให้ผลแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดหรือพันธุ์พืชนั้น ๆ ดังมีรายละเอียดดังนี้

Zucker (1968) พบว่าการให้ชิ้นส่วนของหัวมันฝรั่งที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ได้รับแสงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถชักนำให้เกิดการสังเคราะห์เอนไซม์ PAL ในชิ้นส่วนของหัวมันฝรั่งได้

Engelsma (1970) ได้ศึกษาเปรียบเทียบแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ในส่วน hypocotyls ของผัก 2 ชนิดคือแตง gherkin ซึ่งเป็นผักพวกแตงกวา และ red cabbage ซึ่งเป็นกะหล่ำปลีที่มีสีแดง พบว่าแสงมีผลเพิ่มแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ใน red cabbage ให้สูงขึ้น แต่มีผลทำให้แอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ในแตง gherkin ลดลงซึ่งเป็นผลเนื่องจาก PAL - inactivating system (PAL - IS) การขาดกลไกของ PAL - IS ใน hypocotyl ของ red cabbage ชักนำให้เกิดการสร้างเอนไซม์ PAL โดย photoinduction ได้ดี แอคติวิตีของ PAL จึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนในแตง gherkin นั้นแอคติวิตีของ PAL จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในเวลาเดียวกัน

Engelsma (1974) ได้ทำการศึกษาในต้นกล้าแตง gherkin ที่มีอายุ 3 วัน โดยให้ได้รับแสงอัลตร้าไวโอเล็ต (UV 365) และแสงสีน้ำเงิน (blue light) เป็นเวลา 15 นาที พบว่าแสงดังกล่าวมีผลทำให้แอคติวิตีของเอนไซม์PALเกิดการเปลี่ยนแปลงได้โดยมีผลต่อการเปลี่ยนรูปของ *trans – cis* – hydroxycinnamic acid

Proctor (1974) ทำการศึกษาการพัฒนาสีของผลแอปเปิ้ล 7 พันธุ์ คือ พันธุ์ McIntosh Delicious Northern Spy Idared Spartan Mutsu และ Cortland โดยให้ได้รับ artificial light ร่วมกับแสงที่ได้รับจากธรรมชาติ พบว่าปริมาณแอนโทไซยานินมีความสัมพันธ์กับพลังงานแสงที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นในพันธุ์ McIntosh Northern Spy และ Cortland นอกจากนี้ยังพบว่าผลแอปเปิ้ลแต่ละพันธุ์มีความต้องการพลังงานแสงที่น้อยที่สุดในระดับแตกต่างกันในการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน

Faragher and Chalmers (1977) ได้ศึกษาการควบคุมการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในเปลือกผลแอปเปิ้ลพันธุ์ Jonathan พบว่ามีความสัมพันธ์กับแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL โดยเมื่อให้แสงอัลตร้าไวโอเล็ต (UV 254 nm) แก่ผลแอปเปิ้ลจะสามารถกระตุ้นเอนไซม์ชนิดนี้ทำให้มีการสะสมรงควัตถุแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น โดยแอคติวิตีของเอนไซม์สูงสุดหลังจากได้รับแสงแล้ว 30 ชั่วโมง และหลังจากนั้นจะลดลง ส่วนแอนโทไซยานินจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณสูงสุดในชั่วโมงที่ 20 หลังจากได้รับแสงซึ่งในเวลานี้แอคติวิตีของเอนไซม์ PAL จะมีค่าต่ำสุด สำหรับในสภาพที่ไม่ได้รับแสงพบว่าเปลือกผลของแอปเปิ้ล (whole fruit skin) จะไม่มีการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน และไม่มีแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL แต่ถ้าเป็นชิ้นส่วนของเปลือกผล (skin disc) พบว่ามีแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ในระดับเดียวกันกับชิ้นส่วนที่ได้รับแสง

Tan (1979) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง phenylalanine ammonia - lyase (PAL) phenylalanine ammonia - lyase inactivating system (PAL - IS) และปริมาณแอนโทไซยานินในเปลือกของผลแอปเปิ้ลพันธุ์ Red Spy ในสภาพอุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส พบว่าในสภาพที่ได้รับแสงแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่แอคติวิตีของ PAL - IS มีค่าลดลง ส่วนในสภาพที่ไม่ได้รับแสงพบว่าจะไม่เกิดการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน และเอนไซม์ PAL มีแอคติวิตีต่ำมาก แต่ส่วนของ skin disc ในสภาพเดียวกันนี้จะมีแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL สูงขึ้น และไม่เกิดการสังเคราะห์แอนโทไซยานินเช่นเดียวกัน

Arakawa *et al.* (1986) ศึกษาถึงการพัฒนาสีและความสัมพันธ์ระหว่างการสังเคราะห์แอนโทไซยานินและแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ในผลแอปเปิ้ลพันธุ์ Starking Delicious Fuji ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีสีแดง และพันธุ์ Mutsu ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีสีเหลือง โดยเมื่อให้แสงอัลตร้าไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 312 นาโนเมตร (UV 312) สามารถส่งเสริมแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL และกระตุ้นการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในแอปเปิ้ลพันธุ์ที่มีสีแดงได้ แต่ในพันธุ์ที่มีสีเหลืองพบว่าแสงสามารถกระตุ้นแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ได้แต่ไม่สามารถชักนำให้เกิดการสังเคราะห์แอนโทไซยานินได้

Weiss and Halevy (1991) ศึกษาถึงผลของปฏิกิริยาแสง (light reaction) ต่อการสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานินในกลีบดอก petunia (*Petunia hybrida* cv. Hit Parade Rosa) บนต้น (attached corollar) และกลีบดอกที่ถูกเด็ดออกมา (detached corollar) ในสภาพ *in vitro* พบว่าแสงมีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในกลีบดอกที่ถูกเด็ดออกมา ส่วนในกลีบดอกที่ติดอยู่บนต้นนั้นแสงมีผลกระตุ้นการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน และการสังเคราะห์แสงจะมีผลต่อกระบวนการสร้างรงควัตถุนี้ โดยเมื่อให้ตัวยับยั้งการสังเคราะห์แสง (photosynthetic inhibitor) คือ 3 – 4 – dichlorophenyl – 1 – diethylurea (DCMU) และ dicyclohexylcarbodiimide

(DCCD) พบว่าจะไปขัดขวางการสังเคราะห์ ATP ทั้งใน chloroplast และ mitochondria ยังผลให้เกิดการยับยั้งแอคติวิตีของเอนไซม์ในกลีบดอกที่เด็ดออกมาทั้งในสภาพที่มีแสงและไม่มีแสง นอกจากนี้ยังพบว่าแสงสีน้ำเงินมีผลต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินมากกว่าแสงสีแดง ส่วนแสง far - red นั้นไม่มีผลต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินเลย

Yasutomi (1994) อ้างโดย สำนักงานเกษตรภาคเหนือ (2537) ศึกษาในผลมะม่วงพันธุ์เออร์วิน (Irwin) ซึ่งเป็นมะม่วงที่มีผิวสีแดงเช่นเดียวกับมะม่วงพันธุ์เคนท์ โดยมะม่วงพันธุ์เออร์วินนี้มีปัญหาในเรื่องการพัฒนาของสีไม่สม่ำเสมอ วิธีการที่จะทำให้เกิดสีแดงที่เปลือกผลมะม่วงพันธุ์นี้ได้ดียิ่งขึ้นและเกิดสีสม่ำเสมอทำได้โดยการใช้แผ่นพลาสติกใสที่มองทะลุผ่านได้แต่สามารถสะท้อนแสงได้วางรอบโคนต้นมะม่วงประมาณ 23 วันก่อนเก็บเกี่ยว พบว่าสามารถทำให้การพัฒนาสีของเปลือกผลเกิดได้ดี นอกจากนี้ยังทำให้น้ำหนักและความหวานของผลมะม่วงเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย

Dong *et al.* (1995) นำแอปเปิ้ลพันธุ์ Royal Gala (*Malus domestica* Borkh.) ในระยะ preclimacteric ซึ่งยังมีสีเขียวอยู่เก็บในที่ 4 องศาเซลเซียสในสภาพมืดเป็นเวลา 3 วัน ถึง 5 สัปดาห์ มาทดลองโดยให้แสง white light และ UV light แก่ผลแอปเปิ้ลดังกล่าว พบว่าจะทำให้มีการพัฒนาสีแดงของเปลือกผลและปริมาณแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น และแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL และ chalcone isomerase(CHI) สูงขึ้น10 - 20 เท่า

Ju *et al.* (1995) ศึกษาในแอปเปิ้ลพันธุ์ Delicious และ Rolls ในสภาพไม่ได้รับแสงโดยทำการห่อผลแอปเปิ้ลที่มีอายุ 40 วันหลังดอกบานจนถึงระยะการเก็บเกี่ยว (130 วันหลังจากดอกบาน) พบว่าสามารถยับยั้งการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในเปลือกผลได้และพบฟลาโวนอยด์ในปริมาณน้อยมาก แต่เมื่อให้ผลดังกล่าวได้รับแสงโดยเอาถุงที่ห่อออกขณะที่ผลมีอายุ 110 วันหลังจากดอกบาน แล้วทำการเก็บเกี่ยวผลเมื่ออายุ 130 วันหลังดอกบานพบว่าแอนโทไซยานินและฟลาโวนอยด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งการห่อผลไว้ระยะหนึ่งมีผลอย่างมากต่อการเกิดสีในผลไม้ (colour formation) โดยจะชักนำให้มีการสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานินได้ดี วิธีนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศญี่ปุ่น โดยจะทำการห่อผลแอปเปิ้ลหลังจากดอกบาน 1 เดือน หลังจากนั้น 2 – 3 เดือนจึงแกะถุงที่ห่อออกพบว่าจะทำให้ผลไม้มีการพัฒนาของสีแดงขึ้นมาอย่างรวดเร็ว (Kikuchi , 1964 อ้างโดย Saure , 1990)

กอบเกียรติ และคณะ (2540) ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณรงควัตถุและสีแดงในเปลือกผลมะม่วงพันธุ์เคนท์ที่ได้รับแสงและไม่ได้รับแสงโดยการห่อผลด้วยถุงกระดาษสีน้ำตาล พบว่าแอนโทไซยานินมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยชุดที่ไม่ได้ห่อผล(ชุดควบคุม)มีรงควัตถุดังกล่าวมาก

กว่าชุดที่ห่อผลทุกระยะความแก่ นอกจากนี้ยังพบว่าเปลือกผลมะม่วงชุดควบคุมมีสีแดงเพิ่มขึ้นตามระยะการพัฒนาของผล แต่ไม่ปรากฏสีแดงในชุดที่ห่อผล

ดิศร (2541) ศึกษาในผลมะม่วงพันธุ์เคนท์โดยให้ผลมะม่วงบนต้นได้รับแสงเพิ่มจากธรรมชาติโดยการใช้แผ่นสะท้อนแสงสะท้อนแสงให้กับอีกด้านหนึ่งของผลมะม่วงที่ไม่ถูกแสงจากธรรมชาติ เปรียบเทียบกับผลที่ไม่ได้รับแสงโดยการห่อผลและผลที่ได้รับแสงจากธรรมชาติเพียงอย่างเดียว (ชุดควบคุม) พบว่าชุดที่ได้รับแสงเพิ่มจากแผ่นสะท้อนแสงจะมีปริมาณรงควัตถุแอนโทไซยานินและมีการพัฒนาสีแดงที่เปลือกผลมากกว่าชุดควบคุมและชุดห่อผลตลอดระยะการพัฒนาของผล

สุจิตรา (2541) ศึกษาผลของแสงต่อปริมาณแอนโทไซยานินและแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ในเปลือกผลมังคุด โดยจัดให้ผลที่อยู่บนต้นได้รับแสงจากธรรมชาติ และไม่ได้รับแสงโดยการห่อผลด้วยถุงกระดาษสีน้ำตาล พบว่าแสงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL และปริมาณแอนโทไซยานิน โดยแอคติวิตีของเอนไซม์และปริมาณรงควัตถุนี้ในผลที่ได้รับแสงและไม่ได้รับแสงมีค่าไม่แตกต่างกันในทุกระยะการพัฒนาของผล

2. อุณหภูมิ (temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานินโดยในสภาพอุณหภูมิที่เหมาะสมมีผลกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ PAL ดังมีรายงานการศึกษาดังนี้

Engelsma (1970) ทำการศึกษาแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ในส่วน hypocotyls ของแตง gherkin พบว่าในสภาพอุณหภูมิห้องจะมีการสังเคราะห์เอนไซม์ PAL ได้ช้ามากเนื่องจาก PAL-inactivating system (PAL - IS) ซึ่งทำให้เกิด enzyme inactivation และในสภาพที่มีอุณหภูมิต่ำกระบวนการที่เกิด inactivation จะให้ผลกลับกันคือจะมีการปลดปล่อย PAL ออกจากสารประกอบ enzyme inactivator ทำให้ที่อุณหภูมิต่ำนี้มีเอนไซม์มากกว่าที่อุณหภูมิสูง

Kliewer (1977) พบว่าในสภาพอุณหภูมิสูงมีผลทำให้ผลองุ่นไม่สามารถสร้างแอนโทไซยานินได้ ทั้งนี้เนื่องจากแอนโทไซยานิดินเปลี่ยนมาเป็นแอนโทไซยานินไม่ได้โดย ring B ของ flavan nucleus เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยไม่มีกลุ่ม OH และ OCH_3 มาแทนที่ในตำแหน่ง C – 3 ของ ring B ดังกล่าว หรือไม่มี acylated anthocyanins ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้พืชมีความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิและแสงได้ดีขึ้น

Tan (1979) ทำการศึกษาในผลแอปเปิ้ลพันธุ์ Red Spy พบว่าในสภาพอุณหภูมิต่ำ (6 องศาเซลเซียส) มีผลกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ PAL ทำให้มีการสะสมปริมาณแอนโทไซยานินมากขึ้น และมีผลลดหรือยับยั้งการทำงานของ PAL - IS ซึ่งเป็น inactivator ในการ

สังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานิน โดยผลแอปเปิ้ลที่ได้รับอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมงจะมี inactivator ชนิดนี้ปริมาณสูงกว่าที่อุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส

Diener and Naumann (1981) อ้างโดย Gross (1987) ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในเปลือกผลของแอปเปิ้ล พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความอ่อนแก่ของผลโดยผลที่อ่อนกว่าจะมีความต้องการอุณหภูมิที่ต่ำกว่า (กลางวัน 12 องศาเซลเซียส และกลางคืน 2 องศาเซลเซียส) ส่วนในผลที่แก่มากกว่าจะต้องการอุณหภูมิที่สูงกว่า (อุณหภูมิทั้งกลางวันกลางคืนเท่ากับ 24 องศาเซลเซียส)

Faragher (1983) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการสะสมแอนโทไซยานินในเปลือกผลแอปเปิ้ลพันธุ์ Jonathan พบว่าก่อนการเก็บเกี่ยวผลจะมีปริมาณแอนโทไซยานินสูงขึ้นซึ่งเกิดควบคู่กับการลดลงของอุณหภูมิ และเมื่อเก็บเกี่ยวผลมาไว้ในสภาพที่มีแสง (white light) อย่างต่อเนื่อง ผลดิบและผลสุกจะต้องการอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสะสมแอนโทไซยานินแตกต่างกันคือ 12 และ 16 – 24 องศาเซลเซียส และพบว่าในสภาพอุณหภูมิต่ำจะมีระดับของเอนไซม์ PAL สูงกว่าในสภาพอุณหภูมิสูง และในผลสุกจะมีระดับเอนไซม์ดังกล่าวสูงกว่าในผลดิบ แต่ในสภาพที่ได้รับแสงไม่ต่อเนื่องแม้จะได้รับอุณหภูมิเหมาะสมดังกล่าวพบว่าระดับของ PAL และแอนโทไซยานินจะต่ำโดยเฉพาะในผลดิบ นั่นคืออุณหภูมิมีผลร่วมกับระยะของการสุกในเรื่องของการสะสมแอนโทไซยานิน และแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการกระตุ้นการสะสมแอนโทไซยานินโดยมีเอนไซม์ PAL เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการนี้

Tomana (1985) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิรอบ ๆ ช่อผลองุ่นพันธุ์ Delaware จาก 15 องศาเซลเซียส เป็น 30 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ปริมาณรงควัตถุแอนโทไซยานินและกรดทั้งหมดลดลงแต่ปริมาณน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าผลองุ่นในสภาพอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณน้ำตาลในผล รวมทั้งน้ำหนักผลมีค่าสูงสุด แต่ความเป็นกรดจะต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

Lee and Wicker (1991) ศึกษาในลิ้นจี่พันธุ์ Brewster พบว่าการเก็บรักษาลิ้นจี่โดยนำไปแช่ในน้ำแข็งเป็นเวลา 48 วัน มีผลทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลง ซึ่งการลดลงของแอนโทไซยานินจะเกิดขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของสีน้ำตาลที่เปลือกอันเนื่องมาจาก polymeric pigment นอกจากนี้ยังพบว่าแอนโทไซยานินหลักที่พบคือ cyanidin – 3 – glucoside และ malvidin – 3 – acetyl – glucoside

Underhill and Critchley (1993) พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดสีน้ำตาลของเปลือกผลลิ้นจี่ โดยเมื่อให้ผลลิ้นจี่ที่โตเต็มที่ได้รับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที พบว่ามีผลทำ

ให้เปลือกของผลเกิดสีน้ำตาล (browning) รวมทั้งมีผลทำให้แอคติวิตีของ polyphenol oxidase enzyme (PPO) ที่เปลือกเพิ่มขึ้นมีผลทำให้แอนโทไซยานินเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว

Underhill and Critchley (1994) ทำการเก็บรักษาลิ้นจี่พันธุ์ Wai Chee ในสภาพอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันคือที่อุณหภูมิ 5 25 และ 48 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 95 % 60% และ 70% เป็นเวลา 6 21 30 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส มีปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุดตลอดเวลาของการทดลอง และนอกจากนี้ยังพบว่าสีเปลือกผลและน้ำหนักผลไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่การเก็บรักษาในสภาพอุณหภูมิ 25 และ 48 องศาเซลเซียส มีค่า a value ซึ่งหมายถึงสีแดงของเปลือกผลลดลง โดยเกิดการสลายตัวของแอนโทไซยานินเนื่องจากเปลือกผลเกิดอาการ browning

3. สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth regulators : PGR)

สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช หมายถึงฮอร์โมนพืช (plant hormones or phytohormone) และสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชที่สังเคราะห์ขึ้น (synthetic plant growth substances) โดยฮอร์โมนพืชในปริมาณเล็กน้อยก็สามารถแสดงผลในทางส่งเสริม ยับยั้ง หรือชะลอการเจริญเติบโตของพืชได้ นอกจากนี้ยังอาจจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอื่นๆในกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชได้ (จำนงค์ , 2536)

3.1 ออกซิน (auxins)

ออกซินเป็นกลุ่มของสารที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการขยายขนาดของเซลล์(cell enlargement) การแบ่งตัวของเซลล์ในแคมเบี่ยม การขยายขนาดของใบ การเกิดราก การขยายขนาดของผล ป้องกันการหลุดร่วงของใบ ดอก ผล ยับยั้งการแตกตาข้าง ฮอร์โมนที่พืชสร้างขึ้นคือ IAA โดยสร้างมากที่บริเวณปลายยอด ปลายราก ผลอ่อน และบริเวณที่มีเนื้อเยื่อเจริญ (meristematic tissue) อยู่มาก ปริมาณ IAA ภายในเนื้อเยื่อพืชแต่ละส่วนมีมากน้อยแตกต่างกันไป โดยจะมีอยู่มากในส่วนที่กำลังเจริญเติบโต การรักษาระดับปริมาณภายในเนื้อเยื่อพืชถูกควบคุมโดยระบบการสร้างและการทำลายพร้อมๆกันไป ถ้าเป็นเนื้อเยื่อที่กำลังเจริญเติบโตจะมีการสร้างมากกว่าทำลาย และในทางตรงกันข้ามในเนื้อเยื่อพืชที่มีอายุมากขึ้นจะมีการทำลายมากกว่าการสร้าง สารสังเคราะห์ที่จัดอยู่ในกลุ่มออกซินที่ใช้กันมากได้แก่ NAA IBA 4 - CPA และ 2 ,4 - D (พีรเดช , 2537) มีรายงานการศึกษาถึงผลของสารกลุ่มนี้ต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในพืชดังนี้

Vince (1968) ; Constabel *et al.* (1971) ; Khan (1980) และ Oota *et al.* (1983) อ้างโดย Gross (1987) พบว่า 2 , 4 – D มีผลกระตุ้นการสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานินในต้นกล้าของพืชพวก monocarpic plant เปลือกผลแอปเปิ้ลที่ตัดจากผลมาเพาะเลี้ยงในอาหารภายใต้การได้รับแสงตลอดเวลา และในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช เช่น แครอท เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าออกซินสามารถส่งเสริมการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในพืชที่ไม่ได้รับแสงได้ และถ้าใช้ออกซินในระดับความเข้มข้นสูงเกินไปจะมีผลชะลอหรือยับยั้งการสังเคราะห์แอนโทไซยานินได้

Hale *et al.* (1970) ให้ออกซิน (benzothiazole – 2 –oxaacetic acid) แก่ผลองุ่นพันธุ์ Doradillo มีผลชะลอการสุกขององุ่น อย่างไรก็ตามสารในกลุ่มนี้อาจมีผลส่งเสริมหรือยับยั้งการสังเคราะห์แอนโทไซยานินได้ขึ้นอยู่กับความระดับเข้มข้นที่ใช้ ซึ่งกลไกการควบคุมนั้นยังไม่ทราบแน่ชัด

3.2 จิบเบอเรลลิน (gibberellins : GA)

จิบเบอเรลลินเป็นสารที่เกี่ยวกับการยืดตัวของเซลล์ (cell elongation) การทำลายการพักตัว และกระตุ้นการออกดอกของพืชบางชนิด สารกลุ่มนี้มีทั้งที่พืชสร้างขึ้นเองและเชื้อราบางชนิดสร้างขึ้น ในปัจจุบันพบจิบเบอเรลลินทั้งหมดมากกว่า 100 ชนิด โดยที่ทุกชนิดเรียกชื่อเหมือนกันหมดคือ จิบเบอเรลลิน เอ หรือ GA แต่มีหมายเลขตามหลัง เช่น GA_3 GA_4 GA_7 เป็นต้น สาร GA_3 เป็นจิบเบอเรลลินที่นำมาใช้ในทางการเกษตรมีชื่อเฉพาะเรียกว่า จิบเบอเรลลิก แอซิด (gibberellic acid) พืชสามารถสังเคราะห์ GA ได้ในปริมาณน้อยมาก ซึ่ง GA_3 ที่นำมาใช้ทางการเกษตรนั้นได้มาจากการเพาะเลี้ยงเชื้อราบางชนิดแล้วสกัดเอา GA_3 นั้นออกมาเนื่องจากปัจจุบันยังไม่สามารถสังเคราะห์ GA ได้ด้วยวิธีการทางเคมี (พีรเดช , 2537) มีรายงานการศึกษาผลของสารกลุ่มนี้ต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินและเอนไซม์ PAL ในพืชดังนี้

Cheng and Marsh (1968) ได้ศึกษาผลของ GA ต่อการสร้างลิกนิน (lignification) และแอคติวิตีของเอนไซม์PALในต้นถั่วพันธุ์แคระ (*Pisum sativum*) พบว่า GA ความเข้มข้น 10^{-6}-10^{-4}M มีผลส่งเสริมการเกิดลิกนินได้ทั้งในสภาพที่มีแสงและไม่มีแสง นอกจากนี้ยังพบว่าในสภาพที่มีแสงต้นถั่วที่ได้รับ GA จะมีแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL สูงกว่าต้นที่ไม่ได้รับ GA

Weiss and Halevy (1989) ศึกษาในดอก petunia (*Petunia hybrida*) พบว่าการตัดเอาส่วนของเกสรตัวผู้ออกจากดอกในระยะแรกของการพัฒนาของกลีบดอกจะสามารถยับยั้งการสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานินและยับยั้งการเจริญพัฒนาของกลีบดอกได้ เมื่อทดลองให้ GA ความเข้มข้น $3x10^{-3}$ M แก่ดอกดังกล่าว พบว่าจะมีผลส่งเสริมการเจริญเติบโตและการสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานินที่กลีบดอกรวมถึงจะช่วยกระตุ้นแอคติวิตีของเอนไซม์PALให้สูงขึ้น

Weiss *et al.* (1995) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานินในกลีบดอก petunia ที่ไม่มีเกสรตัวผู้พบว่า exogenous GA สามารถทำงานแทนส่วนของเกสรตัวผู้ที่ขาดไป โดย GA จะไปช่วยกระตุ้นให้เกิดการสร้าง chalcone synthase mRNA และ chalcone synthase transcription ทำให้มีการสังเคราะห์รงควัตถุแอนโทไซยานินมากขึ้น

Pollak *et al.* (1993) พบว่าในการงอก pollen tube ของเกสรตัวผู้เพื่อการ fertilization ของดอก petunia นั้นจะต้องการ flavonol aglycone การขาดเอนไซม์ chalcone synthase (CHS) ซึ่งจะช่วยเร่งขั้นตอนของการสังเคราะห์ flavonoid มีผลทำให้ไม่มีการสร้าง flavonoid เกิดขึ้น ทำให้เป็นหมัน ดังนั้นการให้ kaempferol และ flavonol aglycone หรืออย่างใดอย่างหนึ่งลงไปในเวลาที่เกิด pollination แก่ pollen ที่เกิด maturation จะสามารถชักนำให้เกิดการงอก

Martinez *et al.* (1996) ศึกษาถึงผลของ exogenous GA ต่อการเปลี่ยนแปลงสีและแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL chlorophyllase และ peroxidase ในระหว่างการสุกของผลสตรอเบอรี่ โดยใช้ GA_3 ความเข้มข้น 10^{-3} M ทาบริเวณผิวนอกของสตรอเบอรี่ที่เก็บเกี่ยวมาในระยะต่าง ๆ กัน พบว่าจะช่วยทำให้ผลเกิดการพัฒนาสีได้ช้า ซึ่งโดยปกติแล้วแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL จะสูงขึ้นในช่วงระหว่างการสุกของผลสตรอเบอรี่ แต่ GA_3จะทำให้แอคติวิตีของ PAL เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เป็นผลทำให้การพัฒนาของสีแดงช้าไปด้วย ส่วนเอนไซม์ chlorophyllase และ peroxidase นั้นเกี่ยวข้องกับ chlorophyll metabolism โดยพบว่าแอคติวิตีของเอนไซม์ทั้ง 2 นี้จะลดลงในระหว่างการสุกของผลสตรอเบอรี่

3.3 เอทธิลีนและสารปลดปล่อยเอทธิลีน(ethylene and ethylene releasing compounds)

เอทธิลีนเป็นก๊าซชนิดหนึ่งและจัดเป็นฮอร์โมนพืช เนื่องจากพืชสร้างขึ้นมาได้ โดยมีผลควบคุมการแก่ การสุก รวมทั้งการออกดอกของพืชบางชนิด และเกี่ยวข้องกับการหลุดร่วงของใบ ดอก ผล การเหลืองของใบ การงอกของหัวพืชและเมล็ดพืชบางชนิด เอทธิลีนจะสร้างมากในส่วนของพืชที่กำลังเข้าสู่ระยะเสื่อมสภาพ (senescence) เช่น ในผลแก่หรือใบแก่ใกล้หลุดร่วง เนื่องจากเอทธิลีนเป็นก๊าซดังนั้นจึงฟุ้งกระจายไปได้ทั่วและไม่มีการเคลื่อนย้ายเหมือนกับฮอร์โมนในกลุ่มอื่นๆ สารอินทรีย์บางชนิดมีคุณสมบัติคล้ายเอทธิลีน เช่น อะเซทิลีน (acetylene) โปรปิลีน (propylene) ดังนั้นจึงอาจนำสารเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้เช่นกัน ยกตัวอย่างได้แก่การใช้อะเซทิลีนในการบ่มผลไม้ และเร่งการออกดอกของสับปะรด เป็นต้น แต่เนื่องจากว่าสารที่กล่าวมานี้เป็นก๊าซ จึงมีความยุ่งยากในการใช้และไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นได้แน่นอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแปลงปลูกพืช ดังนั้นจึงได้มีการสังเคราะห์สารบางชนิดซึ่งเป็นของเหลวแต่สามารถปลดปล่อยหรือสลายตัวได้ก๊าซเอทธิลีนซึ่งได้แก่เอทีฟอน (ethephon) และเอตาเซลาซิล

(etacelasil) (พีรเดช , 2537) มีรายงานการศึกษาผลของสารกลุ่มนี้ต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินและเอนไซม์ PAL ในพืชดังนี้

Hale *et al.* (1970) พบว่าเอทธิลีนมีผลต่อการสุกและการเพิ่มอัตราการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในองุ่นพันธุ์ Doradillo และ ethephon (2 - chloroethylphosphonic acid) มีผลทำให้องุ่นพันธุ์ Shiraz เกิดกระบวนการสุกอย่างรวดเร็ว

Hyodo and Yang (1971) อ้างโดย Siriphanich and Kader (1985) แสดงให้เห็นว่าเอทธิลีนสามารถส่งเสริมแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ในต้นกล้าของถั่ว (pea) ได้ และสามารถยับยั้งผลของเอทธิลีนนี้โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีความเข้มข้น 5% หรือมากกว่านี้

Chalutz (1973) ศึกษาผลของเอทธิลีนต่อแอคติวิตีของเอนไซม์ PALในเนื้อเยื่อรากแครอท (*Daucus carota* L.) พบว่าการเลี้ยงชิ้นส่วนของรากแครอทในสภาพที่มีเอทธิลีน 10 ไมโครลิตรต่อลิตร สามารถส่งเสริมแอคติวิตีของเอนไซม์ PALได้ดีที่สุด รวมทั้งยังสามารถช่วยเพิ่มปริมาณโปรตีนในรากแครอทได้ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ cycloheximide และ actinomycin D มีผลไปยับยั้งผลของเอทธิลีนดังกล่าว

Pirie and Mullins (1976) ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานินและฟีโนลิกในเนื้อเยื่อใบและผลขององุ่นพันธุ์ Cabernet Sauvignon พบว่า ethephon ความเข้มข้น 60 ไมโครโมล สามารถส่งเสริมให้เกิดการสะสมปริมาณฟีโนลิกและแอนโทไซยานินในใบองุ่นได้

Faragher and Chalmers (1977) พบว่าการเกิดบาดแผลทำให้เกิดการสังเคราะห์เอทธิลีนซึ่งมีผลต่ออัตราการสะสมแอนโทไซยานิน และแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL โดยในชิ้นส่วนของเปลือกแอปเปิ้ล (skin disc) ที่ตัดจากผลพันธุ์ Jonathan จะมีการสะสมแแอนโทไซยานินและแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL สูงกว่าในเปลือกของผลแอปเปิ้ลทั้งผล (whole fruit skin) โดยแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL จะสูงขึ้นก่อนที่จะมีการสะสมแอนโทไซยานิน

Faragher and Brohier (1984) ได้ศึกษาการสะสมแอนโทไซยานินในเปลือกผลแอปเปิ้ลพันธุ์ Jonathan พบว่าในระหว่างการสุกของผลจะมีการสร้างเอทธิลีนเพิ่มขึ้น ซึ่งเอทธิลีนจะทำให้เกิดการสะสมแอนโทไซยานินอย่างรวดเร็ว โดยจะไปเพิ่มระดับของเอนไซม์ PAL ในเปลือกของผลให้สูงขึ้น

Blankenship and Unrath (1988) ทำการศึกษาถึงแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL และระดับของเอทธิลีนภายในผลแอปเปิ้ล 2 พันธุ์ คือ Starking Delicious และ Golden Delicious ในระหว่างการสุกแก่ของผล พบว่าผลแอปเปิ้ลทั้ง 2 พันธุ์มีระดับเอทธิลีนภายในผลและแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL เพิ่มขึ้นในช่วงเวลาเดียวกัน

ดิศร (2541) ทดลองให้ผลมะม่วงพันธุ์เคนท์ที่อยู่บนต้นได้รับ ethephon ความเข้มข้น 100 และ 200 ppm พบว่าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีแดงและปริมาณแอนโทไซยานินในเปลือกผล

3.4 ไซโตไคนิน (cytokinins : CK)

ไซโตไคนินเกี่ยวข้องกับการแบ่งเซลล์ของพืช ชะลอการแก่ การเสื่อมสภาพ และกระตุ้นการแตกตาข้างของพืช พบมากในคัพภะ(embryo) ส่วนใหญ่แล้วไซโตไคนินมีการเคลื่อนย้ายน้อย แต่มีคุณสมบัติสำคัญในการดึงสารต่าง ๆ มายังแหล่งที่มีไซโตไคนินสะสมอยู่ (cytokinin – induce translocation) ฮอร์โมนในกลุ่มนี้ที่พบในพืชได้แก่ BAP และ kinetin (พีรเดช , 2537) มีรายงานการศึกษาถึงผลของสารกลุ่มนี้ต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินและเอนไซม์ PAL ในพืชดังนี้

Klein and Hagen (1961) ; Shulman and Lavee (1977) ; Matsumoto *et al.* (1973) Kossuth (1978) ; Khan (1980) และ Mulgrew and Williams (1985) อ้างโดย อัญชุลี (2539) รายงานถึงสารไซโตไคนินในการควบคุมการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในผลแอปเปิ้ลพันธุ์ McIntosh โดยผลที่ได้รับเบนซิลอดีนีน (benzyladenine) เป็นเวลา 1 เดือนก่อนเก็บเกี่ยวจะมีการสังเคราะห์แอนโทไซยานินได้มากกว่าผลที่ไม่ได้รับสาร และเบนซิลอดีนีนยังมีผลกระตุ้นการสังเคราะห์แอนโทไซยานินได้ในส่วนยอด กลีบดอกที่เด็ดออกมา ผลที่ยังไม่สุก และเซลล์ที่นำมาเพาะเลี้ยง (culture cell)

3.5 แอบซิสสิก แอซิด (abscisic acid : ABA)

แอบซิสสิก แอซิด จัดเป็นสารในกลุ่มยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช (plant growth inhibitors) มีหน้าที่ในการถ่วงดุลกับสารเร่งการเจริญเติบโตพวกออกซิน จิบเบอเรลลิน และไซโตไคนินเพื่อให้การเจริญเติบโตเป็นไปอย่างพอเหมาะพอดี ส่วนใหญ่มีหน้าที่ยับยั้งการแบ่งเซลล์ และการเจริญเติบโตของเซลล์ทำให้เกิดการพักตัว (dormancy) และเกี่ยวข้องกับการหลุดร่วงของอวัยวะพืช ในทางการเกษตรมีการใช้ประโยชน์จากสารกลุ่มนี้น้อยมาก อย่างไรก็ตามมีการใช้สารสังเคราะห์ในกลุ่มนี้เพื่อประโยชน์บางอย่างเช่น ยับยั้งการงอกของหัวมันฝรั่งและหอมหัวใหญ่ในระหว่างการเก็บรักษา ใช้แทนการเด็ดยอด (pinching) เพื่อกระตุ้นให้แตกตาข้าง รวมทั้งยับยั้งการเจริญเติบโตทางกิ่งใบ และมีผลกระตุ้นการเกิดดอกได้ดีในพืชบางชนิด สารสังเคราะห์ที่สำคัญได้แก่ คลอฟลูรีนอล (chloflurenol) ไดกูแลก โซเดียม (dikegulac sodium) มาลิอิกไฮดราไซด์ (maleic hydrazide) ทีไอบีเอ (TIBA) (พีรเดช , 2537) มีรายงานการศึกษาถึงผลของสารกลุ่มนี้ต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินและเอนไซม์ PAL ในพืชดังนี้

Coombe and Hale (1973) ทำการศึกษาระดับแอบซิสสิก แอซิด ในผลองุ่นพันธุ์ Kyoho พบว่าแอบซิสสิก แอซิด มีผลคล้ายเอทธิลีนแต่มีผลในทางอ้อมโดยจะชักนำการสร้างเอทธิลีนและเร่งให้เซลล์เจริญเต็มที่ (cell maturation) เร็วขึ้นทำให้ตอบสนองต่อเอทธิลีนได้ง่าย และมีผลกระตุ้นการสลายตัวของคลอโรฟีลล์เหมือนเอทธิลีนโดยเมื่อผลเขาสู่ระยะสุกแก่ระดับของแอบซิสสิก แอซิดจะสูงขึ้นซึ่งมีผลกระตุ้นการพัฒนาสีและกระตุ้นให้เกิดการสะสมแอนโทไซยานิน

Pirie and Mullins (1976) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอนโทไซยานิน และฟีโนลิกในใบและเนื้อเยื่อของผลองุ่นพันธุ์ Cabernet Sauvignon พบว่าสารละลายแอบซิสสิก แอซิด ความเข้มข้น 20 ไมโครโมลพร้อมกับน้ำตาลซูโครส (sucrose) ความเข้มข้น 0.04 – 0.12 โมล สามารถส่งเสริมให้เกิดการสะสมปริมาณฟีโนลิก และแอนโทไซยานินทั้งหมดในใบ

Palejwala *et al.* (1988) ทำการศึกษาโดยใช้แอบซิสสิก แอซิด ความเข้มข้นต่าง ๆ เร่งการสุกของผลมะม่วงที่แก่เต็มที่ภายหลังการเก็บเกี่ยว พบว่ามีผลลดระดับของกรดและเพิ่มระดับน้ำตาลภายในผล โดยแอบซิสสิก แอซิด ความเข้มข้น 10^{-6} M มีผลทำให้อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำตาลและกรด (sugar : acid) สูงที่สุด นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ hydrolytic enzyme ซึ่งได้แก่ amylase invertase และ cellulase สูงขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับแอบซิสสิก แอซิด

Kondo *et al.* (1998) ศึกษาปริมาณ endogenous ABA ในเปลือกผลองุ่นพันธุ์ Pionnier ในระยะเวลาต่าง ๆ หลังจากดอกบานจนกระทั่งเก็บเกี่ยว (90 วันหลังจากดอกบาน) พบว่าปริมาณ ABA เพิ่มขึ้นในช่วงที่ผลมีอายุได้ 26 – 54 วันหลังจากดอกบาน และหลังจากนั้นปริมาณ ABA มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งเก็บเกี่ยวในขณะที่ปริมาณแอนโทไซยานินมีปริมาณเพิ่มขึ้นตลอดการพัฒนาของผล

ดิศร (2541) ทำการศึกษาโดยให้แอบซิสสิก แอซิด ความเข้มข้น 100 และ 200 ppm แก่มะม่วงพันธุ์เคนท์ที่อยู่บนต้น พบว่าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีแดงของเปลือก แต่มีผลทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินในเปลือกสูงขึ้นกว่าชุดควบคุม

4. แร่ธาตุ และสารอาหาร (mineral and nutrition)

4.1 น้ำตาล (sugar)

น้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลักของโมเลกุลของแอนโทไซยานิน โดยแอนโทไซยานินเกิดจากการรวมตัวของ anthocyanidin กับน้ำตาล พบว่าปริมาณรงควัตถุนี้มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลในระหว่างการสุกแก่ของผล (Saure , 1990) ดังมีรายงานการศึกษาดังนี้

Pirie and Mullins (1976) พบว่าน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 0.04 – 0.02 M สามารถส่งเสริมการสะสมแอนโทไซยานินและปริมาณฟีโนลิกในองุ่นพันธุ์ Cabernet Sauvignon ได้ โดยผลองุ่น (สีม่วง) ที่มีสีเปลือกที่เข้มขึ้นจะมีรสชาติของผลหวานขึ้น

Prasad and Jha (1978) อ้างโดย Gross (1987) ทำการศึกษาในผลลิ้นจี่พบว่า sugar metabolism เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แอนโทไซยานินโดยในผลที่แก่ซึ่งยังมีสีแดงจะมีน้ำตาลแรมโนส (rhamnose) ในปริมาณมากในเปลือกผลเมื่อแก่

4.2 คาร์บอนไดออกไซด์(carbondioxide : CO_2)

มีรายงานการศึกษาผลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินและเอนไซม์ PAL ในพืชดังนี้

Hyodo and Yang (1971) อ้างโดย Siriphanich and Kader (1985) พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ความเข้มข้น 5% หรือมากกว่ามีผลยับยั้งผลของเอทธิลีนที่ไปกระตุ้นแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ในต้นกล้าของถั่ว (pea) ได้

Siriphanich and Kader (1985) ทำการศึกษาผลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณฟีโนลิก เอนไซม์ PAL และ เอนไซม์ polyphenol oxidase (PPO) พบว่าในสภาพอากาศที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ 15% จะทำให้เกิดโรค brown stain ซึ่งทำความเสียหายแก่ผักกาดหอม โดยในสภาพที่มีคาร์บอนไดออกไซด์สูงเช่นนี้ส่งเสริมแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL และ PPO ให้สูงขึ้น ดังนั้นการป้องกันการเกิดโรค brown stain อันเนื่องมาจากคาร์บอนไดออกไซด์ทำได้โดยป้องกันการเกิดฟีโนลิกและยับยั้งแอคติวิตีของเอนไซม์ PPO

4.3 ไนโตรเจน (nitrogen)

มีรายงานการศึกษาผลของไนโตรเจนต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินและเอนไซม์ PAL ในพืชดังนี้

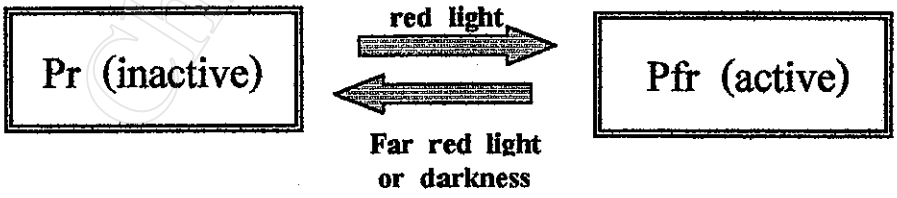
Pirie and Mullins (1976) ทำการศึกษาการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อใบและผลองุ่นพันธุ์ Cabernet Sauvignon ในอาหารเลี้ยงที่มีสารละลาย nitrate 30 มิลลิโมล พบว่าสารละลายดังกล่าวมีผลยับยั้งการสร้างแอนโทไซยานิน และปริมาณฟีโนลิกในเนื้อเยื่อใบและผลองุ่น

Gross (1987) รายงานถึงผลของไนโตรเจนที่มีผลทำให้การสะสมแอนโทไซยานินในพืชลดลง โดยจะไปส่งเสริมให้มีการเจริญเติบโตทางใบมากขึ้นการมีใบมากทำให้ผลได้รับแสงน้อยลงซึ่งมีผลต่อการสร้างแอนโทไซยานินรวมทั้งพบว่าจะมีผลทำให้มีการสังเคราะห์กรดอะมิโนและโปรตีนมากขึ้น ซึ่งอาจไปมีผลต่อการสังเคราะห์น้ำตาลและแอนโทไซยานินที่ลดลง

5. ปัจจัยอื่นๆ (other factors)

5.1 ไฟโตโครม (phytochrome)

ไฟโตโครมเป็นรงควัตถุประเภทหนึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 3,600 – 25,000 มีสองประเภทคือ ไฟโตโครม P_{600} หรือ Pr และไฟโตโครม P_{730} หรือ Pfr (สมบุญ , 2538) ไฟโตโครมอาร์ (Pr) เป็นไฟโตโครมรูปเฉื่อย (inactive) ดูดแสงที่มีความยาวช่วงคลื่น 500 – 700 นาโนเมตร โดยดูดแสงความยาวคลื่น 660 นาโนเมตรหรือแสงสีแดงได้ดีที่สุด ไฟโตโครมชนิดนี้ไม่มีฤทธิ์ในการกระตุ้นให้เปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโต ส่วนไฟโตโครม เอฟ อาร์ (Pfr) เป็นไฟโตโครมที่ว่องไว (active) ดูดแสงที่มีความยาวช่วงคลื่น 520 – 800 นาโนเมตร โดยดูดแสงความยาวคลื่น 730 นาโนเมตรหรือแสงเหนือแดง (far red) ได้ดีที่สุด ไฟโตโครมชนิดนี้มีฤทธิ์กระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตได้ ไฟโตโครมทั้งสองชนิดนี้สามารถเปลี่ยนรูปกลับไปมาได้โดยจะตอบสนองต่อช่วงแสงที่ได้รับแล้วมีการเปลี่ยนรูป (รูปที่ 14) ถ้าได้รับแสงเหนือแดงหรือไม่ได้รับแสง Pfr จะเปลี่ยนเป็น Pr แต่ถ้าได้รับแสงสีแดง Pr จะเปลี่ยนเป็น Pfr ซึ่งอยู่ในรูปที่ active ซึ่ง Pfr มีผลกระตุ้นการสร้างเอนไซม์ PAL ซึ่งเอนไซม์ PAL นี้จะส่งเสริมให้เกิดการสังเคราะห์แอนโทไซยานินต่อไป (Saure , 1990) มีรายงานถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Pfr และแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ในใบเลี้ยงของพืชพวกกะหล่ำปลี พบว่าแสงมีผลต่อระดับ Pfr ซึ่งจะส่งผลให้แอคติวิตีของเอนไซม์ PAL มีการเปลี่ยนแปลงระบบไฟโตโครมต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน (Tong and Schopfer , 1978)



รูปที่ 14 การเปลี่ยนรูปของไฟโตโครม Pr และ Pfr (ดัดแปลงจาก สมบุญ , 2538)

5.2 ต้นตอ (root stock)

มีรายงานการศึกษาในผลท้อพบว่าต้นตอ (root stock) ที่ใช้มีผลต่อปริมาณฟีโนลิก และแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL โดยปริมาณฟีโนลิกและแอคติวิตีของ PALในผลท้อที่ได้มาจากต้นที่ graft บนต้นตอที่เป็นพันธุ์แคระ (dwarf rootstock) จะมีปริมาณสูงกว่าผลท้อที่ได้มาจากต้นที่ graft บนต้นตอปกติ แม้ว่าในระยะแรกนั้นแอคติวิตีของ PAL ในผลท้อจากต้นตอปกติจะสูงกว่าเล็กน้อย (Kubota , 1986 อ้างโดย Kubota , 1996)

5.3 ความเครียด (stress)

มีรายงานการศึกษาถึงผลของความเครียดของพืชต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินและเอนไซม์ PAL ในพืชดังนี้

Faragher and Brohier (1984) ทำการศึกษาพบว่าผลแอปเปิ้ลที่เด็ดออกจากต้นจะเกิดความเครียด (stress) มากกว่าผลที่ติดอยู่บนต้นทำให้มีการสร้างเอทธิลีนมาก ซึ่งมีผลไปกระตุ้นแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ทำให้มีการสังเคราะห์แอนโทไซยานินได้เร็วกว่าผลที่ติดอยู่บนต้น

Kubota (1986) อ้างโดย Kubota (1996) พบว่าการใช้สายรัดที่มีความกว้าง 1 เซนติเมตรรัดที่กิ่งของท้อในระยะแรกของการเจริญเติบโตจะทำให้มีปริมาณฟีโนลิกและแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL สูงขึ้น

5.4 สารปฏิชีวนะ (antibiotic)

สารปฏิชีวนะต่างๆ อาจมีผลส่งเสริมหรือยับยั้งแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL และการสังเคราะห์แอนโทไซยานินขึ้นกับความเข้มข้นที่ใช้ มีรายงานการศึกษาถึงผลของสารดังกล่าวต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานินและแอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ในพืชดังนี้

Zucker (1968) พบว่า cycloheximide ความเข้มข้น 5 ไมโครโมล และ 10 ไมโครโมล สามารถยับยั้งการสังเคราะห์เอนไซม์ PAL ในการเลี้ยงเนื้อเยื่อชิ้นส่วนของหัวมันฝรั่งได้ถึง 50% และ 100% ตามลำดับ

Chalutz (1973) เลี้ยงชิ้นส่วนของรากแครอท (*Daucus carota* L.) ในสภาพที่มีเอทธิลีน 10 ไมโครลิตรต่อลิตร พบว่าสามารถส่งเสริมแอคติวิตีของเอนไซม์ PALได้ โดย cycloheximide และ actinomycin D มีผลไปยับยั้งผลของเอทธิลีนดังกล่าว ทำให้แอคติวิตีของเอนไซม์ PAL ลดลง

Tan (1979) พบว่า cycloheximide ความเข้มข้น 10 25 และ 50 ไมโครโมล และ puromycin ความเข้มข้น 10 และ 25 ไมโครโมลจะช่วยเพิ่มการสะสมปริมาณแอนโทไซยานินในผลแอปเปิ้ล โดยทำให้แอคติวิตีของ PAL สูงขึ้นและลดแอคติวิตีของ PAL-IS ส่วนใน skin disc

พบว่า cycloheximide ความเข้มข้น 0.1 1.0 0.5 และ 10 ไมโครโมล และ chloramphenicol ความเข้มข้น 10 และ 20 ไมโครโมล มีผลยับยั้งการสะสมแอนโทไซยานินและแอคติวิตีของ PAL ส่วน puromycin มีผลต่อการสะสม PAL เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่จะมีผลยับยั้งการสะสมแอนโทไซยานิน และไม่มีสารปฏิชีวนะใดในการทดลองนี้ที่มีผลต่อการสะสม PAL - IS ใน skin disc ของแอปเปิ้ล

5.5 ความเป็นกรด – ด่าง (pH)

pH มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสีของแอนโทไซยานิน ในผลไม้เมื่อแก่จัดหรือสุกปริมาณกรดมีค่าน้อยลงทำให้ pH เปลี่ยนแปลง มีผลทำให้สีของผลไม้เปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยในสภาพที่เป็นกรดนั้นแอนโทไซยานินจะมีสีค่อนข้างแดง แต่เมื่อ pH สูงขึ้นจนถึงระดับที่เป็นกลางจะมีสีน้ำเงินถึงสีม่วง (รูปที่ 13) (จริงแท้ , 2541 และ Mazza and Miniati , 1993)

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University