บทที่ 2
การตรวจเอกสาร

ลักษณะของข้าวไร่

ข้าวไร่มีลักษณะแตกต่างกันตามชนิดและพันธุ์ที่ใช้ในการปลูก เช่นในอินเดีย และบังกลาเทศ ข้าวไร่มีลักษณะสูงประมาณ 50 - 100 เซนติเมตร แตกกอ 6 - 12 ต้น ใบยาว แคบและตั้ง ปรับตัวในสภาพแห้งแล้งได้ดี มีอายุไม่เกิน 100 วัน มีผลผลิตตั้งแต่ต่ำจนถึงสูง แต่ในแถบอเมริกากลางและใต้ และแอฟริกาตะวันตก ต้นมีความสูงประมาณ 80 - 120 เซนติเมตร แตกกอ 4 - 8 ต้น ใบตั้ง ยาว ปรับตัวในสภาพแห้งแล้งได้ดี ผลผลิตปานกลางจนถึงสูง ส่วนในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ บางส่วนของอเมริกากลางและใต้ และแอฟริกาตะวันตก ต้นมีความสูงประมาณ 120 - 180 เซนติเมตร แตกกอ 2 - 5 ต้น ใบกว้าง ยาว และแผ่ ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี ผลผลิตต่ำถึงปานกลาง ข้าวไร่ของญี่ปุ่น มีระบบรากลึก ทนแล้ง ต้นสูงอวบใหญ่ แตกกอน้อย ใบกว้างและยาว ต้านทานโรคไหม้ แต่หักล้มง่าย เมล็ดใหญ่ มีคุณภาพเมล็ดต่ำ (IRRI, 1975) นอกจากนี้ Gupta and O'Toole (1986) พบว่า บางสายพันธุ์มีการแตกกอต่ำและพื้นที่ใบคงที่ เมื่ออยู่ในสภาพขาดน้ำเกิดความเสียหายน้อยกว่าข้าวนาดำ แต่ข้าวนาดำบางสายพันธุ์สามารถทนแล้งได้ดีเท่ากับข้าวไร่ จากการศึกษาโดย IRRI (1984) ซึ่งรวบรวมข้าวไร่มากกว่า 4,000 สายพันธุ์ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พบว่า ลักษณะทางการเกษตรและลักษณะสัณฐานวิทยาของข้าวไร่โดยทั่วไป มีระบบรากใหญ่และลึก ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี เช่น ทนแล้งแต่ยังติดเมล็ดสูง ทนต่อการขาดธาตุฟอสฟอรัสและความเป็นพิษจากอลูมิเนียมและแมงกานีส ตลอดจนสามารถทนสภาพดินเค็มได้ ต้านทานต่อโรคและแมลงบางชนิดได้ดี แต่มักมีลักษณะที่จำกัดผลผลิต คือ มีลักษณะต้นสูง แตกกอน้อย ใบน้อย ใหญ่ ยาวและแผ่ ตอบสนองต่อปุ๋ยน้อย ไวต่อช่วงแสง มีผลผลิตต่ำและไม่คงที่ ประมาณ 80 - 240 กิโลกรัมต่อไร่ มีอายุ 95 - 145 วัน มีเมล็ดใหญ่และแข็ง

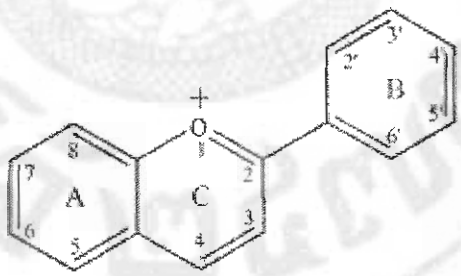
โดยทั่วไปเกษตรกรปลูกข้าวไร่ตามพื้นที่สูงและไหล่เขา อาศัยความชื้นจากน้ำฝน เริ่มปลูกในช่วงต้นฤดูฝนประมาณเดือนพฤษภาคมถึงเดือนมิถุนายน ขึ้นกับพื้นที่และการเริ่มต้นของฤดูฝน พันธุ์ที่นิยมปลูกส่วนใหญ่เป็นพันธุ์พื้นเมือง ซึ่งรวงใหญ่ เมล็ดมาก แต่ลำต้นสูง แตกกอน้อย จึงมีผลผลิตต่ำ (ทรงเชาว์, 2531) พื้นที่ปลูกข้าวไร่มีมากในภาคเหนือ ภาคใต้ และบางส่วนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ปรีชา, 2538) เนื่องจากการปลูกข้าวไร่ต้องอาศัยน้ำฝน จึงเกิดปัญหาการขาดน้ำเมื่อฝนทิ้งช่วง เมื่อข้าวขาดน้ำในช่วงการสร้างดอกส่งผลให้มีจำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น จำนวนรวง จำนวนเมล็ดต่อรวง น้ำหนัก 100 เมล็ดน้อยลง เนื่องจากมีเมล็ดลีบมากขึ้น (สุเมช, 2541)

แต่ข้าวไร่มีกลไกในการทนแล้งหลายประการ เช่น มีระบบรากลึก กลไกควบคุมการเปิดและปิดของปากใบส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำน้อย ข้าวไร่บางพันธุ์มีระบบรากใหญ่ ยาวและลึก จึงทนแล้งได้ดี (Yoshida and Hasegawa, 1982 และ Robertson, *et al.*, 1985) อย่างไรก็ตามความสามารถทนแล้งแตกต่างตามพันธุ์ Arraudeau and Vergana (1988) ทำการปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้ปลูกได้ในดินที่มีความชื้นจำกัดแล้วสามารถให้ผลผลิตที่ดีได้ Jordan, *et al.* (1983) พบว่า ระบบรากลึกของข้าวไร่มีผลให้พื้นที่ใบต่อกอเพิ่มขึ้น มีการสังเคราะห์แสงและการคายน้ำเพิ่มขึ้น จึงมีผลผลิตเพิ่มขึ้น ข้าวไร่ต้องการน้ำบางส่วนเพื่อการเจริญเติบโตเหมือนพืชทั่วไป Yoshida (1978) พบว่า ข้าวไร่ต้องการน้ำฝนต่อฤดูปลูกประมาณ 1,240 มิลลิเมตร การขาดน้ำส่งผลต่อลักษณะทั้งภายในและภายนอกของการเจริญเติบโตของต้นข้าว Slatyer (1973) พบว่า เมื่อข้าวขาดน้ำมีผลให้พื้นที่ใบ ขนาดลำต้นและผลผลิตลดลง เมื่อขาดน้ำในระดับปานกลาง มีผลให้ต้นแคระแกร็น การพัฒนาลดลง และผลผลิตลดลง เมื่อขาดน้ำรุนแรงและยาวนานทำให้เสียหายอย่างมากถึงขั้นการให้ผลผลิตล้มเหลว เนื่องจากการสะสมน้ำหนักและแตกกอน้อย เจริญเติบโตช้า มีโรคและแมลงระบาด ส่งผลต่อคุณภาพและปริมาณการเก็บเกี่ยวลดลง เมื่อประเทศไทยประสบปัญหาภัยแล้งอย่างต่อเนื่อง (ปรีชา, 2538) รัฐบาลควรมีนโยบายชี้นำให้ผู้ขยายพันธุ์ข้าว พิจารณาถึงพันธุ์ข้าวที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงและสนับสนุนการให้ความรู้ทางด้านการเกษตรแก่เกษตรกร โดยเน้นความสำคัญด้านการคัดเลือกพันธุ์ข้าวตามลักษณะอากาศที่เหมาะสมในแต่ละท้องถิ่น และวิธีการการเพาะปลูก เพื่อลดต้นทุนการผลิต (Pautural and Eddy, 1991) นอกจากนั้นอุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการให้ผลผลิตของข้าวไร่ (Yoshida and Parao, 1976) อุณหภูมิที่เหมาะสมมีผลให้การเจริญเติบโตเต็มที่และให้ผลผลิตสูง Place, *et al.* (1971) และ เฉลิมพล (2535) พบว่า อุณหภูมิดินที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 25 - 30 องศาเซลเซียส ในช่วงกลางวันและกลางคืนควรมีอุณหภูมิเฉลี่ย 33 และ 21 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อรากข้าวมีอุณหภูมิต่ำอยู่ที่ 18 องศาเซลเซียส ทำให้การผลิตน้ำหนักฟางน้อยและเมล็ดลีบมากกว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิต่ำมีผลต่อขั้นตอนการเจริญเติบโตทางด้านต่างๆ ของข้าว ทำให้รากน้อยและการแตกกอต่ำ เมื่ออุณหภูมิต่ำลงมากทำให้ข้าวเป็นหมัน การสุกแก่ช้า ส่งผลให้ผลผลิตลดลง

แอนโทไซยานิน

สีสันต่างๆ ที่ธรรมชาติสร้างสรรค์ขึ้นมา ซึ่งมนุษย์สามารถรับรู้ได้จากการมองเห็นด้วยสายตา มีหลากหลายสี เช่น สีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม แดง ขาว และสีอื่นๆ ที่อยู่ระหว่างสีเหล่านี้ ที่พบเห็นได้ทั่วไปในธรรมชาติ ทั้งในสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิต รวมทั้งสัตว์และพืช

สีต่างๆ ที่พืชสะสมและพบในเนื้อเยื่อพืช จำแนกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ คลอโรฟิลล์ (chlorophylls) มีลักษณะเป็นสีเขียว คาโรทีนอยด์ (carotenoids) มีลักษณะเป็นสีเหลือง ส้ม แดง และฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ซึ่งจากการศึกษาพบสารที่สำคัญได้แก่ สารแอนโทไซยานิน มีลักษณะเป็นสีน้ำเงิน แดง ม่วง และสารฟลาโวน (flavone) กับสารฟลาโวนอล (flavonals) มีลักษณะเป็นสีเหลืองและสีงาช้าง พบในผัก ผลไม้ และไม้ดอกไม้ประดับบางชนิด (สัมพันธ์, 2546) ซึ่งสีสันต่างๆ เหล่านี้มีความสำคัญทั้งสิ้นและสีที่สำคัญยิ่ง คือ สีเขียวของสารคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็นแหล่งผลิตอาหารที่สำคัญของพืช โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำและแสงแดด นอกจากนี้สีสันต่างๆ ที่มีมากมายในธรรมชาติมีส่วนสำคัญในการล่อแมลงเพื่อช่วยผสมเกสร (Jaakala, *et al.*, 2002) สีเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณตลอดระยะการเจริญพัฒนาของพืช (กอบเกียรติ และคณะ, 2540) นอกจากนี้ Escribano-Bailon, *et al.* (2004) รายงานว่า สารแอนโทไซยานินเกิดจากการรวมตัวของรงควัตถุส่งผลให้มีสีเกิดขึ้น เช่น สีส้ม สีแดง สีม่วงและสีน้ำเงิน ในเนื้อเยื่อที่ส่วนต่างๆ ของพืช สารแอนโทไซยานินที่พบโดยทั่วไปอยู่ในรูปของ polyhydroxylated และ/หรือ methoxylated heterosides ได้จาก flavylium ion หรือ 2 - phenylbenzopyrilium และพบว่า แอนโทไซยานิดิน (anthocyanidin) จับกับน้ำตาลชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถ acylated ด้วยกรดอินทรีย์ต่างๆ โดยหมู่ hydroxyl ที่พบใน rings สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของสารแอนโทไซยานิน หรือโมเลกุลของน้ำตาลที่มีอยู่มากมาย องค์ประกอบเหล่านี้ละลายได้ทั้งในน้ำ ethanol และ methanol



ภาพ 1 โครงสร้างของ flavylium ion หรือ 2- phenylbenzopyrilium (Mediawiki, 2006)

แอนโทไซยานินสะสมอยู่ในแวคิวโอล (vacuole) ของพืช สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสีตาม pH ของสารละลายภายใน เมื่อ pH เท่ากับ 1 เนื้อเยื่อมีสีส้มแดง แต่เมื่อ pH น้อยกว่า 6 เนื้อเยื่อไม่มีสี เมื่อ pH มากกว่า 6 เนื้อเยื่อมีสีม่วงหรือสีน้ำเงิน แต่ถ้าเป็นด่างมากเกินไปโครงสร้างของแอนโทไซยานินจะเสียสภาพ (Moskowiz and Harazadina, 1981 และ กนกพร, 2545) แอนโทไซยานินมีหลายกลุ่มสีตามที่ปรากฏบนเนื้อเยื่อพืช มีการจำแนกออกเป็น 6 กลุ่มใหญ่ๆ

โดย Gross (1987 อ้างโดยกอบเกียรติ และคณะ, 2540) ได้แก่ pelargonidin, cyanidin, delphinidin, peonidin, petunidin และ malvidin โครงสร้างของกลุ่มเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงจากกลุ่มหนึ่งเป็นอีกกลุ่มหนึ่งได้ โดยเปลี่ยนแปลงบริเวณ side chain ของ ring B และชนิดของน้ำตาลที่มาเกาะกับโมเลกุลของแอนโทไซยานิดิน มีหลายชนิดที่พบ คือ xylose, arabinose ระหว่าง rhamnose กับ pentose, galactose และระหว่าง glucose กับ hexoses (Escribano-Bailon, *et al.*, 2004)

ตาราง 1 การเปลี่ยนแปลงบริเวณของ side chain ที่ ring ต่างๆ ของแอนโทไซยานิดิน

Ring	A	A	A	B	B	B	C
Anthocyanidin	**R**	**R**	**R**	**R**	**R**	**R**	**R**
Cyanidin	-OH	-H	-OH	-OH	-OH	-H	-OH
Delphinidin	-OH	-H	-OH	-OH	-OH	-OH	-OH
Pelargonidin	-OH	-H	-OH	-H	-OH	-H	-OH
Malvidin	-OH	-H	-OH	$-OCH_3$	-OH	$-OCH_3$	-OH
Peonidin	-OH	-H	-OH	$-OCH_3$	-OH	-H	-OH
Petunidin	-OH	-H	-OH	-OH	-OH	$-OCH_3$	-OH
Rosinidin	-OH	-H	$-OCH_3$	$-OCH_3$	-OH	-H	-OH
Aurantinidin	-OH	-OH	-OH	-H	-OH	-H	-OH
Europinidin	-OCH3	-H	-OH	-OCH3	-OH	-OH	-OH
Luteolinidin	-OH	-H	-OH	-OH	-OH	-H	-H

ที่มา: Mediawiki (2006)

นอกจากนี้มีอีกหลายชนิด เช่น β-D-glucopyranose, gentiobiose, sambubiose, rutinose และ 2 - glucosylrutinose ชนิดและปริมาณของน้ำตาลที่มาเกาะกับโมเลกุลของแอนโทไซยานิดินมีผลต่อความอ่อน-เข้มของสีที่ปรากฏ (กอบเกียรติ และคณะ, 2540) ส่วนแอนโทไซยานินในกลุ่มอื่นนอกจาก 6 กลุ่มดังกล่าว อาจมีความแตกต่างกันทั้งใน ring A, B และ C แต่พบได้ไม่บ่อยนัก ที่พบ เช่น Rosinidin, Aurantinidin, Europinidin และ Luteolinidin (Mediawiki, 2006) โดยทั่วไปพบเพียง 3 กลุ่ม

คือ pelargonidin, cyanidin และ delphinidin ซึ่งรูปแบบการเกิดสีที่เนื้อเยื่อต่างกันดังนี้ pelargonidin ทำให้มีสีส้ม ชมพูและแดง ส่วน cyanidin ทำให้มีสีแดงและม่วงสด และ delphinidin ทำให้มีสีม่วงน้ำเงินและน้ำเงินเข้ม ที่สารแอนโทไซยานินที่เกิดขึ้นมีพิสัยของสีกว้าง เนื่องจากปริมาณออกซิเจน สภาพแวดล้อมภายในโมเลกุลและ pH ภายในแวคิวโอล (Verpoorte and Alfermann, 2000) จากการศึกษาของ Escribano-Bailon, *et al.* (2004) รายงานว่า สารแอนโทไซยานินมีความเสถียรเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวน methoxyls ใน rings B ลดลง และ hydroxyls เพิ่มขึ้น ชนิดที่มีความเสถียรมากที่สุด คือ malvidin รองลงมา คือ peonidin, petunidin, cyanidin และ delphinidin ตามลำดับ และเสถียรมากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกรด เมื่อน้ำตาลผ่านกระบวนการ glycosylation และ acylation และอยู่ในสภาพ monoglucoside และ diglucosides จะมีความเสถียรมากขึ้น แต่ diglucosides มีความเสถียรมากกว่า monoglucoside ข้อที่ควรระวังมากในระหว่างทำการวิเคราะห์หาสารแอนโทไซยานิน คือ อุณหภูมิ เพราะเมื่ออุณหภูมิและ pH เพิ่มสูงขึ้น มีส่วนไปเร่งให้สารแอนโทไซยานินเสื่อมเร็วขึ้น นอกจากนี้รังสีจากแสงแดดมีส่วนไปเร่งการเสื่อมของสารแอนโทไซยานินด้วย กนกพร (2545) รายงานว่า สภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น แสง อุณหภูมิ แร่ธาตุและความเครียดอื่นๆ มีผลต่อการสะสมสารแอนโทไซยานินในเนื้อเยื่อพืช Chandraratna (1964) รายงานว่า ปฏิกิริยาของยีน *C* และ *Sp* ที่เป็นยีนพื้นฐานในการเกิดสี รวมทั้งยีนที่ควบคุมการเกิดสีที่จำเพาะในแต่ละส่วน มีผลต่อระดับความอ่อน-เข้มและชนิดของสีที่แตกต่างกันมากมาย เนื่องจากการทำงานของยีนมีผลต่อการแสดงออกของสี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสารแอนโทไซยานินที่แตกต่างกันไป

ในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมาสารแอนโทไซยานินได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากได้มีการพัฒนานำสารสกัดแอนโทไซยานิน มาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มอย่างแพร่หลาย (สัมพันธ์, 2546) เพราะการบริโภคอาหารที่อุดมไปด้วยสารแอนโทไซยานินส่งผลต่อความสามารถในการมองเห็นที่ดีขึ้นและมีคุณค่าทางอาหารที่ช่วยเสริมสุขภาพ เช่น มีส่วนออกฤทธิ์ต่อต้านอนุมูลอิสระ ลดปริมาณคอเลสเตอรอล ต่อต้านการเกิดโรคมะเร็ง (กนกพร, 2545) ช่วยลดการเกิดโรคหัวใจ (Winkel - Shirley, 2001) นอกจากนี้ กนกพร (2545) รายงานว่า การที่เป็นสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ จึงเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางชีวภาพ เช่น เป็นสารส่งสัญญาณของวิถีการถ่ายทอดสัญญาณในหลายวิถี การป้องกันตัวเองของพืช การตอบสนองต่อแสง UV - B และความเครียดต่างๆ เช่น เมื่อข้าวฟ่าง มีเชื้อโรคเข้าทำลายและในข้าวโพดที่มีหนอนเข้ารบกวน จะมีการสร้างสารแอนโทไซยานิน เพื่อต่อต้านการรบกวนของโรคและแมลง เนื่องจากมีสาร phytoalexins ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ช่วยต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ที่เข้าทำลายพืช หรือเกิดขึ้นเมื่อพืชอยู่ในสภาพเครียด (Lo and Nicholson, 1998) นอกจากนี้ Holton and Cornish (1995) รายงานว่าสารแอนโทไซยานินสามารถป้องกันความเสียหายของพืชจากรังสีอัลตร้าไวโอเลตได้

ความสัมพันธ์ระหว่างสีกับสารแอนโทไซยานิน

สีสันต่างๆ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเลือกซื้อและการบริโภคอาหาร สีที่พบในเนื้อเยื่อพืชเป็นแหล่งหนึ่งที่ให้สารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายของผู้บริโภค เช่น สีแดง สีม่วง และ สีน้ำเงิน ซึ่งอุดมไปด้วยสารแอนโทไซยานิน (กนกพร, 2545) พืชในกลุ่มธัญพืช (cereals) บางสายพันธุ์ มีเนื้อเยื่อบางส่วนเป็นสีน้ำเงิน แดงและม่วง เป็นที่น่าสนใจแก่นักวิทยาศาสตร์ด้านต่างๆ โดยเฉพาะทางด้านอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอาหาร เนื่องจากเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยสารแอนโทไซยานิน และพบได้ในธัญพืชบางชนิดและบางสายพันธุ์ เช่น ในข้าวโพดที่มีสีม่วง ข้าวที่มีเมล็ดสีแดง ม่วงถึงดำ ข้าวสาลีและข้าวฟ่างบางสายพันธุ์ (Escribano-Bailon, *et al.*, 2004) จากงานวิจัยของ Karty, *et al.* (2004) พบว่า สีที่ปรากฏบนเนื้อเยื่อพืชมีความสัมพันธ์กับปริมาณของสารแอนโทไซยานิน จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีและรงควัตถุในระหว่างการสุกแก่ของผลอโวกาโดพันธุ์แฮส (Hass) พบว่า จากการวิเคราะห์สารแอนโทไซยานินด้วย high performance liquid chromatography (HPLC) เมื่อสีที่เปลือกผลเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงหรือดำ รายงานว่า สารแอนโทไซยานินเข้มข้นสูงขึ้นตามสีที่เปลี่ยนแปลง และมีความเข้มข้นสูงสุดเมื่อมีสีม่วงหรือดำ จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณรงควัตถุในเปลือกผลมะม่วงพันธุ์เคนท์ พบว่า การเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดงเมื่อผลสุกแก่มีความสัมพันธ์กับปริมาณแอนโทไซยานินที่เพิ่มขึ้นตามอายุของผลมะม่วง และมีปริมาณสูงสุดเมื่อเปลือกมีสีแดงที่ระยะสุกแก่ (กอบเกียรติ และคณะ, 2540)

ส่วน Carreno, *et al.* (1996) ใช้สูตรดัชนีสี (180- H°)/(L*+C) เพื่อวัดสีขององุ่นที่รับประทานผลสด (Table grapes) พบว่า ค่า L*, a*, b*, H°, C, colour index of red grape (CIRG) และปริมาณสารแอนโทไซยานินมีความสัมพันธ์กับสีของผลองุ่นอย่างสูง โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีกับสีของผลองุ่นสูงที่สุด และสามารถแยกความแตกต่างของกลุ่มสีที่ประเมินได้ดี จากการทดลองจึงทราบว่า สามารถใช้สูตรดัชนีสีเพื่อประเมินหาสารแอนโทไซยานินได้ เนื่องจากชนิดและปริมาณสารแอนโทไซยานินมีความสัมพันธ์อย่างสูงกับสีที่ปรากฏ จึงสามารถใช้ประเมินปริมาณสารแอนโทไซยานินได้ ส่วน Fernandez-Lopez, *et al.* (1998) ศึกษาความเกี่ยวข้องระหว่างสีกับปริมาณสารแอนโทไซยานินในผลองุ่นสุกพันธุ์สีแดง 3 พันธุ์ โดยประยุกต์ใช้ดัชนีค่าสีของผลองุ่นสีแดงหรือ colour index of red grape (CIRG) คำนวณจากสูตร [(180 - H°)/(L* + C)] เมื่อ H° คือ hue angle และ C คือ ค่า chroma โดยจำแนกผลองุ่นตามสีที่ปรากฏจากค่า CIRG ได้ 5 กลุ่ม ดังนี้ องุ่นสีเขียว-เหลือง (CIRG<2) สีชมพู (2<CIRG<4) สีแดง (4<CIRG<5) สีแดงเข้ม (5<CIRG<6) สีน้ำเงิน-ดำ (CIRG<6) พบว่า ค่า CIRG มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารแอนโทไซยานิน โดยเมื่อค่า CIRG เพิ่มขึ้นปริมาณของสารแอนโทไซยานินที่วัดได้เพิ่มขึ้นด้วย และสูงสุดในระยะสุกแก่เต็มที่

โดยผลสุกของอุ่นพันธุ์เฟม (Fame) มีสีชมพูอ่อน มีปริมาณสารแอนโทไซยานิน 52.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และจากอุ่น 100 ผล มีค่า CIRG เท่ากับ 3.02 ส่วนผลสุกของอุ่นพันธุ์เอ็กโซติก (Exotic) มีสีน้ำเงินเข้มถึงดำ มีปริมาณสารแอนโทไซยานิน 621.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และจากอุ่น 100 ผล มีค่า CIRG เท่ากับ 7.29 และผลสุกของอุ่นพันธุ์โมนาสเทรล (Monastrell) มีแดงเข้มถึงน้ำเงินเข้ม มีปริมาณแอนโทไซยานินสูงสุดถึง 1,853.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและจากอุ่น 100 ผลมีค่า CIRG เท่ากับ 8.21 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้ทราบได้ว่า เมื่อสีของผลอุ่นเข้มขึ้นจากสีชมพูอ่อนซึ่งมีค่า CIRG ต่ำไปถึงสีดำซึ่งมีค่า CIRG สูง สอดคล้องกับปริมาณของสารแอนโทไซยานินที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย สอดคล้องกับ Yoshinaga, *et al.* (1999) รายงานว่า สารแอนโทไซยานินมีส่วนส่งเสริมรงควัตถุที่มีสีแดง น้ำเงิน และม่วง ที่เนื้อเยื่อบนส่วนต่างๆ ของพืช และรายงานว่า การคาดคะเนปริมาณของแอนโทไซยานิน สามารถหาได้จากค่าสีที่วัดจากตัวอย่างโดยไม่ต้องใช้ HPLC ในการตรวจวิเคราะห์

การสังเคราะห์แอนโทไซยานิน

กนกพร (2545) รายงานขั้นตอนการสังเคราะห์แอนโทไซยานินว่า ขั้นตอนแรก คือ การสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์ เกิดจากการกระตุ้นให้มีการรวมตัวกันของ malonyl CoA 3 โมเลกุล และ P - coumaroyl CoA 1 โมเลกุล โดยเอนไซม์ chalcone synthase (CHS) ได้สาร naringenin chalcone มีสีเหลือง ขั้นตอนที่สองเกิด isomerisation ของสาร chalcone โดยเอนไซม์ chalcone isomerase (CHI) ได้สาร naringenin flavanone ซึ่งไม่มีสี จากนั้นเติมหมู่ OH ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 โดยเอนไซม์ flavanone 3 - hydroxylase (F3H) ได้สารกลุ่ม dihydroflavonol คือ dihydrokaepferol และเติม OH ที่ตำแหน่งต่างๆ ของสารนี้โดยเอนไซม์ flavonol 3' - hydroxylase (F3'H) และ flavonoid 3', 5' - hydroxylase (F3' 5' H) ให้สารในกลุ่ม dihydroflavonol ชนิดอื่นๆ เพิ่มเติม ได้แก่ dihydroquercetin และ dihydromyricetin จำนวนหมู่ OH ที่เติมไปบริเวณต่างๆ มีผลต่อการเกิดสีที่แตกต่างกัน สารในกลุ่ม dihydroflavonol ต้องการเอนไซม์อย่างน้อย 3 ขั้นตอนเพื่อเปลี่ยนเป็นสารในกลุ่มแอนโทไซยานิน โดยเริ่มต้นจากกระตุ้นการลดสารกลุ่มนี้ด้วยเอนไซม์ dihydroflavonol reductase (DFR) ได้สารกลุ่ม leucoanthocyanidin ได้แก่ leucocyanidin, leucopelargonidin ซึ่งถูก oxidation, dehydration และ glycosylation ได้สารกลุ่มแอนโทไซยานินที่มีสีแตกต่างกัน เช่น สีแดง สีน้ำเงิน สีส้ม นอกจากนี้อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เพิ่มเติม เช่น glycosylation, methylation, acylation และให้เม็ดสีแอนโทไซยานินที่จำเพาะในพืชแต่ละชนิด แอนโทไซยานินต้องการเอนไซม์ glutathione S-transferase (GST) และ transporters ซึ่งเรียกว่า glutathione pump สำหรับนำพาสารแอนโทไซยานินจากไซโทพลาสซึมเข้าสู่แวคิวโอล

การถ่ายทอดทางพันธุกรรมของแอนโทไซยานิน

ความรู้เกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะต่างๆ จากรุ่นพ่อแม่สู่รุ่นลูก ทำให้สามารถกำหนดและคัดเลือกลักษณะที่ต้องการได้ (สุณิสา และดำเนิน, 2546) เพื่อสะดวกในการพัฒนาพันธุ์พืชให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น (Wolf and Craig, 1988) ลักษณะสีสันต่างๆ เป็นลักษณะที่สำคัญมาก เช่น ไม้ดอกไม้ประดับที่มีสีสันแปลกใหม่ ส่งผลให้มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงขึ้น หรือเป็นการเพิ่มคุณค่าทางด้านโภชนาการ เช่น มีสารต้านอนุมูลอิสระ หรือเป็นอาหารเสริมให้แก่ร่างกาย มีประโยชน์ทั้งกับมนุษย์ สัตว์และพืช เช่น การสร้างสารเพื่อป้องกันตัวเองของพืช เมื่อมีโรคหรือแมลงเข้าทำลาย (กนกพร, 2545) จากการศึกษาพฤติกรรมของยีนควบคุมการเกิดสีม่วงในต้นข้าว ทำให้ทราบพฤติกรรมการถ่ายทอดทางพันธุกรรมการเกิดสีม่วงในต้นข้าวแตกต่างตามชนิด พันธุ์และส่วนต่างๆ ของต้น (IRRI, 1996) ในรุ่น F_1 ยีนควบคุมการเกิดสีแสดงพฤติกรรมแบบข่มสมบูรณ์ต่อส่วนต่างๆ ของข้าวทุกส่วน และยีนมี 3 alleles กำหนดการเกิดสีที่ปลายดอกและกาบใบ ซึ่งการเกิดสีเกี่ยวข้องกับ duplicate gene และได้กำหนดสมมติฐานว่า มี 3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสี โดยปัจจัยที่ 1 ทำให้เกิดสีแดง ปัจจัยที่ 2 เปลี่ยนสีแดงไปเป็นสีม่วงและปัจจัยที่ 3 กระจายเม็ดสีไปที่ส่วนต่างๆ ของต้นข้าว (Chandraratna, 1964) ส่วนสุนิสา และดำเนิน (2546) ได้รายงานว่า ในรุ่น F_1 ยีนควบคุมลักษณะการเกิดสีม่วงแสดงพฤติกรรมแบบข่มสมบูรณ์ที่เยื่อกันน้ำฝน เขี้ยวใบ ปล้อง ปลายดอกและยอดเกสรตัวเมียเท่านั้น ส่วนลักษณะการเกิดสีม่วงของต้นกล้า กาบใบและแผ่นใบ ยีนแสดงพฤติกรรมแบบข่มไม่สมบูรณ์ เนื่องจากรุ่น F_1 มีสีเขียวปนสีม่วง และทำการทดสอบพฤติกรรมการกระจายตัวของยีนในรุ่น F_2 โดยมีสมมติฐานพื้นฐาน คือ

1. ลักษณะการเกิดสีม่วงควบคุมด้วยยีน 1 คู่ แบบข่มสมบูรณ์ มีสัดส่วนสีม่วง : เขียว เท่ากับ 3 : 1 และแบบข่มไม่สมบูรณ์แสดงสัดส่วนสีม่วง : เขียวปนม่วง : เขียว เท่ากับ 1 : 2 : 1

2. ลักษณะการเกิดสีม่วงควบคุมด้วยยีน 2 คู่ เป็นแบบข่มสมบูรณ์และสีเขียวเป็น homozygous recessive แสดงสัดส่วนสีม่วง : เขียว ในอัตราส่วน 15 : 1 เมื่อสีม่วงควบคุมด้วยยีน 2 คู่ แบบข่มไม่สมบูรณ์ และสีเขียวเป็น homozygous recessive แสดงสัดส่วนสีม่วง : เขียวปนม่วง : เขียว ในอัตราส่วน 1 : 14 : 1 และสีเขียวเป็น homozygous recessive ยีนควบคุมสีม่วงเป็น semi-epistatic แสดงสัดส่วนสีม่วง : เขียวในอัตราส่วน 9 : 7 พบว่า มียีนควบคุม 2 คู่ สัดส่วนการเกิดสีม่วง : เขียว ของเยื่อกันน้ำฝน เขี้ยวใบ ข้อ ปล้องและปลายดอก เท่ากับ 9 : 7 แต่ที่ยอดเกสรตัวเมีย มีสัดส่วนสีม่วง : เขียว ในอัตราส่วน 7 : 9 กลับกันกับลักษณะอื่นๆ ส่วนต้นกล้า กาบใบและแผ่นใบ มีสัดส่วนสีม่วง : เขียวปนม่วง : เขียว ในอัตราส่วน 1 : 8 : 7 นอกจากนี้ Stephens and Nickel (1992) ได้ศึกษาการถ่ายทอดลักษณะดอกสีชมพูในถั่วเหลือง เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์เกี่ยวกับ สภาพของยีนและการแสดง

ลักษณะดอกสีชมพูกับยีนควบคุมสีดอก โดยทดสอบสัดส่วนการกระจายตัวของรุ่น F_2 พบว่า มียีนด้อย 1 คู่ควบคุมสีชมพูของดอกถั่วเหลืองและไม่สัมพันธ์กับยีนอื่นที่ควบคุมสีดอก และมีรายงานว่าสีของดอกถั่วเหลืองมีสหสัมพันธ์กันอย่างสูงกับ hypocotyl (Hartwig and Hinson, 1962) สอดคล้องกับการศึกษาของ Peters, *et al.* (1984) ที่รายงานว่า ถั่วเหลืองดอกสีม่วงและ magenta มี hypocotyl สีม่วง ส่วนถั่วเหลืองชนิด purple-throat มี hypocotyl สีม่วงอ่อน เมื่อดอกมีสีอื่นรวมทั้งสีชมพู พบว่า hypocotyl ไม่แสดงสีม่วง นอกจากนั้นศึกษาการถ่ายทอดสีดอกและสีลำต้นของพืชสกุล *Exacum affine* โดยการประเมินสัดส่วนของประชากรพ่อแม่ รุ่น F_1 และ F_2 รวมทั้ง backcross ทดสอบด้วยไคสแควร์ พบว่า ดอกสีม่วงข่มสีขาวอย่างสมบูรณ์ มีสัดส่วนการกระจายตัวของลูก F_2 เท่ากับ 3 : 1 และยีนนี้ควบคุมสีลำต้นด้วย มีรูปแบบการกระจายตัวสีลำต้น 2 แบบ แต่ละแบบมีการกระจายตัวเหมือนกันในประชากรพ่อ แม่ รุ่น F_1 และ backcross แต่ในรุ่น F_2 แตกต่างกัน คือ แบบที่ 1 มีต้นสีแดง : แดงอ่อน : เขียว เท่ากับ 33 : 15 : 16 ส่วนแบบที่ 2 มีต้นสีแดง : แดงอ่อน : เขียว เท่ากับ 30 :18 :16 (Wolf and Craig, 1988) และมีผู้ศึกษาการถ่ายทอดสีลำต้นกับพืชสกุล *Medicago polymorpha* พบว่า รุ่น F_2 มีสัดส่วนต้นสีแดง : เขียว เท่ากับ 3 : 1 แสดงว่า สีต้นควบคุมด้วยยีนเด่นหนึ่งคู่และเสนอว่าสีของลำต้นสามารถใช้เป็นเครื่องหมายทางสัณฐานวิทยาได้ เนื่องจากสามารถตรวจสอบได้ตั้งแต่ต้นเล็กๆ ประมาณ 1-2 สัปดาห์หลังงอก (De Haan and Barnes, 1998) ส่วน Phippen and Simon (2000) ศึกษาการถ่ายทอดแอนโทไซยานินในโหระพา พบว่า มียีนเด่น 2 คู่ควบคุมการแสดงออกของสีม่วงในส่วน vegetative ส่วนการเกิดสีม่วงบนส่วนต่างๆ ของต้นข้าวมีความแตกต่างตามชนิดและพันธุ์ ส่วนสุณิสา และดำเนิน (2546) รายงานว่า ในข้าว indica การเกิดสีเป็นการทำงานร่วมกันของยีน 3 คู่ โดยคู่ที่ 1 ทำหน้าที่สร้างสารตั้งต้นบนส่วนต่างๆ ของพืช ยีนคู่ที่ 2 เกี่ยวข้องกับการสร้าง enzyme ซึ่งไปเปลี่ยนสารตั้งต้นให้เป็นสี และยีน คู่ที่ 3 ทำหน้าที่เป็นตัวกระจายสีไปที่ส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว โดยยีน 2 คู่แรกมีผลต่อการปรากฏสี โดยถ้ายีนคู่ใดคู่หนึ่งหรือทั้ง 2 คู่อยู่ในสภาพด้อย มีผลให้สีม่วงไม่ปรากฏบนส่วนต่างๆ ของต้นข้าว

การควบคุมสารเกิดสีในพืช

การเกิดสีและรูปแบบการเกิดสีในพืชต่างๆ เกิดจากการสะสมแอนโทไซยานินในเซลล์ที่จำเพาะ ยีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแอนโทไซยานินแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของยีนโครงสร้าง (structural gene) และกลุ่มของยีนควบคุม (regulatory gene) ทำหน้าที่แตกต่างกันคือ ยีนโครงสร้างเกี่ยวข้องกับเอนไซม์ในปฏิกิริยาการสร้างแอนโทไซยานิน ส่วนยีนควบคุมเกี่ยวข้องกับโปรตีนที่กำหนดการแสดงออกของยีนโครงสร้างและรูปแบบของการเกิดสี การแสดงออกของยีนควบคุม

จะจำเพาะต่อรูปแบบของการเกิดสี (Holton and Cornish, 1995) มีรายงานยีนยับยั้งการแสดงออกของยีนทั้ง 2 กลุ่มเพื่อไม่ให้แสดงสี สำหรับยีนยับยั้งบางยีนมีสภาพเป็นยีนเด่น แม้ว่าอยู่ในสภาพ heterozygous สามารถยับยั้งการแสดงออกของยีนการเกิดสีได้ (IRRI, 1996) จากการศึกษายีนควบคุมการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในพืชหลายชนิด Cone, *et al.* (1993) พบว่า ในข้าวโพดมียีน 2 กลุ่ม คือกลุ่ม *r* และกลุ่ม *cl* ซึ่งควบคุมการแสดงออกของยีนโครงสร้างในเนื้อเยื่อต่างๆ ยีนกลุ่ม *r* ประกอบด้วย *r, cl, sn* และ *b* เกี่ยวข้องกับการถอดรหัสและแปลรหัสได้โปรตีนที่มีกรด amino ที่ปลาย N จำนวนมาก และที่ปลาย C มีส่วนของ basic helix - loop - helix (bHLH) ทำหน้าที่จับกับดีเอ็นเอ ส่วนกลุ่มของ *cl* ประกอบด้วย *cl* และ *pl* มีการถอดรหัสและแปลรหัสได้โปรตีน ซึ่งมี MYB domain มีส่วนของ helix - turn - helix สำหรับจับกับดีเอ็นเอ ยีนทั้ง 2 กลุ่มมียีนสมาชิกแต่ละยีนแสดงออกแตกต่างกันไป

ส่วนรูปแบบการแสดงสีในข้าวมียีนโครงสร้างในกลุ่ม C (chromogen) ที่มีสภาพยีนเป็น C^{B}, C^{Br} และ C^{+} สามารถตอบสนองต่อการสร้างแอนโทไซยานิน และมีกลุ่มยีนไปกระตุ้นยีนในกลุ่ม C คือ กลุ่มยีน A (activator) ซึ่งสำคัญสำหรับการสร้างแอนโทไซยานิน มีสภาพยีนเป็น A^{S}, A^{E}, A^{-} และ *A* นอกจากนี้ยีน *Rc* และ *Rd* เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สีน้ำตาลในเปลือกเมล็ดข้าว ส่วนยีนควบคุมกลุ่ม P มีสภาพยีนเป็น P^{+}, P^{k} และ *P* มีผลต่อการสร้างแอนโทไซยานินที่ปลายดอก และยีนกลุ่ม Pl มีสภาพยีนเป็น Pl^{w}, Pl^{i}, *Pl* และ Pl^{+} มีผลต่อการแสดงออกของสีม่วงบนส่วนที่แตกต่างกัน คือ Pl^{w} มีผลต่อการเกิดสีม่วงที่แผ่นใบ กาบใบ เขี้ยวใบ เยื่อกันน้ำฝนและเปลือกเมล็ด Pl^{i} มีผลต่อการเกิดสีม่วงที่แผ่นใบ กาบใบ เยื่อกันน้ำฝนและปล้อง และ *Pl* มีผลต่อการเกิดสีม่วงที่แผ่นใบ กาบใบ เขี้ยวใบ เยื่อกันน้ำฝน ข้อ ปล้องและcollar ส่วน Pl^{+} มีสีในเนื้อเยื่อพืชทุกส่วน สำหรับยีน *Pn* ทำให้เกิดสีม่วงที่ข้อและยีน *Prp* มีผลทำให้เกิดสีม่วงที่เปลือกเมล็ด นอกจากนี้พบว่า มียีนยับยั้งการแสดงออกของยีน (inhibitory gene) คือ *I-Pl* ยับยั้งการแสดงออกของยีนสีม่วงที่ใบเป็น ยีนเด่น *I-Pl1, I-Pl2* และ *I-Pl3* ยับยั้งการแสดงออกของ Pl^{w} และ Pl^{i} ส่วนยีน *I-Pl4* และ *I-Pl5* ยับยั้งยีนที่ตำแหน่ง *Prp* และยีน *I-Pl6* ยับยั้งการแสดงออกของยีนที่อยู่ในสภาพ Pl^{i} ส่วนยีน *IIb* ยับยั้งการแสดงออกของสีม่วงที่แผ่นใบ (IRRI, 1996) นอกจากนี้ กนกพร (2545) รายงานว่า การเกิดสีที่ระดับต่างๆ ส่วนใหญ่ควบคุมที่การถอดรหัสยีน ซึ่งมีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับโปรตีนหลายชนิด ส่งผลให้พืชเกิดสีและระดับของสีที่มีความอ่อน-เข้มต่างๆ ที่แตกต่างกันมากมาย ในการศึกษากลไกการทำงานของยีนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีร่วมกับปัจจัยอื่นๆ มีประโยชน์เพื่อความรู้ไปใช้เพิ่มคุณค่าผลผลิตทางการเกษตรทั้งในด้านคุณค่าทางอาหาร เภสัชเวชและคุณค่าทางเศรษฐกิจอื่นๆ เช่น การผลิตไม้ดอกไม้ประดับที่มีสีหลากหลายและแตกต่างจากธรรมชาติ การสร้างพืชที่ต้านทานต่อโรคแมลงและสร้างพืชที่มีสารอาหารเสริมเป็นต้น

หลักสถิติเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูล

การทำงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการบันทึกข้อมูลที่เป็นตัวเลข และต้องนำตัวเลขที่ได้มาจัดทำให้สะดวกต่อการวิเคราะห์ (analysis) เรียกว่า การประมวลข้อมูล (data processing) แล้ววิเคราะห์ตามที่ได้วางแผนวิธีการวิเคราะห์ไว้ซึ่งมีความสำคัญยิ่ง เนื่องจากหากบันทึกข้อมูลโดยไม่ทราบหลักการวิเคราะห์ข้อมูล อาจทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากข้อมูลเพื่อวิเคราะห์หาคำตอบที่ต้องการได้หรืออาจใช้ได้เพียงบางส่วน ทั้งที่กว่าจะได้ข้อมูลนั้นมาอาจต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายหรือขั้นตอนที่ยุ่งยากมาก เมื่อทราบวิธีการและจุดประสงค์ของการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกแล้ว จึงดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูล ในการวิเคราะห์ข้อมูลมี 2 รูปแบบใหญ่ๆ ที่สำคัญ คือ การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (quantitative analysis) และการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative analysis) ซึ่งการวิเคราะห์ทั้งสองลักษณะนี้มีความสำคัญ และเหมาะสมกับประเด็นปัญหาการวิจัยที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยแต่ละเรื่องว่าเหมาะสมที่จะใช้การวิเคราะห์ในลักษณะใด ส่วนใหญ่มักจะเลือกวิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณมาใช้ โดยนำเอาตัวเลขมาใช้อธิบายและวิเคราะห์อ้างอิงอยู่เสมอ ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณส่วนใหญ่เป็นการนำเอาข้อมูลในรูปของตัวเลขสถิติ หรือตารางสถิติที่จะเชื่อมโยงระหว่างทฤษฎีกับผลที่ศึกษา ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจ และสามารถวิเคราะห์ สรุปผลการวิเคราะห์จากข้อมูลที่มีอยู่ได้ จึงต้องมีความรู้ในสถิติประเภทต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อจะได้เลือกใช้สถิติให้เหมาะสมกับงานวิจัยได้ วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ที่สำคัญ คือ การวิเคราะห์โดยใช้สถิติพรรณนา (descriptive analysis) ใช้เพื่อบรรยายข้อมูลที่รวบรวมโดยไม่มีการอ้างอิงไปยังประชากรอื่นๆ เพื่อบรรยายลักษณะของประชากรหรือตัวอย่างประชากร สามารถเลือกใช้สถิติได้ (กนกทิพย์, 2541) ดังนี้

1. การแจกแจงความถี่และค่าร้อยละ (frequency distribution and percentage)

2. การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง (measure of central tendency) ได้แก่ มัชฌิมเลขคณิตหรือค่าเฉลี่ย (arithmetic mean หรือ average) ค่ามัธยฐาน (median) และค่าฐานนิยม (mode)

3. การวัดการกระจาย (measure of dispersion) เช่น พิสัย (range) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และสัมประสิทธิ์การกระจาย (coefficient of variation) เป็นต้น

นอกจากนั้นอาจต้องการบรรยายให้ทราบถึงลักษณะและขนาดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้วย ส่วนประเภทที่สอง คือ การวิเคราะห์โดยใช้สถิติอนุมาน (inferential analysis) ในการทำงานวิจัยส่วนใหญ่ต้องการสรุปผลทั้งประชากร ขณะที่การศึกษาทั้งประชากรทำได้ยาก จึงได้คัดเลือกบางส่วนของประชากรมาทำการศึกษาเรียกว่า กลุ่มตัวอย่าง (sample) การอธิบายลักษณะของประชากรโดยนำข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างไปอ้างอิงนั้นต้องใช้เทคนิคทางสถิติ เรียกว่า สถิติอ้างอิง

ซึ่งจะนำข้อมูลต่างๆ ที่รวบรวมได้จากตัวอย่างที่ เรียกว่า ค่าสถิติ (statistic) ไปอ้างอิงค่าที่ต้องการศึกษาจากประชากรที่เรียกว่า พารามิเตอร์ (parameter) ด้วยวิธีการประมาณค่า (estimate) หรือการทดสอบสมมติฐาน (testing of hypothesis) สถิติเชิงอนุมานที่พบบ่อยๆ (สุวรรณ, 2544) คือ

1. การประมาณค่าพารามิเตอร์ของประชากร (parameter estimation) ใช้ในกรณีที่ต้องการทราบคุณลักษณะของประชากรที่ศึกษา เพราะไม่ทราบพารามิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย

- การประมาณค่าเฉลี่ยของประชากร
- การประมาณสัดส่วนของประชากร

2. การทดสอบสมมติฐาน (testing of hypothesis) ใช้เมื่อทราบคุณลักษณะของประชากรและต้องการทดสอบว่า ค่าสถิติที่คำนวณได้สอดคล้องกับคุณลักษณะของประชากรตามสมมติฐานหรือไม่ อาจเป็นสถิติทดสอบพาราเมตริก (parametric test) หรือนอนพาราเมตริก (non-parametric test) ซึ่งต้องเลือกให้เหมาะสมตามระดับการวัด (แบบนามบัญญัติ จัดอันดับ อันตรภาค อัตราส่วน) และเงื่อนไขหรือข้อตกลงเบื้องต้นสำหรับสถิติทดสอบนั้นๆ ประกอบด้วย

- การทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากร (testing of the population mean)
- การทดสอบสัดส่วนของประชากร (testing of the population proportion)
- การทดสอบไคสแควร์ (chi-square test)
- การทดสอบค่าสหสัมพันธ์ (testing of coefficient of correlation)
- การวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis)

สถิติทดสอบพาราเมตริกใช้ได้กับข้อมูลที่มีระดับการวัดแบบอันตรภาค หรืออัตราส่วน และข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) หรือใกล้เคียงปกติ ดังนั้นตัวอย่างต้องมีมากพอสมควรเพื่อให้มั่นใจได้ว่ามีการแจกแจงแบบปกติ หากมีการสุ่มกลุ่มตัวอย่างจากประชากรเพื่อให้ได้กลุ่มตัวอย่างกลุ่มเดียว สามารถเลือกใช้สถิติตามเงื่อนไขไม่ยุ่งยาก เช่น การทดสอบค่าเฉลี่ยกลุ่มเดียว (μ) ตัวสถิติที่ใช้ทดสอบ ในกรณีทราบค่าความแปรปรวนของประชากรทดสอบโดย Z-Test แต่ในกรณีไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากรทดสอบโดย t-Test ส่วนการทดสอบสัดส่วนกลุ่มเดียวนั้นเป็นการทดสอบสัดส่วนของกลุ่มตัวอย่างกับค่าที่คาดไว้ เนื่องจากมีการแจกแจงใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบปกติจึงทดสอบโดย Z-Test ส่วนสถิติทดสอบสหสัมพันธ์กลุ่มเดียวเป็นการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวอย่างกับค่าที่คาดไว้ ส่วนสถิติที่ใช้ทดสอบแตกต่างกันตามวิธีการคำนวณสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในแต่ละแบบ ถ้ามีกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไปต้องพิจารณาข้อมูลที่ได้จากกลุ่มเหล่านั้นว่า เป็นอิสระจากกันหรือมีความสัมพันธ์กัน เพราะต้องใช้สถิติทดสอบแตกต่างกัน เช่น กรณีที่ต้องการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไปแต่ไม่สามารถควบคุมหรือจัดการสุ่มกลุ่มให้มีพื้นฐานเท่ากันได้ จึงเลือกใช้วิธีการควบคุมอิทธิพลของ

ตัวแปรเกิน โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (analysis of covariance หรือ ANCOVA) ถ้าต้องการศึกษาตัวแปร 2 ตัวหรือ 3 ตัว พร้อมๆ กัน และสนใจปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างตัวแปรเลือกใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (two-way ANOVA) หรือการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามทาง (three-way ANOVA) นอกจากนั้นยังมีสถิติที่ใช้ทดสอบแบบพาราเมตริกอีกหลายวิธีการขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและข้อตกลงเบื้องต้น เช่น การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (ANOVA) หรือการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (multiple regression analysis) (ชูเพ็ญศรี, 2548) ส่วนสถิติทดสอบนอนพาราเมตริกใช้กับข้อมูลที่มีระดับการวัดแบบนามบัญญัติหรือแบบจัดอันดับ ไม่มีการกำหนดลักษณะเฉพาะของค่าพารามิเตอร์และข้อตกลงเบื้องต้นไว้ คือ ความเป็นอิสระของข้อมูลแต่ละตัว และไม่คำนึงถึงลักษณะการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นแบบโค้งปกติหรือไม่ ที่เรียกว่า เป็นการแจกแจงแบบอิสระหรือ distribution free (บุญเรียง, 2533) สำหรับสถิติที่ใช้ทดสอบสถิติทดสอบนอนพาราเมตริก ในกรณีทดสอบความเป็นอิสระกรณีกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระกัน สถิติที่ใช้ในการทดสอบ เช่น การทดสอบค่าไคสแควร์ และ Mann Whitney's u Test เป็นต้น ส่วนในกรณีที่สองตัวอย่างสัมพันธ์กัน สถิติที่ใช้ในการทดสอบ เช่น McNemar และ Wilcoxon เป็นต้น (ชูเพ็ญศรี, 2548)

การทดสอบไคสแควร์

ในการศึกษาวิจัยจำเป็นต้องมีการบันทึกข้อมูลต่างๆ มากมาย แล้วแต่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนั้นๆ บางครั้งข้อมูลที่บันทึกอาจอยู่ในรูปของคะแนน เช่น คะแนนการเกิดโรคของพืช หรือคะแนนความเข็งแรงของพืช หรือเป็นสีที่ปรากฏบนเนื้อเยื่อพืช และอาจเป็นความคิดเห็น เช่น ดีที่สุด ดี ปานกลาง น้อยและน้อยมาก เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จัดเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ และการวิเคราะห์ข้อมูลประเภทนี้มีหลากหลายวิธีการ ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย (กนกทิพย์, 2541) หนึ่งในวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลชนิดนี้คือ การทดสอบด้วยไคสแควร์ มีหลักการคือ การเปรียบเทียบความถี่ที่สังเกตได้ [Observed Frequency (Oi)] กับความถี่ที่คาดหมาย [Expected Frequency (Ej)] จากข้อมูลที่จัดเป็นกลุ่มๆ (category) อาศัยการแจกแจงแบบไคสแควร์ (Harris, 1995) การทดสอบไคสแควร์มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งกับสถิติแบบพาราเมตริกและสถิตินอนพาราเมตริก การทดสอบค่าไคสแควร์ที่พบโดยทั่วไป (สายชล, 2547) คือ

1. การทดสอบด้วยค่าไคสแควร์เมื่อมีข้อมูลเพียงลักษณะเดียวหรือตัวแปรเดียว คือ

1.1 การทดสอบภาวะสารูปสนิทดี (Goodness of Fitness) เป็นการทดสอบตัวอย่างที่สุ่มมานั้นว่า เป็นตัวอย่างที่ได้จากประชากรที่มีการแจกแจง (เช่น การแจกแจงแบบปกติ ทวินาม พัวซอง หรือพหุนาม เป็นต้น) ตามที่ได้คาดไว้หรือไม่

1.2 การทดสอบอัตราส่วน (Test of Ratio) เป็นการทดสอบความถูกต้องของอัตราส่วนตามทฤษฎี เช่น อัตราส่วนของสีม่วง : สีแดงม่วง : สีแดง : สีเหลือง ในอัตราส่วน 9 : 3 : 3 : 1 หรือไม่ โดยการทดสอบความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนของประชากร k กลุ่ม แบบจำแนกทางเดียวเท่านั้น และการทดสอบด้วยไคสแควร์เมื่อมีข้อมูลลักษณะเดียวหรือตัวแปรเดียว มีสถิติทดสอบดังนี้

χ^2 = ผลรวมของ $(Oi - Ei)^2/Ei$

โดยที่

O = ความถี่ที่สังเกต (Observed Frequency)

E = ความถี่ที่คาดหมาย (Expected Frequency)

k = จำนวนกลุ่มที่จำแนก

df = k-1

2. การทดสอบด้วยค่าไคสแควร์เมื่อมีข้อมูลสองลักษณะหรือสองตัวแปร คือ

2.1 การทดสอบความเป็นอิสระ (Test of Independence) ใช้ข้อมูลที่ได้จากตัวอย่างที่สุ่มมาจากประชากรเดียว ลักษณะของข้อมูลมีลักษณะเป็นตารางสองทาง (Two way table) เป็นการทดสอบความเป็นอิสระต่อกันหรือมีความสัมพันธ์กันของตัวแปร 2 ตัวแปร

2.2 การทดสอบความเป็นเอกภาพ (Test of Homogeneity) ข้อมูลที่ใช้ได้จากการสุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 2 ตัวอย่างขึ้นไป ลักษณะของข้อมูลเป็นตารางสองทางเช่นเดียวกับการทดสอบความเป็นอิสระ เป็นการทดสอบสัดส่วนความเท่าเทียมกันของประชากรและการทดสอบด้วย ไคสแควร์เมื่อมีข้อมูลสองลักษณะหรือสองตัวแปรมีสถิติทดสอบดังนี้

χ^2 = ผลรวมของ $(Oij - Eij)^2/Eij$

โดยที่

Oij = ความถี่ที่สังเกตได้ในแถวนอนที่ i, แถวตั้งที่ j

Eij = ความถี่ที่คาดหมายในแถวนอนที่ i, แถวตั้งที่ j

r = จำนวนแถวนอน

c = จำนวนแถวตั้ง

df = (r-1)(c-1)

การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ค่าไคสแควร์ในงานวิจัยทางการเกษตร ส่วนใหญ่เป็นการใช้ทดสอบ เพื่อประเมินการกระจายตัวจากการถ่ายทอดลักษณะต่างๆ ของพืช ในรุ่น F_2 เช่น การศึกษาโดย สิริกัญญา และณัฐา (2548) ที่ศึกษาการถ่ายทอดลักษณะของดอกดาวเรืองทั้งลักษณะของสีและลักษณะของดอก จากการทดลองพบว่า การเกิดสีของดอกดาวเรืองในรุ่น F_2 มีอัตราส่วน

ดอกสีแดงเหลืองที่ได้คะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 9.8 : สีแดงเหลืองที่ได้คะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 5.4 : สีเหลืองที่ได้คะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4 : สีเหลืองเขียวที่ได้คะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 ในสัดส่วน 5 : 4 : 3 : 1 ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดไว้เป็น 1 : 4 : 6 : 4 : 1 ส่วนลักษณะดอก พบว่า อัตราส่วนดอกซ้อน : ดอกชั้นเดียว เท่ากับ 3 : 1 และลักษณะดอกฟูกลม : ฟู : กระจุก พบในอัตราส่วน 1 : 2 : 1 นอกจากนี้มีการศึกษาการถ่ายทอดลักษณะสีที่ส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโดย Hector (1922 อ้างโดย Chandraratna, 1964) พบว่า สีปลายดอกและสีกาบใบมีอัตราส่วนสีม่วง : สีเขียว สัดส่วน 3 : 1, 9 : 7, 15 : 1 และ 27 : 37 สียอดเกสรตัวเมียสัดส่วน 3 : 1 และ 27 : 37 สี Lemma-Palea และสีเปลือกเมล็ดที่เป็นหมันสัดส่วน 3 : 1 และ 27 : 37 สีปล้องสัดส่วน 3 : 1, 9 : 7 และ 27 : 37 สีข้อและสีเขี้ยวใบสัดส่วน 9 : 7 และสีเยื่อกันน้ำฝนสัดส่วน 9 : 7 และ 27 : 37 ส่วน Parnell, *et al.* (1922 อ้างโดย Chandraratna, 1964) พบว่า สีปลายดอกมีอัตราส่วนสีม่วง : สีเขียว สัดส่วน 3 : 1, 9 : 7 และ 15 : 1 สียอดเกสรตัวเมียสัดส่วน 3 : 1 สี Lemma-Palea สีปล้องและสีเปลือกเมล็ดที่เป็นหมันสัดส่วน 3 : 1 และ 9 : 7 สีข้อและสีเขี้ยวใบสัดส่วน 9 : 7 โดยพบว่า สีที่ปรากฏส่วนใหญ่มีอัตราส่วนเท่ากับ 3 : 1 และ 9 : 7 แต่ที่แตกต่างจากนี้ เนื่องจากปฏิกิริยาและการแสดงออกของยีนที่ควบคุมลักษณะสีที่บริเวณต่างๆ

ในลักษณะของสีที่ปลายดอก Chandraratna (1964) รายงานว่า สีที่ปรากฏขึ้นอยู่กับการทำงานร่วมกันของยีน *C* และ *Sp* โดยเมื่อยีนอยู่ในสภาพ SpC^{B} มีผลทำให้ปลายดอก เปลือกเมล็ดที่เป็นหมัน ยอดเกสรตัวเมียและปล้องมีสีม่วงเข้ม แต่เมื่ออยู่ในสภาพ SpC^{BP} และ *SpSp* มีผลทำให้ปลายดอก เปลือกเมล็ดที่เป็นหมัน ยอดเกสรตัวเมีย มีสีม่วงอ่อน แต่ปล้องไม่มีสีม่วง เช่นเดียวกับยีน $Sp^{d}C^{B}$ และ $Sp^{d}C^{BP}$ ซึ่งต่างกันที่ยีนเหล่านี้มีผลทำให้เกิดสีแดงอ่อน และเมื่อยีนอยู่ในสภาพ $C^{B}C^{Br}$ ปลายดอกจะพัฒนาสีในช่วงการสุกแก่ ส่วน $C^{Br}Sp$ มีผลทำให้ปลายดอก เปลือกเมล็ดที่เป็นหมันมีสีแดง แต่ส่วนอื่นๆ ทุกส่วนมีสีเขียว ส่วนการเกิดสีที่แผ่นใบและกาบใบ เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างยีน *C* และ *Sp* กับยีนที่เกี่ยวข้องในการปรากฏสีของใบจำนวน 3 ยีน คือ *Pl, Pla* หรือ *Plm* ซึ่งมีส่วนในการแพร่สีไปยังแผ่นใบ กาบใบและส่วนอื่นๆ ของต้นข้าว ที่ทำให้มีสารแอนโทไซยานินเกิดขึ้นที่ใบ นอกจากนี้ยีนในสภาพ $C^{B}C^{Br}$ และ $C^{BP}C^{Br}$ มีผลทำให้ไม่มีการพัฒนาสารแอนโทไซยานิน โดยในการเกิดสารแอนโทไซยานินนั้นมียีนที่เป็นตัวเร่งให้มีการพัฒนา คือ ยีน *Sp* และ Sp^{d} โดยที่ยีน Sp^{d} มีผลต่อความเข้มของสีมากกว่า ยีน *Sp* ส่วนสีเยื่อกันน้ำฝนมียีน *Pl* และ *Pla* ที่ทำหน้าที่ควบคุมสีที่ใบร่วมกับยีน *C* และ *Sp* มีอิทธิพลต่อสีที่ปรากฏบริเวณเยื่อกันน้ำฝน และสีของปล้องนั้น พบว่ายีนที่อยู่ในสภาพ $C^{B}Sp$ ส่งผลให้ปล้องมีสีม่วง รวมทั้งยีน *Pl* และ *Pla* ที่ทำหน้าที่ควบคุมสีที่ใบยังมีอิทธิพลต่อสีของปล้องได้ด้วย นอกจากนี้มียีน *Ntp* ซึ่งเป็นยีนที่ทำหน้าอย่างจำเพาะต่อสีที่ปรากฏบริเวณปล้อง ส่วนการเกิดสีที่บริเวณข้อนั้น ยีนที่อยู่ในสภาพ $C^{B}C^{Br}$ และ $C^{BP}C^{Br}$ ทำให้มีสีปรากฏที่บริเวณข้อ นอกจากนี้ยีน *Pl* และ *Pla* ที่ทำหน้าที่ควบคุมสีที่ใบ

ยังมีอิทธิพลต่อสีที่ปรากฏที่ข้อได้อีก เช่นเดียวกับสีของเยื่อกันน้ำฝนและสีปล้อง ส่วนปฏิกิริยาของยีน *C* และ *Sp* และยีนที่มีความจำเพาะในการเกิดสีที่ส่วนต่างๆ ของต้นข้าว มีผลต่อระดับความอ่อน-เข้มและชนิดของสีที่แตกต่างกันอย่างมากมาย เนื่องจากการทำงานของยีน มีผลต่อสีที่แสดงออกที่ลักษณะต่างๆ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันไป นอกจากนี้สภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น แสง อุณหภูมิ ความชื้น แร่ธาตุในดิน รวมทั้งความเครียดต่างๆ ยังมีผลต่อลักษณะสีที่แสดงออกได้ (กนกพร, 2545) ซึ่งลักษณะเช่นนี้มีผลต่อการบันทึกลักษณะของสีที่ปรากฏ นอกจากนั้นยังส่งผลต่ออัตราส่วนที่ได้จากการวิเคราะห์ไคสแควร์ต่อไปได้

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินลักษณะสีที่เกี่ยวข้องกับแอนโทไซยานิน

การปรับปรุงพันธุ์เพื่อให้ได้ลักษณะสีม่วงในเมล็ดข้าวไร่นั้น มีความสำคัญมาก เนื่องจากสีสันต่างๆ ที่ปรากฏเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากต่อการเลือกซื้อ และการบริโภคอาหารของผู้บริโภค นอกจากนั้นสีม่วงที่พบในเนื้อเยื่อพืชยังอุดมไปด้วยสารแอนโทไซยานิน เป็นแหล่งหนึ่งที่ให้สารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายของผู้บริโภค (กนกพร, 2545) จากประโยชน์ที่หลากหลายของสารแอนโทไซยานิน จึงได้รับความสนใจในเรื่องการใช้ประโยชน์อย่างมาก จากนักวิทยาศาสตร์สาขาต่างๆ รวมทั้งนักปรับปรุงพันธุ์ข้าวที่ต้องการให้มีสารแอนโทไซยานินอยู่ในเมล็ดข้าว ที่รับประทานเป็นอาหารหลักในหลายประเทศ ซึ่งมีผลทำให้คนในทุกชนชั้นโดยเฉพาะคนยากจนได้รับประโยชน์อย่างเต็มที่ จึงมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการปรับปรุงพันธุ์พืชรวมถึงกระบวนการคัดเลือกเพื่อให้ได้พืชที่มีลักษณะตามต้องการ ในการคัดเลือกนั้นการกระทำในชั่วต้นๆ ของการปรับปรุงพันธุ์พืชจะมีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากมี genotype ของลักษณะที่ต้องการปรากฏอยู่มาก (ดำเนิน, 2545) ในลูกรุ่นต้นๆ ของโครงการปรับปรุงพันธุ์พืช มีความหลากหลายของพันธุกรรมมาก เช่น การผสมข้ามระหว่างพันธุ์ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ลูกรุ่น F_2 มีลักษณะที่ปรากฏมีหลายลักษณะ คือ เหมือนพ่อแม่ ระหว่างพ่อแม่ หรืออาจด้อยหรือดีกว่าพ่อแม่ เป็นต้น จึงควรคัดเลือกในลูกรุ่นต้นๆ (กฤษฎา, 2546) ในการปรับปรุงพันธุ์เพื่อลักษณะสีที่สัมพันธ์กับปริมาณแอนโทไซยานินในเมล็ดข้าว จึงจำเป็นต้องทำการคัดเลือกเพื่อให้ได้ลักษณะที่ต้องการ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการวัดค่าสีและการตรวจวัดประเมินปริมาณแอนโทไซยานิน ซึ่งมีหลายวิธีการ บางวิธีการจำเป็นต้องมีการสกัดเอาสารสี (pigment) จากวัตถุที่ต้องการวัดออกมา เพื่อตรวจวัดหาความเข้มข้นของปริมาณแอนโทไซยานินหรือสารอื่นๆ โดยใช้ spectrophotometer (กอบเกียรติ และคณะ, 2540; Anese, *et al* , 2002 และ Castellar, *et al*., 2006) หรือสกัดแล้วตรวจหาสารอื่นๆ และปริมาณความเข้มข้นของสารโดยใช้ HPLC ตรวจวิเคราะห์ (Bakker, *et al*., 1994 และ Gil, *et al*., 1995) แต่

เนื่องจากเป็นวิธีการที่ยุ่งยาก ต้องใช้ระยะเวลานานและเสียค่าใช้จ่ายสูง จึงได้มีการพัฒนาใช้วิธีการที่ง่ายและสะดวกกว่าขึ้น โดยการวัดจากแสงที่สะท้อนมาจากผิวของวัตถุที่ตรวจวัด ค่าที่ได้มีหลายระบบ เช่น Hunter Lab, CIE XYZ, Munsell hue chroma และ Value นอกจากนี้ยังมี CIE Lab ซึ่งอัตราส่วนเหล่านี้ได้ปรับให้มีความสม่ำเสมอกัน และค่าของความสะท้อนมาจากอัตราส่วนต่างๆ และความแตกต่างของความสะท้อนที่มีความยาวคลื่นต่างกัน (Fernandez – Lopez, *et al.*, 2002)

การวัดสีด้วยวิธีการดังกล่าว อาศัยหลักการของการตอบสนองต่อการมองเห็นสีของตามนุษย์ Ihl, *et al.* (1994) ตั้งค่า L* เป็นดัชนีของความสว่าง อยู่ในช่วง 0 (สีดำ) ถึง 100 (สีขาว) และ a* หมายถึงสีแดง (+a*) หรือสีเขียว (-a*) ส่วน b* หมายถึง สีเหลือง (+b*) หรือสีน้ำเงิน (-b*) ส่วนใหญ่ค่าที่แสดงหลังจากการตรวจวัดแสดงเป็น L*, a* และ b* สามารถใช้ในการวิเคราะห์และแปลผลได้ดังนี้ คือ ค่า L* แสดงถึงดัชนีความสว่าง ค่า hue หรือค่าความอ่อน- เข้มของสี คือ มุมระหว่างแกนนอนกับเส้นที่เชื่อมกับจุด (a*, b*) ที่เริ่มต้น แล้วพิจารณาการกระจายของสี ทราบได้โดยค่า hue angle และหาได้จากสูตร $H^{\circ} = \tan^{-1} b^*/a^*$ และค่า saturation index (chroma) เป็นค่าของความห่างจากแกนกลาง ซึ่งก็ คือ รัศมีนั่นเอง หาได้จากสูตร $C = (a^{*2}+b^{*2})^{1/2}$ สำหรับงานวิจัยบางอย่างต้องการทราบสีที่เป็นมาตรฐาน เพื่อเป็นดัชนีบอกให้ทราบว่า เมื่อค่า L*, a* และ b* เปลี่ยนแปลงทั้งเพิ่มขึ้นหรือลดลง แล้วทำให้ทราบค่าดัชนีของสีที่เปลี่ยนแปลงไปได้ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของแต่ละสีที่ปรากฏ เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบแยกแต่ละค่าของ L*, a* และ b* อาจส่งผลให้แต่ละค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่สีที่ได้จากแต่ละค่าที่มีความสัมพันธ์กันอาจมีความแตกต่างกันทางสถิติได้ ซึ่งจะทราบได้ว่าแตกต่างกันทางสถิติหรือไม่นั้น ต้องเปรียบเทียบจากค่าสีที่คำนวณขึ้นมา เช่น hue angle, chroma, ดัชนีค่าสี (colour index) เป็นต้น (McGuire, 1992) ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาวิธีการคำนวณค่า L*, a* และ b* ให้ได้ค่าที่สัมพันธ์กับสีที่ปรากฏ สำหรับใช้ในการเปรียบเทียบกัน เช่น hue angle และ chroma ซึ่งแสดงความสัมพันธ์กัน คือ hue angle แสดงให้ทราบมุม (องศา) ของสีที่ปรากฏ ส่วน chroma แสดงให้ทราบระยะของสีที่ปรากฏที่ห่างจากแกนกลางและนำมาประกอบกับค่า L* ซึ่งจะทำให้ทราบสีที่ปรากฏแท้จริง เพื่อใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของสีให้มีความน่าเชื่อถือในทางสถิติ (McGuire, 1992 และ Voss, 1992) แต่จากรายงานดังกล่าวแสดงให้ทราบได้เพียงสีที่ปรากฏเท่านั้น ยังไม่สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างกันทางสถิติของสีที่ปรากฏได้ ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาเพื่อนำค่าต่างๆ มาคำนวณเป็นดัชนีของสีต่อไป และมีรายงานโดย Peres-Gago, *et al.* (2003) ถึงวิธีการใช้ chromameter เพื่อวัดตัวอย่างในงานทดลอง ค่าที่ได้แสดงในรูปค่า L*, a* และ b* เนื่องจากงานทดลองนี้ต้องการดัชนีที่บ่งบอกการเกิดสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์ จึงต้องนำค่าที่ได้มาคำนวณหาดัชนีสีน้ำตาลหรือ browning index (BI) โดยใช้สูตรดังนี้ $BI = [(x - 0.31)/0.172] * 100$ เมื่อ x เป็น chromaticity coordinate

คำนวณจากค่า X, Y และ Z โดย x = X/(X+Y+Z) ซึ่งค่า BI แสดงให้ทราบว่า สารเคลือบผิวสูตรต่างๆ ทำให้เนื้อเยื่อของผลแอบเปิ้ลเกิดสีน้ำตาล สูตรใดมีผลมากน้อยกว่ากัน ซึ่งไม่สามารถทราบจากค่า L*, a* และ b* ได้โดยตรง แต่ใช้เป็นค่าที่แสดงถึงความสดหรือไม่ของผลแอบเปิ้ล และใช้เพื่อประกอบการพิจารณาเลือกสารเคลือบผิว ที่ทำให้ผลแอบเปิ้ลสดน่ารับประทานมากที่สุด

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารแอนโทไซยานินซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ HPLC กับค่าสีที่วัดได้ คือ L*, a* และ b* ในน้ำสตรอเบอร์รี่ พบว่า ความเข้มข้นของแอนโทไซยานินมีความสัมพันธ์ปานกลางกับค่า L* (R^2 = 0.597) และมีความสัมพันธ์กันอย่างสูงกับค่า chroma (R^2 = 0.868) ที่ศึกษาโดย (Bakker, *et al.*, 1994) ส่วนการศึกษาของ Ihl, *et al.* (1994) พบว่า ค่าสีที่วัดได้มีความสัมพันธ์กันอย่างสูงกับความเข้มข้นของคาร์โรทีนอยด์และคลอโรฟิลล์ในใบของ Swiss chard มีค่า R^2 = 0.8595 และ 0.9264 ตามลำดับ นอกจากนี้มีการศึกษาสีในระดับต่างๆ จากหัวมันเทศด้วยการประเมินหาปริมาณสารแอนโทไซยานินและสัดส่วนของ cyanidin กับ peonidin ที่สามารถคาดคะเนได้อย่างหยาบๆ โดยไม่ใช้ HPLC ในการตรวจวิเคราะห์ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของค่า b*/a* ที่วัดได้จากสีของแป้งในหัวของมันเทศ ซึ่งเป็นสีของแอนโทไซยานินชนิด peonidin ที่มีสีม่วงอ่อนถึงม่วงแดงของแป้งในหัวของมันเทศ (Yoshinaga, *et al.*, 1999) และจากการศึกษาปริมาณสารแอนโทไซยานินในเปลือกของผลอโวกาโดโดย Karty, *et al.* (2004) รายงานว่า เมื่อผลอโวกาโดเริ่มสุก สีของเปลือกจะเริ่มเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงและเป็นสีดำเมื่อผลสุกเต็มที่ พบว่าค่า L*, chroma และค่า hue angle ลดลงตามลำดับการสุกของผลอโวกาโด

นอกจากนี้ Carreno, *et al.* (1995) ได้พัฒนาสูตรดัชนีสี เพื่อใช้ประเมินสีแดงขององุ่นที่รับประทานผลสดด้วยการนำสูตรต่างๆ ที่รวบรวมจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ รวมทั้งสูตรที่ได้พัฒนาขึ้นคือ (180-H)/(L*+ C) และ (180-H)/(L*x C) เพื่อศึกษาสหสัมพันธ์กับสีของผลองุ่น พบว่าสูตร (180-H)/(L*+ C) มีความสัมพันธ์กันสูงสุดกับสีของผลองุ่น ซึ่งเป็นสูตรที่เหมาะสมในการประเมินสีของผลองุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมา Carreno, *et al.* (1996) ใช้สูตรดัชนีสี (180-H)/(L*+ C) ในการวัดสีขององุ่นที่รับประทานผลสด จากค่า L*, a*, b*, H°, C, colour index of red grape (CIRG) และปริมาณของสารแอนโทไซยานิน พบว่า มีความสัมพันธ์กับสีของผลองุ่นอย่างสูง โดยดัชนีสีมีความสัมพันธ์กับสีผลองุ่น (OIV) สูงที่สุดและสามารถแยกความแตกต่างของกลุ่มสีของผลองุ่นที่ประเมินได้ดี นอกจากสูตรดังกล่าวแล้ว พบว่า มีรายงานเกี่ยวกับการพัฒนาสูตรเพื่อประเมินสีของพืชชนิดต่างๆ เช่น สูตรเพื่อประเมินสีของส้มเขียวหวานหรือ CCI = (1000 x a*)/(L* x b*) ที่ได้พัฒนาขึ้นโดย Jimenez-Cuesta, *et al.* (1981 อ้างโดย Carreno, *et al.*, 1995) และสูตรที่ได้ใช้ในการประเมินสีของผลมะเขือเทศ เช่น สูตรที่ได้จากอัตราส่วนระหว่าง a*/b* ที่ศึกษาโดย Hobson (1987) นอกจากนี้ พบว่าสูตร (2000 x a*)/(L* x C) เป็นสูตรที่ใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงสีผิว

ของผลมะเขือเทศและพืชในกลุ่ม Solanaceous ในช่วงที่หนาวเย็นโดย Dodds, *et al.* (1991) ที่พบว่าการเปลี่ยนแปลงสีผิวของผลมะเขือเทศ mature-green (MG) ไม่มีความสัมพันธ์กับชนิดหรือพันธุ์ แต่มีผลต่อการเก็บเกี่ยวในช่วงต้นฤดูกาล พันธุ์ที่เป็นพันธุ์มาตรฐาน พันธุ์เชอร์รี่ พันธุ์ทนอากาศเย็น สีผิวมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงอากาศเย็นมากกว่าพันธุ์ที่อ่อนแอต่ออากาศเย็นและรายงานว่าวันเก็บเกี่ยวและอิทธิพลของความหนาวเย็นมีผลทำให้สีของผิวของมะเขือเทศ MG เปลี่ยนแปลงไป

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในการปรับปรุงพันธุ์พืช

การปรับปรุงพันธุ์พืชเป็นงานที่ต้องใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์หลายสาขาวิชา ร่วมกับการใช้ทักษะประสบการณ์ หรือความเชี่ยวชาญของนักปรับปรุงพันธุ์ที่ได้ศึกษาหรือปฏิบัติงานอย่างสม่ำเสมอ งานปรับปรุงพันธุ์พืชที่ประสบความสำเร็จนั้น ต้องใช้ทั้งเวลาและทรัพยากรเป็นจำนวนมาก จึงต้องทำงานอย่างมีระบบตามแผนงานที่ได้กำหนดไว้ อย่างเหมาะสมตามทรัพยากรและเวลาที่มี กมล และประสิทธิ์ (2529) รายงานว่า ระบบงานปรับปรุงพันธุ์มี 5 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ

1. เลือกชนิดของพืช ควรเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจทั้งในปัจจุบัน และคาดว่าจะมีในอนาคต สามารถเจริญเติบโตให้ผลผลิตได้ดีในสภาพแวดล้อมและทรัพยากรที่มี

2. ศึกษาพืชที่เลือกให้เข้าใจ นักปรับปรุงพันธุ์พืชควรมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับวงจรชีวิต ข้อมูลทางพันธุกรรม เทคนิคและวิธีการที่ใช้ในการปรับปรุงพันธุ์ รวมทั้งสภาพการผลิต การตลาด และปัญหาของพืชที่เลือกให้ดี

3. กำหนดวัตถุประสงค์ เป็นการกำหนดลักษณะของพืชที่ต้องการ เช่น ผลผลิตสูง คุณภาพที่เป็นรูป รส กลิ่น สี หรือคุณค่าทางอาหารที่ดี เป็นต้น นอกจากนี้อาจจะมีการปรับปรุงเพื่อลักษณะที่ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อม ต้านทานโรคแมลงหรือแม้แต่อายุการเก็บเกี่ยว และอายุการเก็บรักษา เป็นต้น

4. การดำเนินงานปรับปรุงพันธุ์ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 การเลือกหรือสร้างประชากรพื้นฐาน ซึ่งจะต้องมีความแปรปรวนทางพันธุกรรมในลักษณะที่ต้องการคัดเลือกมากพอ ที่จะส่งผลให้การคัดเลือกพันธุ์พืชประสบผลสำเร็จ

4.2 เลือกวิธีการปรับปรุงพันธุ์ วิธีการปรับปรุงพันธุ์พืชที่แบ่งตามวิธีการผสมเกสรของพืชมี 2 แบบ คือ พืชผสมตัวเอง และพืชผสมข้าม กรณีที่เป็นการปรับปรุงพันธุ์ในท้องถิ่นที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น ทั้งในพืชผสมตัวเองและพืชผสมข้าม มีวิธีการคัดเลือก คือ การคัดเลือกพันธุ์บริสุทธิ์ (pure-line selection) หรือการคัดเลือกหมู่ (mass selection) ถ้าเป็นการปรับปรุงพันธุ์ที่มีอยู่ให้ดีขึ้นโดยการเพิ่มลักษณะดีบางลักษณะ อาจจะเลือกใช้วิธีการผสมกลับ (backcross selection)

ในกรณีที่ทำการผสมข้ามพันธุ์ เพื่อสร้างความแปรปรวนทางพันธุกรรมของลักษณะที่ต้องการ วิธีการคัดเลือกในการปรับปรุงพันธุ์พืชผสมตัวเองที่เลือกใช้โดยทั่วไป ได้แก่ การคัดเลือกแบบบันทึกประวัติ (pedigree method) การคัดเลือกแบบเก็บรวม (bulk method) การคัดเลือกแบบเมล็ดต่อต้น (single seed descent) การคัดเลือกพันธุ์ซ้ำ (recurrent selection) ส่วนการคัดเลือกในกระบวนการปรับปรุงพันธุ์พืชผสมข้ามมีวิธีการ ได้แก่ การคัดเลือกพันธุ์หมู่ การคัดเลือกแบบทดสอบรุ่นลูก (progeny test) การคัดเลือกพันธุ์ซ้ำแบบต่างๆ และการคัดเลือกสายพันธุ์แม่ (maternal line selection) ซึ่งหลักในการเลือกวิธีการปรับปรุงพันธุ์นั้น ควรพิจารณาจากเป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก ประหยัด และมีประสิทธิภาพที่สุด

4.3 คัดเลือกพันธุ์ใหม่ ในการคัดเลือกพันธุ์ต้องมีการตั้งเกณฑ์ขึ้นมา เพื่อช่วยตัดสินใจเลือกลักษณะที่ต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการปรับปรุงพันธุ์ โดยทำการคัดเลือกตามขั้นตอนที่ได้เลือกไว้จนได้พันธุ์พืชที่ต้องการ เช่น พืชผสมข้าม ได้แก่ พันธุ์ผสมเปิด พันธุ์สังเคราะห์และพันธุ์ลูกผสมชั่วแรก ส่วนพันธุ์ของพืชผสมตัวเองได้แก่ พันธุ์แท้หรือพันธุ์บริสุทธิ์ พันธุ์มัลติไลน์ (multiline variety) พันธุ์ปน (blended variety) และพันธุ์ลูกผสมชั่วแรก

5. การจัดการพันธุ์พืชพันธุ์ใหม่ มีขั้นตอน คือ การทดสอบในท้องที่ต่างๆ ในช่วงฤดูปลูกที่เกษตรกรปฏิบัติอยู่ เป็นระยะเวลาหนึ่ง พร้อมกับการจดบันทึกลักษณะต่างๆ อย่างละเอียด เพื่อใช้เป็นลักษณะประจำพันธุ์ ทำการตั้งชื่อพันธุ์และรับรองพันธุ์ ขยายปริมาณเมล็ดพันธุ์ดีให้มากขึ้น หลังจากนั้นทำการเผยแพร่พันธุ์ดี พร้อมกับแนะนำให้แก่เกษตรกร

อย่างไรก็ตามในกระบวนการปรับปรุงพันธุ์พืชตั้งแต่เริ่มต้นจนได้พืชพันธุ์ใหม่ มีวิธีการค่อนข้างยุ่งยาก รวมทั้งต้องสูญเสียทั้งเวลาและทรัพยากร โดยเฉพาะในขั้นตอนการคัดเลือกจากประชากรพืชที่มีความแปรปรวน ถ้าทำอย่างถูกต้องแล้วจะส่งผลให้โครงการปรับปรุงพันธุ์พืชประสบความสำเร็จได้ พร้อมทั้งต้องมีหลักการที่น่าเชื่อถือ ดังนั้นจึงต้องอาศัยวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกลักษณะและทดสอบลักษณะต่างๆ ซึ่งเป็นการป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ วิธีการทางสถิติจึงมีความสำคัญต่อการปรับปรุงพันธุ์พืชอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อลักษณะที่ต้องการปรับปรุงเป็นลักษณะปริมาณ เนื่องจากพื้นฐานของการเกิดมีความซับซ้อน เพราะเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างยีนและสภาพแวดล้อม มียีนที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก และการแสดงออกของยีนมีหลายแบบ คือ แบบบวก แบบข่ม และแบบข่มข้ามคู่ หรือมีปฏิกิริยาระหว่างการแสดงออกของยีนแต่ละแบบของยีนคนละคู่ โดยยีนเหล่านี้มีผลต่อลักษณะยีนละเล็กละน้อย รวมทั้งสภาพแวดล้อมภายนอกยังมีอิทธิพลร่วมด้วย ทำให้ลักษณะมีสภาพต่อเนื่องกันไป เนื่องจากลักษณะที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจส่วนใหญ่เป็นลักษณะเชิงปริมาณ ดังนั้นการศึกษาการประเมินและการใช้ประโยชน์จากลักษณะเหล่านี้ จึงต้องอาศัยวิธีการทางสถิติที่ใช้กับข้อมูลที่มีการกระจาย

แบบต่อเนื่อง เช่น ค่าเฉลี่ย วาเรียนซ์ โควาเรียนซ์ เป็นต้น ซึ่งนักปรับปรุงพันธุ์จำเป็นต้องเข้าใจวิธีการเหล่านี้ โดยทั่วไปการปรับปรุงพันธุ์พืชแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) สร้างความแปรปรวนทางพันธุกรรม 2) คัดเลือกจากความแปรปรวนที่เกิดขึ้นและ 3) สร้างพืชพันธุ์ใหม่จากพืชที่คัดเลือก ซึ่งต้องอาศัยวิธีการทางสถิติ (ไพศาล, 2527 และ พีระศักดิ์, 2526ก) แต่ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ จากข้อมูลที่บันทึกได้ และต้องมีการตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูลที่บันทึกได้กับแบบหุ่นทางสถิติและข้อสันนิษฐาน (assumption) เบื้องต้นของวิธีการที่จะทดสอบ โดยการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ซึ่งจะต้องเป็นแบบสุ่มและเป็นอิสระต่อกัน ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติและมีความแปรปรวนที่เป็นเอกภาพในทุกกลุ่มของสิ่งทดลอง เป็นการจัดการข้อมูลให้ถูกต้องและน่าเชื่อถือก่อนทำการวิเคราะห์ เพื่อไม่ให้เกิดความแปรปรวนขึ้นในข้อมูล ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อผลของการวิเคราะห์ข้อมูลตามวิธีการต่างๆ ที่เลือกใช้ได้ เมื่อข้อมูลที่ได้ไม่สอดคล้องกับแบบหุ่นทางสถิติ อาจแก้ไขด้วยการแปลงข้อมูล โดยพิจารณาจากการกระจายของข้อมูล แล้วเลือกวิธีที่เหมาะสม เช่น การถอดกรณฑ์สอง (square root) เหมาะสมกับข้อมูลที่มีการกระจายแบบพัวซอง (poisson) และวิธี arcsin ($\sin^{-1}$) ที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีการกระจายแบบไบโนเมียล เป็นต้น ในบางกรณีอาจไม่ทราบแบบการกระจายของข้อมูล จึงต้องคำนวณด้วยวิธีการเปลี่ยนค่ายกกำลัง (power transformation) เพื่อหาวิธีการแปลงข้อมูลที่เหมาะสม ที่จะทำให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณหาค่าต่างๆ จากวิธีการที่เลือกใช้ (จรัล, 2523)

การวิเคราะห์ข้อมูลในการปรับปรุงพันธุ์พืชต้องดำเนินการคำนวณ หรือวิเคราะห์ข้อมูลตามวัตถุประสงค์ เพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการ ซึ่งอาจจะต้องใช้ทั้งการคำนวณทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในค่าต่างๆ (ดำเนิน, 2545) ได้แก่

1. อัตราพันธุกรรม (heritability หรือ h^2) แสดงให้ทราบค่าของยีนที่ส่งผลถึงความแปรปรวนของลักษณะที่เกิดขึ้น บอกอัตราส่วนการถ่ายทอดลักษณะที่แปรปรวนไปยังลูกหลานได้ โดยทั่วไปลักษณะคุณภาพจะมีอัตราพันธุกรรมสูงและลักษณะปริมาณจะมีค่าอัตราพันธุกรรมต่ำ

2. การตอบสนองจากการคัดเลือก (response from selection หรือ R) คือ การเพิ่มความเข้มข้นของลักษณะที่ต้องการจากประชากรเดิม หรือความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรใหม่ (X_1) กับค่าเฉลี่ยของประชากรเดิม (X_0) ในทางพันธุศาสตร์แสดงถึงความก้าวหน้าในการคัดเลือก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการคัดเลือกลักษณะที่ต้องการของนักปรับปรุงพันธุ์พืช คือ การเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของประชากร (population mean) ค่านี้ คือ การตอบสนองต่อการคัดเลือก (Response from selection) หรืออาจเรียกว่า genetic gain ซึ่งเป็นค่าที่สัมพันธ์กับความแตกต่างของการคัดเลือก (selection differential หรือ S)

3. ความสามารถในการรวมตัว (combining ability) เป็นวิธีการสำคัญเพื่อใช้ทดสอบความสามารถในการรวมตัวของพ่อแม่ มี 2 แบบ คือ

3.1 ความสามารถในการรวมตัวทั่วไป (general combining ability หรือ GCA) เป็นการทดสอบความสามารถสายพันธุ์จากความสามารถโดยเฉลี่ยของลูกที่เป็นไปได้ทุกๆ คู่ผสม หมายถึงความสามารถของแต่ละพ่อแม่

3.2 ความสามารถในการรวมตัวเฉพาะ (specific combining ability หรือ SCA) เป็นการทดสอบความสามารถในการรวมตัวของแต่ละคู่ผสม ของพ่อแม่ เป็นการวัดความสามารถของลูกเฉพาะแต่ละคู่ผสม ที่มีความสามารถดีกว่าหรือเลวกว่าค่าเฉลี่ยของพ่อแม่แต่ละคู่ หมายถึง ความสามารถของแต่ละคู่ผสม

4. ความดีเด่นของลูกผสม (heterosis) มักเกิดในพืชที่ยีโนไทป์แบบ heterozygous มากกว่า homozygous ซึ่งพืชจะมีความแข็งแรง ทั้งขนาด ผลผลิต การเจริญเติบโต รวมถึงความทนทานต่อโรคแมลงได้ดีกว่าพ่อและแม่

5. ปฏิกิริยาของยีน (gene action) เพื่อทำให้ทราบการแสดงออกของยีนว่า เป็นแบบบวกสะสม แบบข่ม แบบข่มข้ามคู่ หรือมีปฏิกิริยาระหว่างการแสดงออกของยีนแบบต่างๆ เป็นต้น หรือเพื่อคำนวณหาความแปรปรวนทางพันธุกรรม

6. การทดสอบไคสแควร์ (chi-square test) เป็นการตรวจสอบสัดส่วนว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่ หรือตรวจสอบสัดส่วนที่สำรวจได้ ว่าเป็นประชากรเดียวกันหรือไม่ เป็นต้น

7. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) ใช้ในกรณีที่ต้องการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่มีหลายๆ ค่าได้มาจากแต่ละกลุ่มย่อยซึ่งแบ่งตามตัวแปรอิสระที่สนใจ

8. การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (correlation) คือ การที่มีตัวแปร 2 ตัวมีการแปรเปลี่ยนไปอย่างเกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน ที่เป็นไปในทางบวกหรือทางลบ หรือไม่มีสหสัมพันธ์กันในทางสถิติ ค่าของสหสัมพันธ์ มีค่าอยู่ระหว่าง -1 และ 1

9. รีเกรสชัน (regression) เป็นการแสดงความเป็นเหตุเป็นผลกันสามารถใช้ตัวแปรหนึ่ง (ตัวแปรอิสระ) ประมาณค่าของอีกตัวแปรหนึ่ง (ตัวแปรตาม)

10. การทดสอบจากหลายๆ สภาพแวดล้อม และปฏิกิริยาระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อม (multi-environment testing and GxE) พีระศักดิ์ (2526ข) รายงานว่า เป็นการทดลองในสถานที่ต่างๆ หลายสถานในฤดูที่เกษตรกรปลูก แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์รวมกัน เพื่อศึกษาหาพันธุ์ที่สามารถตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมได้หลายสถานที่ ซึ่งจะบ่งบอกได้ว่าพันธุ์นั้นสามารถปลูกได้ทั่วไปในหลายสถานที่ และเป็นพันธุ์ที่มีเสถียรภาพ ก่อนแนะนำให้แก่เกษตรกรปลูกต่อไป

11. การคัดเลือกจากลักษณะทางการเกษตร เป็นวิธีการคัดเลือกพันธุ์ที่ใช้อยู่ดังนี้ คือ การคัดเลือกพันธุ์ทีละลักษณะ (tandem method) เป็นวิธีที่คัดเลือกลักษณะใดลักษณะหนึ่งเพียงลักษณะเดียวจนได้ลักษณะดังกล่าว แล้วจึงเริ่มคัดเลือกลักษณะต่อไป และการคัดเลือกพันธุ์โดยใช้คะแนนของทุกลักษณะ (independent culling method) คัดเลือกตั้งแต่ 2 ลักษณะขึ้นไปพร้อมกัน โดยทุกลักษณะของต้นที่คัดเลือกไว้จะต้องมีค่าเท่ากับหรือสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ตั้งไว้ถ้าคะแนนน้อยกว่า ควรทำการคัดออก (Falconer and Mackay, 1996)

12. ดัชนีการคัดเลือก (selection index) เป็นการคัดเลือกหลายๆ ลักษณะพร้อมกัน โดยสร้างสมการการคัดเลือกที่ประกอบด้วยค่าของทุกลักษณะและน้ำหนักของแต่ละลักษณะซึ่งจะให้ค่าน้ำหนักไม่เท่ากัน และขนาดน้ำหนักขึ้นกับค่าอัตราพันธุกรรมและสหสัมพันธ์ทางพันธุกรรม (genetic correlation = rG) ระหว่างลักษณะ สำหรับการคัดเลือกพันธุ์จะตัดสินจากค่าคะแนนรวม (total score) วิธีคัดเลือกวิธีนี้ค่อนข้างสลับซับซ้อน โดยเฉพาะในการกำหนดน้ำหนัก (W) แต่ละลักษณะ เนื่องจากต้องทราบค่าอัตราพันธุกรรม คุณค่าทางเศรษฐกิจของลักษณะ รวมทั้งค่าสหสัมพันธ์ทางพันธุกรรมระหว่างลักษณะที่คัดเลือก ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้มักจะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ (Falconer and Mackay, 1996) นอกจากนี้การวิเคราะห์ข้อมูลมีอีกหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของนักปรับปรุงพันธุ์พืชที่จะเลือกใช้ เช่น การวิเคราะห์จัดกลุ่ม (cluster analysis) เป็นวิธีการที่พัฒนาตามแนวคิดที่ว่าสิ่งเหมือนกันควรอยู่กลุ่มเดียวกัน แต่ทุกสิ่งทุกอย่างอาจจะไม่เหมือนกันทุกประการ ดังนั้นความเหมือนกันจึงเป็นความเหมือนกันโดยสัมพัทธ์ วิธีการวิเคราะห์มี 2 แบบ คือ 1) วิธีการโดยใช้ค่าเฉลี่ย (K-mean) และ 2) วิธีการจัดกลุ่มเชิงชั้น (hierarchical) มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ 1) การจัดกลุ่มหน่วยวิเคราะห์ และ 2) การจัดกลุ่มตัวแปร โดยขั้นตอนการวิเคราะห์นั้นต้องเลือกเทคนิควิธีและการสร้างกลุ่มแตกต่างไปตามข้อมูลที่มีและวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ (สุชาติ, 2545)