

ตรวจเอกสาร

1. ข้าวเหนียวก่ำพันธุ์พื้นเมืองและลักษณะเฉพาะ

ข้าวก่ำ เป็นการเรียกตามลักษณะสีของเมล็ดข้าวที่มีสีม่วงดำหรือแดงดำตามภาษาพื้นเมืองทางภาคเหนือ นิยมปลูกมากภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย นอกจากนี้ยังปลูกมีการปลูกทั่วไปในประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว สาธารณรัฐเวียดนาม อินเดีย ญี่ปุ่น และสาธารณรัฐประชาชนจีน มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากข้าวทั่วไปที่เห็นได้ อย่างชัดเจนคือการปรากฏของสีม่วงบนส่วนต่างๆ ของต้น เช่น กาบใบ แผ่นใบ กลีบดอก เปลือกเมล็ด และเยื่อหุ้มเมล็ดเป็นต้น ปริมาณของสีจะเข้มข้นแตกต่างกันไปเป็นลักษณะประจำพันธุ์ ในข้าวเหนียวก่ำไร่จะมีสีม่วงเฉพาะเยื่อหุ้มเมล็ดเท่านั้น แต่ในขณะที่ข้าวเหนียวก่ำนาจะมีสีม่วงปรากฏในส่วนอื่นด้วย (คำเนินและสันสนีย์, 2543) อย่างไรก็ตามข้าวก่ำจะต้องมีลักษณะเฉพาะคือ มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีม่วง (ธิดารักษ์ และคำเนิน, 2553) นอกจากนี้อาจแบ่งลักษณะประจำพันธุ์ตามสีเยื่อหุ้มเมล็ดโดยเฉพาะข้าวเหนียวก่ำนาจะเรียกตามท้องถิ่น คือ ข้าวก่ำล้วน เมล็ดข้าวมีสีม่วงทั้งเมล็ด กับข้าวก่ำผ่า เมล็ดมีสีม่วงบางส่วน (จารุณี, 2545)

ข้าวก่ำพันธุ์พื้นเมืองมีลักษณะเป็นข้าวพันธุ์ไวแสง (photoperiod sensitivity) และเป็นข้าวเหนียว (glutinous rice) มีปลูกได้เฉพาะนาปี มีทั้งชนิดที่เป็นข้าวไร่และข้าวสวน มีความสามารถในการทนแล้ง และการฟื้นตัวจากแล้งได้ดี ด้านทานต่อเพลี้ยจักจั่นสีเขียว (วิไลลักษณ์, 2541)

คุณค่าทางอาหารของข้าวเหนียวก่ำ ประกอบด้วย ปริมาณโปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัส โปตัสเซียม และแคลเซียม ทั้งในส่วนของเปลือกและข้าวกล้อง พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วกลุ่มข้าวเหนียวก่ำมีปริมาณธาตุอาหารทั้ง 5 ชนิดในข้าวกล้องสูงกว่ากลุ่มข้าวขาว ซึ่งข้าวเหนียวก่ำมีโปรตีนโดยรวมสูงกว่าข้าวขาว (คำเนิน และสันสนีย์, 2543) นอกจากนี้ยังรงควัตถุสีม่วงของแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ที่พบในข้าวก่ำ และสารในกลุ่มฟีนอลิกอื่นๆ เช่น วิตามินอี (vitamin E), สารอาหารกาบา (GABA) และแกมมา-โอไรซานอล (gamma oryzanol) ที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) (Goffman and Berman, 2003; Han *et al.*, 2004; Karladee and Suriyong, 2011; Karladee *et al.*, 2013)

และจากการวิเคราะห์ข้าวเหนียวเก่าพื้นเมืองของไทยที่เก็บรวบรวมไว้ในหน่วยวิจัยข้าวเก่าสาขาวิชาพืชไร่ ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พบว่ามีปริมาณของ C3G สูงถึง 265.01 มิลลิกรัม/100 กรัมเมล็ด (จักรกฤษณ์, 2550) มี gamma oryzanol สูงสูงกว่าที่พบในข้าวขาว และมี vitamin E (Tocopherol) สูงด้วย (Karladee *et al.*, 2013)

2. ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสิ่งแวดล้อมกับการทดสอบพันธุ์และการรับรองพันธุ์

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสิ่งแวดล้อม

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรม กับสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในช่วงการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชจะถูกกระทบกระเทือนจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสภาพดินฟ้าอากาศความอุดมสมบูรณ์ของดิน ฤดูกาลและพื้นที่ปลูก ดังนั้น genotype หรือ variety ที่คัดเลือกในสิ่งแวดล้อมหนึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับอีกสิ่งแวดล้อมหนึ่งได้ (Allard and Bradshaw, 1964)

การคัดเลือกสายพันธุ์

การคัดเลือกสายพันธุ์ในรุ่นใดหลังจากการผสมพันธุ์ยังไม่มีข้อสรุปที่แน่นอน มีความคิดเห็นที่แตกต่างกันมากมาย ข้อสรุปที่แตกต่างกันนั้นอาจเนื่องมาจาก ความแตกต่างของพืช สายพันธุ์ที่ใช้ในการผสมพันธุ์ วิธีการทดลอง ความแม่นยำของข้อมูล (กฤษฎา, 2551) แต่จากผลงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่าการประเมินคุณค่าของสายพันธุ์ในช่วงแรกๆ ของพืชที่ผสมตัวเอง โดยวิธีคัดเลือกแบบบันทึกประวัติ สามารถทำได้ตั้งแต่ชั่ว F_2 หรือ F_3 ซึ่งค่อนข้างมีประสิทธิภาพ (Steven *et al.*, 2002) การคัดเลือกแบบบันทึกประวัติ (pedigree method) เป็นวิธีที่ใช้ทั่วไปในพืชที่มีการผสมตัวเอง เช่น ข้าว ถั่วเหลือง ในชั่ว F_2 ประชากรพืชจะมีการกระจายตัวมาก แต่ละต้นจะมีความแตกต่างกัน ในชั่ว F_3 และ F_4 ยีนในหลายๆ ตำแหน่งจะเริ่มเป็น homozygous และลักษณะประจำ family จะเริ่มปรากฏ ภายใน family เดียวกันจะมีความเหมือนกัน หลังจากนั้นการคัดเลือกในชั่ว F_3 - F_6 จะทำการประเมินระหว่าง family และภายใน family เดียวกัน โดยคัดเลือก family ที่ดีที่สุด และจะเริ่มคัดเลือกแบบมีซ้ำในชั่ว F_4 (Allard and Bradshaw, 1964; Poelhman and Sleper, 1995) การคัดเลือกแบบบันทึกประวัติจะมีประสิทธิภาพถ้าลักษณะที่คัดเลือกสามารถแยกออกจากกันได้ง่ายตามปกติพืชที่มีการผสมตัวเองค่า heterozygosity จะลดลงครึ่งหนึ่งทุกครั้งที่มีการผสมตัวเอง หลังจากที่ได้ผสมตัวเองไปหลายๆ ชั่วค่า heterozygosity ในประชากรจะเหลือน้อยมาก ดังนั้นในชั่ว F_5 หรือ F_6 สามารถประมาณได้ว่าทุกตำแหน่งของยีนเป็น homozygous (Allard and Bradshaw, 1964) ซึ่ง Jennings *et al.* (1979) กล่าวว่าประชากรใน F_2 เป็นช่วงวิกฤตที่สุดจะเป็นตัวกำหนดว่าลักษณะที่กำลังศึกษาอยู่จะประสบผลสำเร็จหรือไม่ความสำเร็จในการคัดเลือกในชั่ว F_2 ขึ้นอยู่กับขนาดประชากรที่ปลูกต้องมีขนาดใหญ่เพื่อให้พบลักษณะ หรือต้นที่ต้องการระยะปลูกที่เหมาะสม มีการ

คัดเลือกอย่างเข้มงวด และคัดสิ่งที่ไม่ดีทิ้งไป รวมทั้งสามารถแยกความแตกต่างระหว่างผลที่เกิดจากการแข่งขันและลักษณะพื้นฐานวิทยาที่ไม่ต้องการออกไป สาเหตุที่ทำให้ประชากรในชั่ว F_2 เป็นช่วงวิกฤตเพราะลักษณะหลายๆ ลักษณะจะคงตัวทางพันธุกรรมในชั่วต้นๆ แต่ในบางครั้งการคัดเลือกพร้อมกันหลายๆ ลักษณะในช่วงแรกประชากรจะยังคงมีการกระจายตัวการคัดเลือกอาจทำได้ไม่ดี ดังนั้นจึงอาจเปลี่ยนไปคัดเลือกในชั่ว F_3 หรือในชั่วหลังๆ แทนการคัดเลือกในชั่ว F_2 จะเป็นการคัดเลือกที่ใช้ศิลปะมากกว่าวิทยาศาสตร์ ประชากรพืชในชั่ว F_2 และ F_3 จะยังไม่คงตัวทางพันธุกรรม การคัดเลือกในชั่วดังกล่าวจะใช้ทำนายลักษณะเมื่อพืชมีความคงตัวทางพันธุกรรมในชั่วหลังๆ และเพื่อลดจำนวนพืชที่ไม่ต้องการออกไป Hali and Necmi (2005) คัดเลือกผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของข้าวใน early generation รวมทั้งศึกษาค่า heritability ของลักษณะต่างๆ ในข้าว โดยทำการศึกษาในชั่ว F_3 , F_4 และ F_5 พบว่าการคัดเลือกลำต้นเมล็ด และจำนวนเมล็ด/รวง มีประสิทธิภาพในการคัดเลือกในชั่วแรกๆ ทั้งสองลักษณะมีค่า heritability สูง ดังนั้น การคัดเลือกเพื่อลักษณะต่างๆ ในชั่วแรกๆ ค่า heritability จะเป็นตัวกำหนดการตอบสนองต่อการคัดเลือกสายพันธุ์ Simmonds (1979) กล่าวว่า การคัดเลือกในช่วงระยะ Early generation จาก Pedigree method จะมีประสิทธิภาพเฉพาะลักษณะที่มีค่า heritability สูง เท่านั้น เช่น ขนาดเมล็ด เช่นเดียวกับ Kato (1990) พบว่าการคัดเลือกขนาดเมล็ดข้าวสามารถคัดเลือกได้ในชั่วต้นๆ หลังจากการผสมพันธุ์พืชเสร็จ การคัดเลือกเพื่อผลผลิตที่สูงสามารถคัดเลือกได้ตั้งแต่ในชั่ว F_2 และในประชากรที่ยังมีการกระจายตัว Swati and Ramesh (2004) พบว่า grain yield มีค่า heritability สูง ในขณะที่ใบธงและความสูงต้นข้าวมีค่า Heritability ปานกลาง Hosseini *et al.* (2005) พบว่าค่า Heritability ของ grain yield ในข้าวมีค่าสูง เท่ากับ 61% (broad sense heritability) ในขณะที่วันออกดอกและความสูงจะมีค่า heritability ปานกลาง Jennings *et al.* (1979) ลักษณะ grain length และ shape เป็นลักษณะเชิงปริมาณ ลูก F_1 ที่ได้จะมีลักษณะกึ่งกลางระหว่างพ่อและแม่ และจะมีการกระจายตัวเป็น longer และ shorter ในชั่ว F_2 ลักษณะ grain size เป็นลักษณะที่สามารถถ่ายทอดทางพันธุกรรมได้สูงในสภาวะแวดล้อมทั่วไป และลักษณะดังกล่าวจะคงตัวทางพันธุกรรมอย่างรวดเร็วในชั่วที่ยังมีการกระจายตัวทางพันธุกรรม ถ้าลักษณะที่ต้องการคัดเลือกไม่พบในชั่ว F_2 การคัดเลือกต่อไปใน F_3 จะไม่มีนัยสำคัญ แต่ถ้าลักษณะที่ต้องการปรากฏในชั่ว F_2 แล้วมีการกระจายตัวมาก การคัดเลือกอย่างเข้มงวดมีความจำเป็นอย่างมากในชั่วดังกล่าว ส่วนการทดสอบผลผลิตสามารถเริ่มทำได้ตั้งแต่ในชั่ว F_3 หรือ F_4 ซึ่งยังคงมีการกระจายตัวทางพันธุกรรม หรือจะทำให้ในชั่ว F_5 หรือ F_6 แม้ในชั่ว F_6 - F_7 จะยังมีการกระจายตัวอยู่บ้างเล็กน้อยในบางลักษณะได้แก่ ลักษณะของหางเมล็ด pigmentation maturity และลักษณะของ endosperm (เอนโดสเปิร์ม) He *et al.* (2006) ศึกษาค่า heredity ของลักษณะ harvest index (HI) ในข้าวและความสัมพันธ์ระหว่าง HI กับ ลักษณะทางการเกษตรที่สำคัญพบ

ความสัมพันธ์ทางบวกกับอัตราการสะสมน้ำหนักของเมล็ด และมีความสัมพันธ์ทางลบกับ น้ำหนัก 1,000 เมล็ด ความยาวรวง การปรับปรุงลักษณะ HI จะมีประสิทธิภาพ โดยการคัดเลือกความยาวรวง และน้ำหนัก 1,000 เมล็ด ซึ่งทั้งสองลักษณะมีค่า heritability สูงสามารถคัดเลือกได้ตั้งแต่ ในช่วง early generation Shi (1997) พบว่าปริมาณ อะไมโลสเป็นลักษณะที่มีค่า heritability สูง สามารถคัดเลือกลักษณะดังกล่าวได้ตั้งแต่ F_2 หรือ F_3 Khush *et al.* (1979) กล่าวว่า การคัดเลือกลักษณะ ปริมาณอะไมโลสสามารถคัดเลือกได้ตั้งแต่ F_4 เป็นต้นไป

การทดสอบพันธุ์และการรับรองพันธุ์

การทดสอบพันธุ์เพื่อกำหนดเป็นพันธุ์รับรองนั้น จำเป็นต้องทดสอบในหลายพื้นที่ หรือ หลายสิ่งแวดล้อมและในหลายๆ ฤดูปลูกซึ่งปฏิกิริยาที่แต่ละสายพันธุ์ มีต่อแต่ละสิ่งแวดล้อมย่อมมีความแตกต่างกันไป บางสายพันธุ์อาจแสดงความสามารถได้ดีเฉพาะสิ่งแวดล้อมอันใดอันหนึ่ง แต่ บางสายพันธุ์อาจแสดงความสามารถได้ดีในหลายๆ สิ่งแวดล้อม ซึ่งสายพันธุ์ที่มีความสามารถสูงๆ ปรับตัวได้กว้างในหลายๆ สิ่งแวดล้อม นี้จะเรียกว่าสายพันธุ์ที่มีลักษณะเป็น (general adaptation) ส่วนสายพันธุ์ที่แสดงความสามารถให้ผลผลิตสูงเฉพาะสิ่งแวดล้อมเฉพาะ จะเรียกลักษณะสายพันธุ์ นั้นว่าเป็น (specific adaptation) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนักปรับปรุงพันธุ์จะต้องการพันธุ์ซึ่งมีลักษณะ ความสามารถ ในการปรับตัวได้กว้าง สำหรับปลูกได้ในหลายๆ พื้นที่และหลายฤดูปลูก

3. สารอาหารสำคัญในข้าว

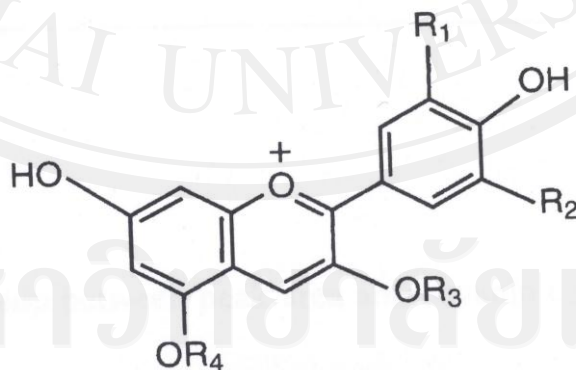
แอนโทไซยานิน

แอนโทไซยานินมาจากภาษากรีก 2 คำ คือ *anthos*: flower และ *kyanos* :blue แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่มีสีแดงไปจนถึงสีม่วงหรือน้ำเงินที่อยู่ในกลุ่มของรงควัตถุที่มีชื่อว่า ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) ซึ่งจัดเป็น second metabolite มักพบแอนโทไซยานินอยู่ในแวคิวโอของเซลล์ที่อยู่ในเนื้อเยื่อชั้น sub-epidermis แอนโทไซยานินสามารถละลายได้ดีในตัวอย่างที่ไม่มีไขมัน แอลกอฮอล์และละลายในน้ำได้ (Moskowitz and Hradina, 1981; Abdel-Aal *et al.*, 2006) แอนโทไซยานินที่สกัดได้ครั้งแรกได้มาจากดอกกุหลาบเมื่อปี ค.ศ. 1913 คือ cyanidin-3,5-diglucoside ปัจจุบันพบว่ามีแอนโทไซยานินมากกว่า 120 ชนิด สำหรับแอนโทไซยานินในข้าวเริ่มมีการศึกษา ในปี ค.ศ. 1940-1950s โดยแอนโทไซยานินในข้าว มีอยู่ 4 ระดับ คือ 1. colorless 2. rose red 3. pansy purple และ 4. blackish red purple (Nagao and Takahashi, 1963) โดยสีที่เกิดจากแอนโทไซยานิน นั้นจะปรากฏในเกือบทุกส่วนของพืช พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้ว สีที่ปรากฏขึ้นบนส่วนต่างๆ ของข้าวเหนียวดำ เกิดจากรงควัตถุแอนโทไซยานินและรงควัตถุที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งแอนโทไซยานินในข้าว นั้น มีสารประกอบให้สีคือ แอนโทไซยานิน โดยมีไซยานิดิน (cyanidin) ประมาณ 0-

470 มิลลิกรัม/100 กรัมเมล็ด และ พีโอนิดิน (peonidin) ประมาณ 0-40 มิลลิกรัม/100 กรัมเมล็ด เป็นองค์ประกอบหลัก เรียกข้าวชนิดนี้ว่า “purple rice” (Hayashi and Abe, 1952) นอกจากนี้ยังมี malvanidin และ pelargonidin ในปริมาณเล็กน้อย โดย 85% ของแอนโทไซยานินที่พบในข้าวสีม่วงดำจะอยู่ในรูป cyanidin-3-glucoside (Mazza and Miniati, 1993; Chung and Woo, 2001) และ peonidin-3-glucoside (Hu *et al.*, 2003; Escribano-Bailon *et al.*, 2004; Oki *et al.*, 2005) ส่วนที่เหลือเป็นแอนโทไซยานิน-อนุพันธ์อื่นๆ เช่น cyanidin-3-rhamnoside cyaniding-3,5-rhamnoglucoside (Mazza and Miniati, 1993) cyanindin-3, 5-diglucosidemalvidin palargonidin-3,5-diglucoside (Zhang *et al.*, 2006) เป็นต้น โดยชนิดและโครงสร้างของแอนโทไซยานินมีดังนี้ (ตาราง 1 และ ภาพ 1)

ตาราง 1 โครงสร้างทางเคมีของไซยานิดิน (cyaniding-3-glucoside) และพีโอนิดิน (peonidin -3- glucoside)

ชนิดของแอนโทไซยานิน	R'1	R'2	R'3	R'4	R'5
Pelargonidin (Pg)	-H	-OH	-H	-OH	-H
Cyanidin (Cy)	-OH	-OH	-OH	-OH	-H
Peonidin (Pn)	-OCH ₃	-OH	-OCH ₃	-OH	-H
Delphinidin (Dp)	-OH	-OH	-OH	-OH	-OH
Petunidin (Pt)	-OH	-OH	-OCH ₃	-OH	-OH
Malvidin (Mv)	-OCH ₃	-OH	-OCH ₃	-OH	-OCH ₃



ภาพ 1 C3G: Cyanidin 3-glucoside, P3G: Peonidin 3-glucoside (Ryu, *et al.*, 1998)

รงควัตถุในกลุ่มแอนโทไซยานิน จะให้สีบนต้นข้าวที่แตกต่างกันออกไปและมีการกระจายรงควัตถุไปตามส่วนต่างๆ ของต้นข้าวในระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันตามสายพันธุ์ ส่วนใหญ่

พบรงควัตถุ และให้สีในทุกส่วนของต้นข้าวที่เป็นลำต้นและใบ (vegetative part) และเกือบทุกส่วนของช่อดอก (floral part) ยกเว้นในส่วนของต้นอ่อน (embryo) หรือ เอนโดสเปิร์ม (endosperm) จะไม่พบการกระจายของรงควัตถุ แต่จะพบการสะสมของรงควัตถุในเมล็ด โดยเฉพาะในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด และระดับความเข้มของสีม่วงก็จะแตกต่างกัน (สุณิสสา, 2542) แอนโทไซยานินจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสีไปตามค่าความเป็นกรด ค่างของสารละลายใน แวคคิวโอลที่เปลี่ยนแปลงไปถ้า pH เท่ากับ 1 จะมีสีแดงส้ม ถ้า pH น้อยกว่า 6 จะไม่มีสี ถ้า pH มากกว่า 6 จะมีสีม่วงหรือน้ำเงิน และถ้า pH เป็นค่ามากเกินไป โครงสร้างของแอนโทไซยานินจะเสียไปนอกจากนี้สีของแอนโทไซยานินยังถูกควบคุมด้วยโครงสร้างของแอนโทไซยานินเองนั่นคือหากในโครงสร้างวงแหวน ฟีนอลมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล หรือหมู่เมธอกซิล (-OCH₃) มากขึ้นจะทำให้แอนโทไซยานินมีสีเข้มขึ้น และสีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินมากขึ้นด้วย การเพิ่มหมู่เมธอกซิล แทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3 และ 5 จะทำให้มีสีแดงเพิ่มขึ้น (Masaru *et al.*, 2000)

พันธุกรรมที่ควบคุมการแสดงออกของแอนโทไซยานิน

Reddy (1996) พบว่ามียีนหลายตัวที่ควบคุมการแสดงออกของแอนโทไซยานินในส่วนต่างๆ ของต้นข้าว สำหรับการศึกษา inheritance ของแอนโทไซยานินในส่วนต่างๆ ของต้นข้าว เริ่มมีการศึกษาในปี ค.ศ.1940-1950s Nagao and Takahashi (1963) และ Ramiah and Rao (1953) สรุปได้ว่าลักษณะพันธุกรรมที่ควบคุมการเกิดสีในต้นข้าว เกิดจากการทำงานร่วมกันของยีน 2 คู่ โดยคู่ที่ 1 เกี่ยวข้องกับการสร้าง chromogen ซึ่งให้ลักษณะเป็น C ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตรงควัตถุและยีนอีกหนึ่งคู่คือ ยีน A (activator) ทำหน้าที่เป็นเปลี่ยน chromogen ไปเป็นรงควัตถุในการเกิดสี หากยีนคู่ใดหายไปจะไม่ทำให้เกิดสีขึ้น โดยยีนต้องอยู่ในสภาพ homozygous นอกจากนี้ยังมียีน P จะเป็นตัวควบคุมการกระจายตัวหรือกำหนดตำแหน่งแอนโทไซยานินในส่วนต่างๆ ของพืชและมี inhibitor gene (I-) เป็นตัวยับยั้งการกระจายตัวของยีน และเมื่อเปรียบเทียบขนาดโครโมโซมของข้าวเหนียวดำและข้าวขาวจะพบว่าข้าวเหนียวดำมีขนาดโครโมโซมใหญ่กว่าข้าวขาว (สุณิสสา, 2542)

ปัจจัยที่มีผลต่อการแสดงของแอนโทไซยานิน

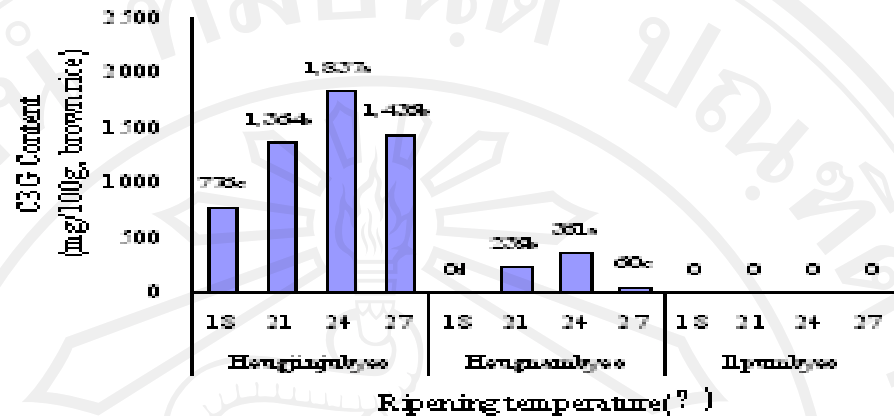
1. ปัจจัยแสง

เป็นปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการสะสมและการสลายตัวของแอนโทไซยานินมากที่สุด ซึ่งแสงมีผลต่อการสร้างหรือการสลายรงควัตถุ ถ้าพืชได้รับแสงมาก จะทำให้การสังเคราะห์รงควัตถุมากขึ้นด้วย เช่น ผลแอปเปิ้ลที่อยู่บริเวณร่มเงาของต้นที่ไม่โดนแสงหรือได้รับแสงน้อย การพัฒนาของสีแดงของเปลือกจะน้อยลงและลดลงกว่าผลที่ได้รับแสงเต็มที่ (Magness, 1928) และการสะสมของแอนโทไซยานินจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความเข้มของแสงมากขึ้น Siegelman and

Hendricks (1958) และ Reddy *et al.* (1994) ได้ศึกษาผลของแสงต่อการสร้างแอนโทไซยานินโดยศึกษาในต้นกล้าของข้าวพันธุ์ purple puttu พบว่าต้นกล้าที่ได้รับแสงต่างกันจะมีการสะสมแอนโทไซยานินที่แตกต่างกัน ส่วนข้าวที่ขึ้นเจริญในที่มืดพบว่าไม่มีการสะสมแอนโทไซยานินและยังพบว่าต้นกล้าที่มีอายุน้อยกว่าจะมีการตอบสนองต่อแสงแฉดมากกว่า โดยแสงจะไปมีผลต่อเอนไซม์ phenylalanine ammonium lyase (PAL) ซึ่งเป็นเอนไซม์ตัวหนึ่งที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน Sarma and Sharma (1999) ทำการทดลองอีกครั้งเพื่อเป็นการยืนยันว่าแสงเป็นตัวชักนำการทำงานของเอนไซม์ PAL ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างแอนโทไซยานินในข้าว

2. ปัจจัยอุณหภูมิ

อุณหภูมิต่ำจะกระตุ้นการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน และอุณหภูมิสูงจะยับยั้งการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน Phoka *et al.* (2005) พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญของการสะสมปริมาณแอนโทไซยานินในเมล็ดข้าวโดยที่ข้าวที่ปลูกในฤดูหนาวหรือปลูกที่อุณหภูมิต่ำนั้นมีปริมาณแอนโทไซยานินสะสมมากกว่าข้าวที่ปลูกในฤดูร้อนและอุณหภูมิสูง Chae *et al.* (2004) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง C3G ในช่วงที่ข้าวกำลังสุกแก่ โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 18, 21, 24 และ 27 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิในช่วงสุกแก่ต่างกันจะทำให้เกิดความแปรปรวนของการสะสมสาร C3G ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ปริมาณสาร C3G ของพันธุ์ Heugjinjubyoe และพันธุ์ Heugnambyoe จะมีปริมาณ C3G มากที่สุดที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณแอนโทไซยานินเท่ากับ 1,837 มิลลิกรัม/100 กรัมเมล็ด ในพันธุ์ Heugjinjubyoe และในพันธุ์ Heugnambyoe จะมีปริมาณ C3G เท่ากับ 361 มิลลิกรัม/100 กรัมเมล็ด ส่วนในพันธุ์ Ilpumbyoe พบว่าไม่มี C3G (ภาพ 2)



ภาพ 2 Anthocyanin pigment Cyanidin-3-glucoside content as affected by ripening temperature in rice varieties. (Chae *et al.*, 2004)

3. ปัจจัยความอุดมสมบูรณ์ของดิน และความชื้นในดิน

ความอุดมสมบูรณ์ของดิน และความชื้นในดิน จะช่วยกระตุ้นการสร้างแอนโทไซยานิน และในสภาพพื้นที่ที่แห้งแล้ง หรือในฤดูที่อากาศแห้งแล้ง มีความชื้นในดินต่ำ พบว่าการสังเคราะห์ แอนโทไซยานินจะลดลง (Saure, 1990) ธาตุไนโตรเจนเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการสร้างแอนโทไซยานิน แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปการสร้างแอนโทไซยานินจะลดลง (Kliewer, 1977) นอกจากนี้ ฟอสฟอรัส แคลเซียม โพแทสเซียมยังมีผลต่อการสร้างแอนโทไซยานินด้วย โดยข้อมูลในส่วนนี้ได้ ทำการศึกษาในผักและผลไม้เป็นส่วนมาก ข้อมูลของข้าวโดยตรงยังไม่มีแน่ชัด

4. ระยะการเจริญเติบโตของพืช

พบว่าปริมาณหรือความเข้มข้นของแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของการเจริญเติบโตของพืช เช่น ในการงอก มักไม่พบแอนโทไซยานิน เนื่องจากในช่วงนี้เกิดขบวนการ hydrolysis ซึ่งแอนโทไซยานิน สามารถละลายได้ดีในน้ำ และในช่วงหลังออกดอกจะพบว่าแอนโทไซยานินจะไปมีการสะสมรวมกันในส่วนของ ใบ เปลือก และเมล็ด มากกว่าส่วนอื่นๆ (สรศักดิ์, 2531) ในอู่การสร้างแอนโทไซยานินจะเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรกของการเจริญ และจะมีปริมาณลดลงเมื่อถึงระยะสุกแก่เต็มที่ (Riberau-Gayon, 1982) Phoka *et al.* (2005) พบว่า หลังจาก ที่ข้าวมีการผสมพันธุ์แล้วระดับแอนโทไซยานินในเมล็ดข้าวจะเพิ่มมากขึ้นๆ จนถึง 10 วัน ก่อนการเก็บเกี่ยวหรือ 20 วัน หลังการ pollination ส่วนในใบข้าวปริมาณแอนโทไซยานินในจะ เพิ่มขึ้นจาก 5-20 มิลลิกรัม/100 กรัมเมล็ด ในช่วงที่กำลังสุกแก่ และในช่วง senescence จะพบ

highly significant negative correlation ระหว่าง คลอโรฟิลล์และปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (Mazza and Miniati, 1993)

5. ค่า pH

แอนโทไซยานินมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสีไปตามค่าความเป็นกรดต่างของ สารละลายใน แวคคิวโอที่เปลี่ยนแปลงไปถ้า pH เท่ากับ 1 จะมีสีแดงส้ม ถ้า pH น้อยกว่า 6 จะไม่มีสี ถ้า pH มากกว่า 6 จะมีสีม่วงหรือน้ำเงิน และถ้า pH เป็นค่ามากเกินไปโครงสร้างของแอนโทไซยานินจะเสียไป Fossen *et al.* (1998) ได้สกัดแอนโทไซยานิน C3G ในข้าวแล้วนำไปเก็บรักษาที่ อุณหภูมิ 10 และ 23 องศาเซลเซียส มีค่า pH อยู่ในช่วงต่างๆ ตั้งแต่ 1-9 และ 1-12 (Cabrita *et al.*, 2000) จากทั้งสองการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ถ้าค่า pH ต่ำๆ สาร C3G จะมีความคงตัวของสีสูงอยู่ 70 % หลังจากเก็บรักษาได้ 60 วัน และถ้าค่า pH มากกว่า 3 เป็นต้นไป จะทำให้ความคงตัวของสีลดลงเรื่อยๆ ที่ค่า pH ระหว่าง 5-6 ความคงตัวจะลดลงอย่างรวดเร็วหลังจาก เก็บได้ เพียง 8 วัน และลดลงมากที่สุด pH เท่ากับ 7.0 (ใช้เวลาในการสลายตัวจนหมด 2 วัน) หลังจากนั้นความคงตัวจะค่อยเพิ่มมากขึ้นอีกครั้งหนึ่งจนกระทั่ง pH เท่ากับ 8.6 และที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ได้ทำการศึกษาเช่นเดียวกันกับที่ 10 องศาเซลเซียส พบว่าความคงตัวของแอนโทไซยานินจะสูงกว่าที่ 10 องศาเซลเซียส

4. ปริมาณอะไมโลส

คุณภาพของเมล็ดแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ คุณภาพเมล็ดทางกายภาพ และคุณภาพ เมล็ดทางเคมี คุณภาพทางกายภาพเป็นลักษณะที่เกี่ยวข้องกับความยาว ความกว้าง และความหนา ของเมล็ด คุณภาพทางเคมีเป็นลักษณะที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีที่รวมกันเป็นเมล็ดแป้ง ซึ่งคุณลักษณะของอะไมโลสในเมล็ดแป้ง จะมีผลต่อคุณสมบัติการหุงต้มและรับประทานของข้าว

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์สายยาวของน้ำตาลกลูโคส ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาล กลูโคสหรือหน่วย α -D-กลูโคราโนซิด ประมาณ 250-2,000 หน่วยเรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง α -D (1-4) โมเลกุลของอะไมโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสสายยาวที่มีขนาดใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^6 ดาลตัน อะไมโลสไม่ละลายน้ำ แต่เมื่อเติมน้ำลงไปอะไมโลสจะเกาะตัวกันเป็นตะกอนที่ไม่ละลาย และเนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลสเป็นสายยาวจึงมี โอกาสที่จะจับคู่กับ อะไมโลส อีกโมเลกุลหนึ่ง เป็นสายยาวคู่ขนานเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน กลายเป็นตาข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงและตกตะกอนได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า รีโทรเกรเดชัน และตะกอนที่ได้เรียกว่า retrograded starch อะไมโลส สามารถจับกับไอโอดีน โดยจะพันเป็นเกลียว (helical structure) รอบๆ ไอโอดีน ได้เป็น

สารประกอบเชิงซ้อน amylose-iodine complex มีสีน้ำเงิน สีที่เกิดขึ้นจะผันแปรตามความยาวของสายอะไมโลสและจำนวนเกลียว (helix turn) ของสายอะไมโลส (อรอนงค์, 2547; นิธิยา, 2549)

อะไมโลเพกติน

อะไมโลเพกตินเป็นโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเมล็ดแป้ง ประมาณ 70-100 เปอร์เซ็นต์ มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีสายแขนงแยกออกมา ซึ่งแต่ละแขนงจะมีน้ำตาลกลูโคสประมาณ 20-35 หน่วย ดังนั้นในโมเลกุลของอะไมโลเพกตินจึงมีทั้งพันธะ α 1-4 และ α 1-6 โดยจุดแยกของสายแขนงมีประมาณ 4-5 เปอร์เซ็นต์ของพันธะทั้งหมด โดยปกติอะไมโลเพกติน มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าอะไมโลสมาก มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^6 - 5×10^8 คาลตัน และทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีแดง (อรอนงค์, 2547; นิธิยา, 2549)

การพัฒนาของแป้งในเมล็ดข้าว

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชซึ่งพบทั้งในใบ ลำต้น ราก ผล และเมล็ด การเกิดแป้งในเมล็ดข้าวเอนโดสเปิร์มจะเริ่มมีการพัฒนาพร้อมกับการเกิดของต้นอ่อน จะเริ่มสร้างหลังจากที่ดอกบานได้ 5-15 วัน เกิดจากขบวนการ double fertilization คือ สเปิร์ม (n) ปฏิสนธิกับโพลาร์นิวคลีไอ (2n) เกิดเป็นเอนโดสเปิร์ม มีโครโมโซมเป็น 3n ลักษณะแป้งในเมล็ดเกิดจากความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกติน (อรอนงค์, 2547; นิธิยา, 2549)

การจำแนกข้าวตามลักษณะแป้งในเมล็ด

1. ข้าวเหนียว (glutinous rice หรือ waxy rice) เมล็ดข้าวสารจะมีสีขาวขุ่น เมื่อนึ่งแล้วจะได้ข้าวสุกที่จับตัวติดกันเหนียวแน่นและมีลักษณะใส ข้าวเหนียวประกอบด้วยแป้งชนิดอะไมโลเพกตินเป็นส่วนใหญ่ มีแป้งอะไมโลสอยู่เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย
2. ข้าวเจ้า (non-glutinous rice) เมล็ดข้าวสารจะมีสีขาวใส เมื่อนึ่งหรือหุงจะมีสีขาวขุ่นและร่วนกว่าข้าวเหนียว ข้าวแต่ละพันธุ์มีความนุ่มเหนียวต่างกัน ข้าวเจ้ามีแป้งอะไมโลสประมาณ 7-33% และที่เหลือเป็นอะไมโลเพกติน ศึกษาและจำแนกปริมาณอะไมโลส รวมทั้งการนำไปใช้ดังนี้ (ไชรัตน์และคณะ, 2543)

ปริมาณอะไมโลส (%)	นำไปใช้ประโยชน์
2%	แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์รสหวานและน้ำสลัด
12-19%	ทำอาหารเด็ก อาหารเช้า ขนมปัง
20-25%	ทำขนมเค้ก ชูปกระป๋อง
มากกว่า 25%	ทำก๋วยเตี๋ยว ผลิตภัณฑ์เส้นต่างๆ

ข้าวเจ้าของไทยสามารถแบ่งตามคุณสมบัติข้าวสุก ได้เป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มข้าวนุ่มเหนียว (อะไมโลสต่ำ) กลุ่มข้าวตาแห้ง (อะไมโลสปานกลาง) และกลุ่มข้าวเสาไห้ (อะไมโลสสูง) ข้าวเจ้าส่วนใหญ่จะมาจากประเทศไทย เวียดนาม พม่าและอินเดีย ส่วนข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำส่วนมากจะเป็นชนิดจาโปนิกาขึ้นอยู่ในเขตร้อนชื้น และข้าวที่มากจากประเทศฟิลิปปินส์ มาเลเซีย และอินโดนีเซีย มักเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลส ปานกลาง (ตาราง 2)

ตาราง 2 คุณภาพข้าวหุงสุกแบ่งตามปริมาณอะไมโลส

ปริมาณอะไมโลส (%)		ชนิดข้าว	ข้าวสุก
Juliano (1993)	งามชื่น (2547)		
0-5	0-3	ข้าวเหนียว	เหนียวมาก
5.1-12.0	4-11	ข้าวเจ้าอะไมโลสต่ำมาก	เหนียว
12.1-20.0	12-19	ข้าวเจ้าอะไมโลสต่ำ	นุ่ม-เหนียว/หุงและง่าย
20.1-25.0	20-25	ข้าวเจ้าอะไมโลสปานกลาง	ค่อนข้างนุ่ม-ร่วน
>25.0	26-34	ข้าวเจ้าอะไมโลสสูง	ร่วน-แข็ง/หุงขึ้นหม้อ

ที่มา : นิธิยา (2549)