บทที่ 2
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ความรู้เรื่องข้าว

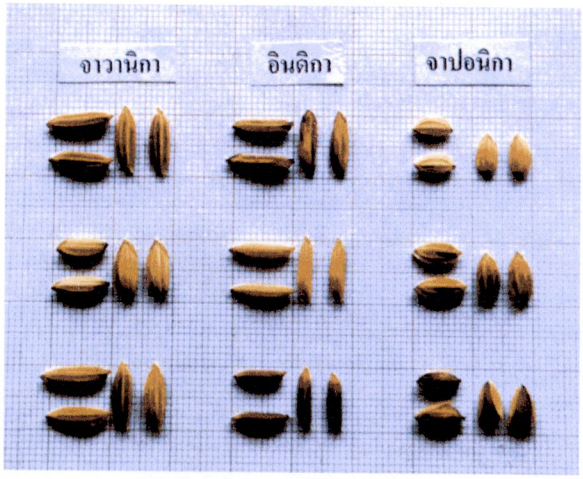
ข้าวเป็นอาหารสำคัญของประชากรโลก นอกจากเป็นแหล่งของพลังงานจากคาร์โบไฮเดรตแล้วข้าวยังประกอบด้วยโปรตีน วิตามิน และแร่ธาตุสำคัญหลายชนิด ซึ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตและการเจริญพันธุ์ของมนุษย์ ประชากรโลกประมาณ 3,000 ล้านคนหรือมากกว่าครึ่งหนึ่งของประชากรโลก ซึ่งส่วนมากอาศัยอยู่ในทวีปเอเชียบริโภคข้าวเป็นอาหารประจำวัน องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO = Food and Agriculture Organization) ได้ประมาณการว่าในปี พ.ศ. 2553 ประชากรโลกจะเพิ่มขึ้นเป็น 7,000 ล้านคน ประชากรที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่อาศัยอยู่ในทวีปเอเชีย โดยเฉพาะอยู่ในประเทศด้อยพัฒนาและกำลังพัฒนา ซึ่งจะทำให้มีผู้บริโภคข้าวเพิ่มขึ้นเป็น 3,600 ล้านคน และหากอัตราการเพิ่มของประชากรโลกยังคงเป็นเช่นนี้ต่อไป คาดการณ์ว่าในปี พ.ศ. 2568 จะมีผู้บริโภคข้าวเพิ่มขึ้นจากปัจจุบันอีกประมาณ 1,400 ล้านคน (วิไลลักษณ์ สมสุติ 2544) ดังนั้นงานด้านการวิจัยทางการปรับปรุงพันธุ์ข้าวเศรษฐกิจและพันธุ์ข้าวพื้นเมือง การเพิ่มผลผลิตและการศึกษาคุณภาพของข้าวพันธุ์ต่างๆจึงได้รับความสนใจมากขึ้น

ข้าวเป็นพืชตระกูลหญ้า (gramineae) ในสกุล (genus) Oryza และในชนิด (species) sativa ซึ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L. แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มคือ 1) indica (indica type) มีเมล็ดยาว หรือเมล็ดยาวปานกลาง ปลูกในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย เวียดนาม พม่า อินเดีย และมาเลเซีย 2) japonica (japonica type) มีเมล็ดป้อม ซึ่งปลูกในเขตอบอุ่น เช่น ญี่ปุ่น เกาหลี และประเทศจีนตอนเหนือ และ3) javanica (javanica type) ซึ่งมีส่วนน้อย เป็นกลุ่มที่อยู่ระหว่าง indica กับ japonica ปลูกในประเทศอินโดนีเซีย (วิไลลักษณ์ สมสุติ 2544) ลักษณะความแตกต่างของข้าวในแต่ละกลุ่มดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะความแตกต่างระหว่าง *indica*, *japonica* และ *javanica* subspecies

ลักษณะ	*indica*	*japonica*	*javanica*
รูปร่างและสีใบ	กว้าง สีเขียวอ่อน	แคบ สีเขียวแก่	กว้าง แข็ง สีเขียวอ่อน
เมล็ด	ยาว ค่อนข้าวแบน	สั้น กลม	กว้าง หนา
การแตกกอ	แตกกอมาก	แตกกอปานกลาง	แตกกอน้อย
ลำต้น	สูง อ่อน	เตี้ย แข็ง	สูง แข็ง
หางของเมล็ด	สั้นมาก	สั้นมาก-ยาว	สั้นมาก-ยาว
ขนของข้าวเปลือก	สั้น	ขนมากและยาว	ขนยาว
การร่วงของเมล็ด	เมล็ดร่วงง่าย	เมล็ดร่วงยาก	เมล็ดร่วงยาก
ร้อยละของแอมิโลส	23-31	20-25	10-24

ที่มา: ชาญ มงคล (2536)



ภาพที่ 1 ลักษณะเปรียบเทียบรูปร่างของข้าวพันธุ์จาวานิกา อินดิกา จาปอนิกา
ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

1.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 2 คือ (ชาญ มงคล 2536)

1.1.1 เปลือกนอก (hull, husk) คือส่วนที่เรียกว่าแกลบ แกลบคือใบประดับ (bract) ที่เปลี่ยนรูปมา แกลบมี 2 แผ่น แผ่นหนึ่งใหญ่และอีกแผ่นหนึ่งเล็ก เซลล์แกลบส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารซิลิกา

1.1.2 เปลือกเมล็ด (caryopsis) เป็นส่วนที่ห่อหุ้ม endosperm แต่อยู่ภายในแกลบ ประกอบด้วย เนื้อเยื่อ 3 ส่วนด้วยกัน คือ เพอริคาร์พ (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) และชั้นของนูเซลลัส (nucellus) เมื่อแกะ

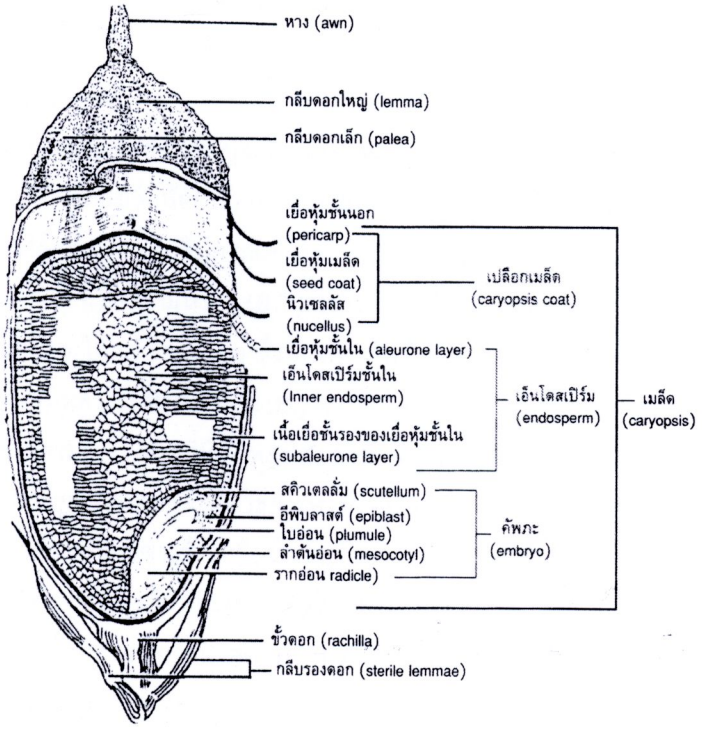
เปลือกนอกของเมล็ดออก จะได้เมล็ดข้าวที่เรียกว่า “ข้าวกล้อง” ซึ่งมีสีต่างๆ กันตั้งแต่ขาว น้ำตาลอ่อน แดง ม่วง จนถึงดำ สีเหล่านั้นคือสีของเนื้อเยื่อชั้นเพอริคาร์พ

1.1.3 แป้ง (endosperm) ส่วนที่เป็นแป้งแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1.1.3.1 ชั้นอะลูโลน (aleurone layer) เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอกสุดของส่วนที่เป็นแป้ง จำนวนชั้นของเนื้อเยื่ออะลูโลนขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวและสิ่งแวดล้อมอาจมีถึง 3 ชั้น ชั้นของอะลูโลนมีธาตุฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และโปแตสเซียมอยู่มาก

1.1.3.2 ส่วนที่เป็นเนื้อแป้ง (starch endosperm) เป็นส่วนที่เป็นแป้งที่เราบริโภคเป็นอาหารเนื้อแป้งนี้ประกอบด้วยเซลล์เม็ดแป้งและโปรตีน โปรตีนในเมล็ดข้าวจะอยู่รอบนอกใกล้ๆ กับชั้นในของชั้นอะลูโลน ส่วนเซลล์เม็ดแป้ง จะอยู่เข้าไปภายใน ฉะนั้น ในการสีข้าวจะขัดเอาชั้นอะลูโลนออกไปมาก ซึ่งทำให้สีน้ำตาลหรือสีแดงของข้าวกล้องถูกขัดออกไปหมด ทำให้แร่ธาตุดังกล่าวข้างต้นและโปรตีนถูกขัดออกไปด้วย โดยทั่วไปข้าวกล้องมีโปรตีนประมาณร้อยละ 8 เมื่อขัดเป็นข้าวสารแล้วจะมีโปรตีนเหลืออยู่เพียงร้อยละ 6-7

1.1.4 คัพภะ (embryo) คือ ส่วนที่เรียกว่าจมูกข้าว เป็นตำแหน่งรวมของส่วนที่จะงอกเป็นต้นข้าวต้นใหม่ คัพภะประกอบด้วยส่วนที่งอกเป็นยอดอ่อน (plumule) ส่วนที่จะงอกเป็นรากแรกกำเนิด (radicle) ทั้งสองส่วนนี้ยึดติดกันด้วยปล้องที่สั้นมาก เรียกว่า “มีโซคอททิล” (mesocotyl) ยอดอ่อนจะห่อหุ้มด้วยลักษณะที่คล้ายใบ เรียกว่า เยื่อหุ้มยอดอ่อน (coleoptile) ส่วนของคัพภะทั้งหมดจะอยู่ในชั้นเนื้อเยื่ออะลูโลน



ภาพที่ 2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา: บุญหงส์ จงคิด (2547)

1.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว (บุญหงส์ จงคิด 2547)

คุณค่าทางอาหารของข้าวนอกจากจะให้คาร์โบไฮเดรตในปริมาณร้อยละ 70 ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญแล้ว เมล็ดข้าวยังประกอบด้วยอาหารหมู่อื่นๆ ได้แก่

1.2.1 โปรตีน (protein) จะมีอยู่หนาแน่นที่บริเวณผิวนอกของเมล็ดข้าวกล้อง (brown rice) และบริเวณคัพภะ (embryo) มากกว่าที่ส่วนอื่นๆ ของเมล็ด อย่างไรก็ตามปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวจะมีมากหรือน้อยย่อมขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวและสภาพแวดล้อมที่ปลูกข้าว เช่น สภาพของดิน ลมฟ้าอากาศ และการให้ปุ๋ย เป็นต้น โดยปกติข้าวกล้องจะมีปริมาณโปรตีนตั้งแต่ร้อยละ 4.3–18.2 หรือประมาณร้อยละ 9.5 โดยเฉลี่ย สำหรับข้าวจาปอนิกานั้นจะมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยร้อยละ 11.1 ในขณะที่อินดิกามีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยร้อยละ 9.8 และจากการวิเคราะห์พบว่าข้าวไทยจะมีโปรตีนเฉลี่ยร้อยละ 7.48±1.65 โดยข้าวสารไทยจะมีโปรตีนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 6.5

1.2.2 ไขมัน (fat) พบเฉพาะที่ชั้นในสุดของเยื่อหุ้มเมล็ด (aleurone layer) และที่ส่วนของคัพภะ ดังนั้นในการขัดสีข้าวกล้องให้เป็นข้าวสารขาว (milled rice) จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียไขมันไปอยู่ในรูปของรำข้าวเป็นปริมาณมากกว่าร้อยละ 80

1.2.3 แร่ธาตุ (minerals) ส่วนใหญ่จะพบอยู่ที่บริเวณผิวนอกของเมล็ด ปริมาณมากน้อยของแร่ธาตุในเมล็ดข้าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแร่ธาตุที่ได้จากปุ๋ย และยังขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวอีกด้วย กลุ่มแร่ธาตุที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวค่อนข้างมากได้แก่ ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และโพแทสเซียม สำหรับธาตุฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวนั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบที่ร่างกายใช้ประโยชน์ได้ยาก นอกจากแร่ธาตุกลุ่มดังกล่าวแล้วยังมีแร่ธาตุอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งมีอยู่ในเมล็ดข้าวในปริมาณเพียงเล็กน้อย ได้แก่ แคลเซียม คลอรีน ซิลิคอน เหล็ก อะลูมิเนียม แมงกานีส โซเดียม และสังกะสี สำหรับธาตุเหล็กและแคลเซียมนั้นจะมีปริมาณไม่เพียงพอกับความต้องการของร่างกาย

1.2.4 วิตามิน (vitamin) ส่วนใหญ่จะพบที่บริเวณเยื่อหุ้มเมล็ดชั้นในสุดและที่คัพภะ จึงเป็นสาเหตุให้ข้าวสารขาวมีวิตามินเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องที่มีวิตามินอยู่ในปริมาณที่สูงกว่ามาก วิตามินที่มีอยู่ค่อนข้างมากได้แก่ กรดนิโคตินิก (nicotinic acid) หรือไนอะซิน (niacin) วิตามินที่มีอยู่ในปริมาณน้อยได้แก่ ไทอะมีน (thiamine) หรือวิตามินบี 1 (B_1) และไรโบฟลาวิน (riboflavin) หรือวิตามินบี 2 (B_2) ส่วนวิตามินที่มีอยู่ปริมาณน้อยมาก ได้แก่ วิตามินเอ ซึ่งมีเฉพาะในข้าวเหนียวดำ (กรมส่งเสริมการเกษตร 2530) วิตามินซี (ascorbic acid) วิตามินดี และวิตามินบี 12 (B_{12} or cobalamine) วิตามินในเมล็ดข้าวอาจสูญเสียไปได้ง่ายเมื่อเก็บข้าวไว้ในรูปของข้าวสารในโรงเก็บที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงควรเก็บไว้ในรูปของข้าวเปลือกในโรงเก็บที่มีอากาศถ่ายเทได้ดีหรือมีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนั้นวิธีการหุงข้าวก็ยังเป็นองค์ประกอบสำคัญในการทำให้เกิดการสูญเสียวิตามินไปด้วย กล่าวคือถ้ามีการซาวข้าวหรือล้างข้าวยิ่งมากครั้งก่อนหุงต้มก็จะยิ่งทำให้ปริมาณของวิตามินสูญเสียไปมากขึ้น การซาวข้าวก่อนหุงต้มจำนวน 2 ครั้งจะทำให้สูญเสียวิตามินบี 1 ในปริมาณร้อยละ 22–40 วิตามินบี 2 ในปริมาณร้อยละ 12-24 และกรดนิโคตินิกในปริมาณร้อยละ 36–45 (บุญหงส์ จงคิด 2547)

องค์ประกอบต่างๆ คุณค่าทางอาหารภายในข้าวกล้อง (brown rice หรือ unpolished rice) ข้าวสาร (milled rice หรือ polished rice) รำข้าว (bran) รำละเอียด (polish) และคัพภะ (จมูกข้าว) แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบต่างๆ ด้านคุณค่าทางอาหารภายในข้าวกล้อง ข้าวสาร รำข้าว รำละเอียด และคัพภะ ในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม

องค์ประกอบ	ข้าวกล้อง (brown rice)	ข้าวสาร (miller rice)	รำข้าว (bran)	รำละเอียด (polish)	คัพภะ (embryo)
แป้ง (กรัม)	75.9	79	52.9	62.5	47.5
แอมิโลส (กรัม)	30.8	32.7	6.7	-	-
เส้นใย (กรัม)	0.8	0.1	9.7	3.7	3.4
ไขมัน (กรัม)	1.8	0.9	15.8	12.05	20.6
โปรตีน (กรัม)	7.6	6.5	13.3	14.3	22.4
เหล็ก (มิลลิกรัม)	2.8	0.9	19.4	-	-
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	16	0	76	-	-
ไลซีน (มิลลิกรัม)	4.1	3.8	5.6	-	-
ไทอะมีน (มิลลิกรัม)	0.34	0.2	1.2	-	-
ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม)	0.07	0.4	0.25	-	-
ไนอะซีน (มิลลิกรัม)	5.0	1.6	29.8	-	-
เถ้า (กรัม)	1.4	0.3	-	7.15	5.1

- เครื่องหมายแสดงว่ายังไม่มีการรายงาน

ที่มา: บุญหงส์ จงคิด (2547)

องค์ประกอบต่างๆ คุณค่าทางอาหารภายในของข้าวมันปู ข้าวหอมมะลิ ข้าวเหนียวขาว และข้าวเหนียวดำ แสดงในตารางที่ 3 ทำให้ทราบว่า ข้าวเหนียวดำ มีโปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุ มากกว่า ข้าวเหนียวขาว

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีต่อน้ำหนักข้าวดิบ 100 กรัม ของข้าวมันปู ข้าวหอมมะลิ ข้าวเหนียวขาวและข้าวเหนียวดำ

ชนิดข้าว	แคลอรี (กิโลแคลอรี)	ความชื้น (ร้อยละ)	โปรตีน (กรัม)	คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	ไขมัน (กรัม)	เส้นใย (กรัม)	เถ้า (กรัม)	แคลเซียม (มิลลิกรัม)	ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	เหล็ก (มิลลิกรัม)	วิตามิน				
											เอ (หน่วยสากล)	บี 1 (มิลลิกรัม)	บี 2 (มิลลิกรัม)	ไนอาซิน (มิลลิกรัม)	ซี (มิลลิกรัม)
ข้าวมันปู*	369	11.8	6.2	76.9	3.3	0.9	1.0	65	99	0.2	-	0.37	0.96	2.2	-
ข้าวหอมมะลิ*	357	11.7	5.4	81.5	1.0	0.1	0.3	29	74	0.6	-	0.18	0.27	1.2	-
ข้าวเหนียวขาว**	355	11.3	7.0	81.1	0.3	0	-	12	46	1.3	0	0.06	0.03	-	0
ข้าวเหนียวดำ*	361	11.8	8.2	75.2	3.0	0.9	0.9	26	65	2.3	105	0.04	0.83	0.6	-

- เครื่องหมายแสดงว่ายังไม่มีการรายงาน 0 ไม่มีเลย * ปี 2527 ** ปี 2521

ที่มา: (กรมการข้าว สำนักพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าว 2549 อ้างถึงใน สุวิตร บุษปะเวศ 2531)

1.3 รงควัตถุที่ทำให้เกิดสีที่ผิวของเมล็ดข้าว

รงควัตถุที่ทำให้เกิดสี แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้ คือ คลอโรฟิลล์ มีสีเขียว แคโรทีนอยด์ มีสีเหลืองจนถึงแดง และฟลาโวนอยด์ โดยมีรงควัตถุที่สำคัญในข้าว คือ แอนโธไซยานิน มีตั้งแต่สีแดงจนถึงสีม่วงหรือสีน้ำเงิน (ดำเนิน กาละดี และคณะ 2543) โดยส่วนใหญ่แล้วสีที่ปรากฏขึ้นบนส่วนต่างๆของข้าวเหนียวดำเกิดจาก รงควัตถุแอนโธไซยานินและรงควัตถุที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ข้าวเหนียวดำมีสารประกอบที่ให้สี คือ แอนโธไซยานิน โดยมีไซยานิดินเป็นองค์ประกอบและเรียกข้าวชนิดนี้ว่า ข้าวก่ำ (Purple rice) หรือข้าวดำ (black rice) รงควัตถุกลุ่มนี้จะทำให้ข้าวมีสีแตกต่างกันไป ตั้งแต่สีชมพูจนถึงสีม่วงดำ เมื่อค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ในแวคิวโอลเปลี่ยนไป ถ้า pH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 จะให้สีส้มแดง ถ้า pH มากกว่า 6 จะไม่มีสี ถ้า pH น้อยกว่า 6 จะให้สีน้ำเงินถึงม่วง แอนโธไซยานินสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น แอลกอฮอล์และสามารถละลายได้ในน้ำ (วิไลลักษณ์ สมสุติ 2544)

1.4 คุณภาพทางกายภาพของเมล็ดข้าว

คุณภาพทางกายภาพของเมล็ดข้าวถูกกำหนดจากคุณลักษณะของเมล็ดข้าวที่มองเห็น สัมผัส และชั่งตวง วัดได้ ดังนี้ (อรอนงค์ นัยวิกุล 2547)

1.4.1 น้ำหนักเมล็ด กำหนดได้ 2 แบบ คือน้ำหนักต่อปริมาตร หมายถึง การชั่งน้ำหนักข้าวด้วยปริมาตรที่คงที่ เช่น กรัม/ลิตร หรือ กิโลกรัม/ถัง และแบบที่สองเป็นน้ำหนักต่อจำนวนเมล็ด หมายถึง การชั่งน้ำหนักข้าวด้วยจำนวนเมล็ดที่คงที่ เช่น กรัม/100 เมล็ด หรือ กรัม/1000 เมล็ด น้ำหนักเมล็ดถือเป็นลักษณะหนึ่ง

ในการจำแนกพันธุ์ข้าว เพราะควบคุมโดยลักษณะทางพันธุกรรม เป็นลักษณะที่คงที่มากที่สุด อาจแปรปรวนได้บ้างจากสภาพแวดล้อม เช่น ชนิดของดิน การใส่ปุ๋ย หรือสภาพภูมิอากาศ จากการตรวจสอบพันธุ์ข้าวที่ปลูกในประเทศไทย ประมาณ 344 พันธุ์พบมีน้ำหนักเมล็ดอยู่ในช่วง 16.20–41.68 กรัม/1000 เมล็ด (กัญญา เชื้อพันธุ์ 2545)

1.4.2 สีเปลือกของข้าวเปลือก เป็นลักษณะประจำพันธุ์ข้าว มีหลายสีตั้งแต่สีขาว ฟาง น้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาลเข้ม น้ำตาลทอง ร่องน้ำตาล กระน้ำตาล น้ำตาลแดง ม่วง หรือดำ เป็นต้น สำหรับพันธุ์ข้าวของประเทศไทยมีสีเปลือกส่วนใหญ่เป็นสีขาว หรือสีฟาง และสีน้ำตาลส่วนสีน้ำตาลแดง สีเขียวแกมเทา และดำมีเป็นส่วนน้อย พันธุ์ข้าวที่มีคุณภาพดีควรมีเปลือกสีอ่อน (สีฟางหรือน้ำตาล) เพราะเปลือกสีเข้ม เมื่อนำไปสีจะได้เปอร์เซ็นต์แกลบสูง

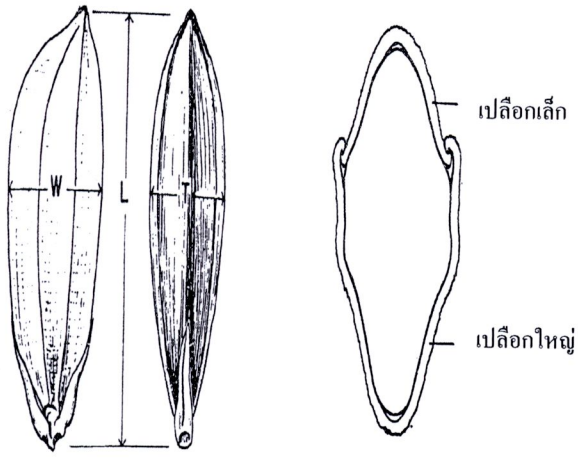
1.4.3 สีข้าวกล้อง เป็นลักษณะประจำพันธุ์เช่นเดียวกับสีเปลือกของข้าวเปลือก ที่ควบคุมโดยจีน (gene) หลายคู่ สร้างสารสีประเภท แอนโธไซยานิน (anthocyanin) อยู่ในส่วนเยื่อหุ้มผล (pericarp) มีสีต่างๆกัน เช่น ขาว แดง น้ำตาลเข้ม น้ำตาลเทา และม่วงถึงม่วงเกือบดำ และบางพันธุ์เป็นพันธุ์เฉพาะที่ผู้บริโภคนิยมเป็นข้าวพิเศษ มีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวกล้องสีปกติ ซึ่งประเทศไทยพบพันธุ์ข้าวที่ให้สีข้าวกล้องจัดกลุ่มได้ 4 สี คือ ขาว น้ำตาล แดง และดำ (ม่วงดำ) คุณภาพข้าวกล้องที่เกี่ยวข้องกับสีจึงขึ้นอยู่กับกลุ่มผู้บริโภค ซึ่งถ้าผู้บริโภคชอบบริโภคข้าวขัดขาว ทำให้ข้าวกล้องต้องผ่านการขัดสีเพื่อแยกเยื่อหุ้มเมล็ดออก แต่ถ้าผู้บริโภคนิยมบริโภคข้าวกล้อง โดยเฉพาะข้าวกล้องสีเข้มเพราะให้คุณค่าทางอาหารมากกว่าข้าวขัดขาว ก็ไม่ต้องขัดสีนำเยื่อหุ้มเมล็ดของข้าวกล้องออกไป วิธีการตรวจสอบสีของข้าวกล้องยังใช้การดูด้วยตาเปล่าหรือดูผ่านกล้องขยายให้เห็นชัดเจนขึ้น นอกจากนี้สีเปลือกของข้าวเปลือก และสีข้าวกล้องที่เข้มยังมีผลต่อการนำข้าวเปลือกไปทำเป็นข้าวนึ่ง เพราะจะทำให้ได้ข้าวนึ่งที่มีสีคล้ำ คุณภาพต่ำ ในการจัดเกณฑ์มาตรฐานข้าวยังถือว่าข้าวเมล็ดแดงที่ปนกับข้าวสาร ทำให้ข้าวสารอยู่ในมาตรฐานที่มีคุณภาพต่ำกว่าข้าวสารที่ไม่มีข้าวเมล็ดแดงปนเลย

1.4.4 ขนาดและรูปร่าง เป็นลักษณะประจำพันธุ์ เพื่อจำแนกพันธุ์ข้าว และใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการซื้อขายข้าวของประเทศไทย (เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข 2531) โดยลักษณะการวัดขนาดของเมล็ดข้าวสาร ข้าวกล้องและข้าวเปลือกจะทำการวัดขนาดในลักษณะเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งการวัดความยาว (length) ความกว้าง (width) ความหนา (thickness) ของเมล็ดข้าวจะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ความยาวของเมล็ด (L) หมายถึง ระยะทางจากปลายยอดสุดของเมล็ดถึงโคนเมล็ด

ความกว้างของเมล็ด (W) หมายถึง ระยะทางส่วนที่กว้างที่สุดระหว่างเปลือกใหญ่ถึงเปลือกเล็ก

ความหนาของเมล็ด (T) หมายถึง ระยะทางที่มากที่สุดระหว่างเปลือกใหญ่ด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง



ภาพที่ 3 การวัดขนาดของเมล็ดข้าวเปลือก เมื่อ W คือ ความกว้าง L คือ ความยาว T คือ ความหนา
ที่มา: สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร (2531)

เมื่อเปรียบเทียบรูปร่างของเมล็ดข้าวระหว่างข้าวสาร ข้าวกล้องและข้าวเปลือก ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง สามารถแบ่งรูปร่างของเมล็ดข้าวได้เป็น 3 แบบ คือ เรียว ปานกลาง และป้อม แสดงในตารางที่ 4 ผลที่ได้จะบอกถึงคุณภาพและประสิทธิภาพของการขัดสีเป็นข้าวกล้องและข้าวสารแต่ละชนิด (USDA, 1982)

ตารางที่ 4 รูปร่างเมล็ดข้าวจำแนกโดยใช้อัตราส่วนความยาว/ความกว้าง

รูปร่าง	ข้าวเปลือก	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร
เรียว	3.4 หรือ >	3.1 หรือ >	3.0 หรือ >
ปานกลาง	2.3 – 3.3	2.1 – 3.0	2.0 – 2.9
ป้อม	2.2 หรือ <	2.0 หรือ <	1.9 หรือ <

ที่มา: USDA (1982)

เมื่อเปรียบเทียบขนาดและรูปร่างเมล็ดของข้าวไทย กับข้าวอิตาลีและข้าวญี่ปุ่น (ค่าเฉลี่ยของการวัดจาก 20 เมล็ด) จะเห็นความแตกต่าง ทั้งในด้านความยาว (ตารางที่5) และรูปร่าง (ตารางที่ 6) ข้าวไทยมีรูปร่างเมล็ดเรียว ขณะที่ข้าวอิตาลีมีรูปร่างเมล็ดปานกลาง และข้าวญี่ปุ่นมีรูปร่างเมล็ดป้อม ซึ่งมีเกณฑ์ของความยาว ความกว้าง และความหนาของเมล็ดข้าว ดังนี้ (เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข 2531)

ตารางที่ 5 ขนาดของเมล็ดข้าวจำแนกตามความยาว

ขนาดเมล็ดข้าว	ความยาว (มิลลิเมตร)
ยาวมาก	มากกว่า 7.5
ยาว	7.06 – 7.5
ค่อนข้างยาว	6.61 – 7.059
ปานกลาง	6.101 – 6.609
ค่อนข้างสั้น	5.51 – 6.10
สั้น	น้อยกว่า 5.5

ที่มา: เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข (2531)

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบขนาดและรูปร่างของข้าวสาร 3 จากประเทศไทย อิตาลี และญี่ปุ่น

แหล่งของข้าว	ความยาว (มม.)	ความกว้าง (มม.)	อัตราส่วน ยาว/กว้าง	รูปร่าง	ความหนา (มม.)	น้ำหนักเมล็ด (มก./เมล็ด)
ไทย	7.3	2.0	3.6:1	เรียว	1.7	39
อิตาลี	6.6	3.3	2.0:1	ปานกลาง	2.1	68
ญี่ปุ่น	4.6	2.8	1.6:1	ป้อม	1.9	37

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

1.4.5 ข้าวท้องไข่ หมายถึงจุดขุ่นขาวคล้ายชอล์กที่เกิดขึ้นในเนื้อของเมล็ดข้าวสารที่เป็นแอมิโลสของข้าวที่มีปริมาณแอมิโลเพคตินเพิ่มขึ้นจึงเป็นจุดขาวขุ้นคล้ายชอล์ก ซึ่งเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่บ่งบอกคุณภาพและราคาข้าวเปลือก เนื่องจากเมล็ดข้าวที่เป็นข้าวท้องไข่มากเมื่อนำไปสีจะทำให้เมล็ดหัก นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับลักษณะที่บ่งบอกถึงคุณภาพในลักษณะปรากฏของผู้บริโภคซึ่งผู้บริโภคส่วนใหญ่มีความชอบเมล็ดข้าวสารเจ้าที่ใสมากกว่าที่มีจุดขาวภายในเนื้อเมล็ด ลักษณะท้องไข่นี้จะเห็นได้ในข้าวเจ้าหรือข้าวที่มีแอมิโลสเป็นองค์ประกอบของสตาร์ชข้าว ส่วนข้าวเหนียวซึ่งมีส่วนประกอบของแอมิโลเพคตินเกือบทั้งหมดทำให้เมล็ดข้าวเหนียวมีสีขาวขุ่นทั้งเมล็ดอยู่แล้วจึงไม่เห็นลักษณะท้องไข่

1.4.6 ความเลื่อมมันของเมล็ด เป็นปัจจัยที่ใช้ประเมินคุณภาพและราคาข้าวเนื่องจากข้าวกล้องที่มีความเลื่อมมันดี เมื่อนำไปสีจะทำให้ข้าวไม่หักได้ข้าวที่เต็มเมล็ดมาก ข้าวหักน้อย ลักษณะความเลื่อมมันของเมล็ดเป็นผลมาจากการปฏิบัติดูแลรักษาข้าวขณะที่ปลูกเป็นอย่างดี

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 12 มี.ค. 2556
เลขทะเบียน 208846
เลขเรียกหนังสือ

1.4.7 ความขาวของข้าวสาร เมื่อนำข้าวกล้องไปขัดขาวจนได้ข้าวขาวที่มีความขาวสม่ำเสมอ แต่อาจมีความขาวแตกต่างกันขึ้นกับระดับการสี ถ้าขัดเบาๆจะมีสีคล้ำมากกว่าเมื่อขัดหนักๆ เพราะยังมีส่วนของรำติดอยู่ที่ผิวของเมล็ดข้าว สำหรับข้าวเปลือกที่เก็บไว้นานเมื่อนำไปสีเป็นข้าวสารจะได้ข้าวที่มีสีคล้ำกว่าข้าวที่เกี่ยวใหม่ๆ

1.4.8 ความใสของเมล็ด เป็นลักษณะความโปร่งแสงโดยแสงส่องผ่านได้ทั้งเมล็ดข้าวต่างจากท้องไข่ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะจุด ข้าวเจ้าพันธุ์เดียวกัน โดยอาจเกิดจากสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อความใสและขุ่น

1.5 การจำแนกข้าวตามชนิดและปริมาณของแป้งในเมล็ด

1.5.1 ข้าวเจ้า (non-glutinous rice, non-sticky rice, non-waxy rice)

ข้าวเจ้าจะมีส่วนของเมล็ดใสกว่าข้าวเหนียว เมื่อนำไปหุงต้มเมล็ดจะไม่เกาะตัว มีลักษณะร่วนซุยไม่เหนียวติดกัน ในการหุงต้องใช้น้ำในปริมาณที่มากกว่าข้าวเหนียว แป้งในเมล็ดประกอบด้วยแอมิโลเพคตินร้อยละ 64-92 และมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 8-36 ของน้ำหนักเมล็ด ซึ่งปริมาณของแอมิโลสในข้าวเจ้าจะสูงกว่าข้าวเหนียว อุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนเซชันของเม็ดแป้งข้าวเจ้าอยู่ในช่วง 61-78 °ซ ข้าวเจ้าบางพันธุ์เมื่อหุงต้มแล้วจะพบว่ามีความนุ่มและการเกาะตัวดีใกล้เคียงกับข้าวเหนียว เช่น ข้าวพวกจาปอนิคา แต่คุณลักษณะอื่นๆในการหุงต้มและลักษณะทางเคมียังคงมีลักษณะเป็นข้าวเจ้าอยู่ ปริมาณแอมิโลสในข้าวเจ้าทำให้ข้าวเมื่อหุงสุกแล้วมีลักษณะอ่อนนุ่มหรือแข็งกระด้างต่างกันไปเรียกว่า มีคุณภาพการหุงต้ม (cooking quality) ต่างกัน กล่าวคือ ข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงขึ้น จะมีเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่มีความแข็งมากขึ้น (ชาญ มงคล 2536) ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่แบ่งตามปริมาณแอมิโลสดังแสดงในตารางที่ 7 นอกจากนี้ความนุ่มของข้าวเจ้ายังขึ้นอยู่กับพันธุ์ ปริมาณโปรตีน อายุการเก็บรักษา ปริมาณน้ำในการหุงต้ม เป็นต้น (วาสนา พลารักษ์ 2523)

ตารางที่ 7 การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลสและคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก

ประเภทข้าว	ปริมาณแอมิโลส (ร้อยละ)	ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก
ข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำ	10 – 19	เหนียว - นุ่ม
ข้าวเจ้าแอมิโลสปานกลาง	20 – 25	ค่อนข้างร่วนไม่แข็ง
ข้าวเจ้าแอมิโลสสูง	26 – 34	ร่วน แข็ง
ข้าวเหนียว	0 - 2	เหนียวมาก

ที่มา: งามชื่น คงเสรี (2547)

(1) ข้าวหอมนิล

ข้าวเจ้าหอมนิลเป็นข้าวที่ได้รับการคัดเลือกและพัฒนาจนได้ข้าวที่มีเมล็ดข้าวกล้องเรียวยาวสีม่วงเข้ม ข้าวกล้องเมื่อหุงสุกจะนุ่ม เหนียว หอม ข้าวสารหุงสุกมีสีม่วงอ่อน นุ่ม และมีกลิ่นหอมเช่นกัน เมล็ดข้าวกล้องยาวประมาณ 6.5 มิลิเมตร (ผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องเพื่อสุขภาพโมจาโดย 2553) คุณค่าทางโภชนาการของข้าวเจ้า

หอมนิลคือ ข้าวกล้องมีโปรตีนสูงถึงร้อยละ12.5 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 70 ปริมาณแอมิโลส ร้อยละ 16 ปริมาณเส้นใยสูงร้อยละ 10 ปริมาณแคลเซียม 4.2 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ปริมาณธาตุเหล็กอยู่ระหว่าง 2.25-3.25 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ปริมาณธาตุสังกะสี 2.9 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ปริมาณสารต้านออกซิเดชัน 293 ไมโครโมล ต่อกรัม ในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดที่เป็นสีม่วงเข้มประกอบไปด้วยสารแอนโธไซยานิน โปรแอนโธไซยานิดิน ไบโอฟลาโวนอยด์ และในส่วนของรำและจมูกข้าวยังมีวิตามินอี วิตามินบี ข้าวเจ้าหอมนิลมีเมล็ดสีม่วงดำ เมื่อวิเคราะห์ปริมาณสีของเมล็ด สีม่วงดำประกอบไปด้วย สีม่วงเข้ม (cyanidin) สีชมพูอ่อน (peonidin) และสีน้ำตาล (procyanidin) ผสมกันซึ่งสีที่เห็นนั่นเป็นสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่เรียกว่า สารแอนโธไซยานิน ซึ่งเป็นสารต้านออกซิเดชันที่ทำหน้าจับกับอนุมูลอิสระแล้วช่วยทำให้กลไกลการทำงานของร่างกายมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าปกติ สารแอนโธไซยานินสามารถช่วยลดการอักเสบของเนื้อเยื่อ ช่วยลดไขมันอุดตันในเส้นเลือดที่หัวใจและสมอง ช่วยบรรเทาโรคเบาหวาน ช่วยบำรุงสายตาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการมองเห็นเวลากลางคืน ยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็ง ป้องกันโรคหัวใจและโรคความดันโลหิตสูง (พันทิพา พงษ์เพียงจันทร์ 2547)

(2) ข้าวหอมมะลิแดง

ข้าวหอมมะลิแดง เมล็ดข้าวกล้องมีความกว้าง X ยาว X หนา = 2.1 X 7.5 X 1.7 มิลลิเมตร มีเยื่อหุ้มเมล็ด สีแดงเข้ม ข้าวสุกนุ่มเหนียว และมีกลิ่นหอมเหมือนข้าวขาวดอกมะลิ 105 ข้าวหอมมะลิแดงในปริมาณ 100 กรัมมีธาตุเหล็ก 1.2 มิลลิกรัม ขณะเดียวกันก็มีทั้งวิตามินเอ บี และ ซี พร้อมทั้งมีคุณสมบัติใช้รักษาโรคได้อย่างหลากหลาย เช่น ป้องกันโรคหัวใจ แขนขาไม่มีกำลังวังชา นอนไม่หลับ รักษาอาการมือเท้าบวม มีผื่นขึ้น ระบบย่อยอาหารไม่ปกติ มีลมในท้อง และลำไส้ เป็นต้น ข้าวหอมมะลิแดงที่หุงสุกแล้วมีแอมิโลสร้อยละ 16.9 และมีการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำตาลกลูโคสในช่วงเวลา 20 นาทีแรกค่อนข้างช้า คือ 10.60 กรัมต่อ 100 กรัม ส่วนปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังจากย่อยเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที มีค่าเพียง 8.59 กรัมต่อ 100 กรัม ดังนั้นเมื่อรับประทานข้าวชนิดนี้เข้าไปแล้วการย่อยสลายตัวจากคาร์โบไฮเดรต มาเป็นกลูโคสจะใช้เวลานานกว่าข้าวทั่วไป ทำให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมกลูโคสในปริมาณมากเกินไป ร่างกายจะ มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสเพิ่มสูงขึ้นช้ากว่าข้าวเจ้าทั่วไป ข้าวหอมมะลิแดงจึง มีศักยภาพในการป้องกันและบรรเทาโรคเบาหวานได้อย่างดี คุณค่าทางโภชนาการของข้าวหอมมะลิแดงแสดงดังตารางที่ 8 (ผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องเพื่อสุขภาพโมจาโดย 2553)

ตารางที่ 8 คุณค่าทางโภชนาการของข้าวหอมมะลิแดง

คุณค่าทางโภชนาการ	มิลลิกรัม/100กรัม	คุณค่าทางโภชนาการ	มิลลิกรัม/100กรัม
เส้นใย (%)	3.78	ทองแดง (มิลลิกรัม/100 ก.)	4.3
โปรตีน (%)	12.56	เบต้าแคโรทีน (มิลลิกรัม/100 ก.)	0.003
แอมิโลส (%)	16.9	ลูทีน (มิลลิกรัม/100 ก.)	0.00912
ธาตุเหล็ก (มิลลิกรัม/100 ก.)	1.2	วิตามินอี (มิลลิกรัม/100 ก.)	0.3366
สังกะสี (มิลลิกรัม/100 ก.)	3.8	โพลีฟีนอล (มิลลิกรัม/100 ก.)	329.3

ที่มา : ผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องเพื่อสุขภาพโมจาโดย (2553)

1.5.2 ข้าวเหนียว (glutinous rice, sticky rice, waxy rice)

ข้าวเหนียวจะมีลักษณะของเนื้อเมล็ดเป็นสีขาวขุ่น เมื่อนำไปหุงต้มจะเหนียว เมล็ดเกาะตัว กันดีมาก (ตารางที่ 7) แป้งในเมล็ดส่วนใหญ่เป็นแอมิโลเพคตินและมีแอมิโลสเป็นส่วนน้อยหรืออาจไม่มีเลย ในเมล็ดจะประกอบไปด้วยแอมิโลเพคตินร้อยละ 92-100 และแอมิโลสร้อยละ 0-8 ของน้ำหนักเมล็ด อุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนเซชันของเม็ดแป้งข้าวเหนียวอยู่ในช่วง 55-65 °ซ เมล็ดข้าวเหนียวเมื่อนำไปนึ่งจะมีความนุ่มของแต่ละพันธุ์ไม่เท่ากัน โดยส่วนใหญ่พันธุ์ที่มีความนุ่มน้อยกว่าจะเป็นพันธุ์ที่มีปริมาณของแอมิโลสอยู่สูงกว่า นอกจากนี้อาจเป็นเพราะปริมาณโปรตีนในเมล็ด อายุการเก็บรักษา และสภาพที่เก็บรักษาด้วย (วาสนา พลารักษ์ 2523)

(1) ข้าวเหนียวดำพันธุ์พื้นเมือง

ข้าวเหนียวดำ หรือเรียกตามภาษาพื้นเมืองของทางเหนือและทางภาคอีสานว่า "ข้าวก่ำ" เป็นการเรียกตามลักษณะสีของเมล็ดที่มีสีม่วงดำหรือแดงก่ำ นิยมปลูกมากในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีปลูกทั่วไปในประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว สาธารณรัฐเวียดนาม อินเดีย ญี่ปุ่น และสาธารณรัฐประชาชนจีน พันธุ์ข้าวเหนียวดำมีลักษณะเป็นข้าวพันธุ์ไวแสงและเป็นข้าวเหนียว ปลูกได้เฉพาะฤดูนาปี นอกจากนี้ข้าวเหนียวดำพันธุ์พื้นเมืองจะมีความสามารถในการทนแล้งและการฟื้นตัวจากแล้งได้ดี (วิไลลักษณ์ พละกลาง 2541) ลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากข้าวทั่วไปที่เห็นอย่างชัดเจนคือการมีสีม่วงบนส่วนต่างๆของต้น เช่น กาบใบ แผ่นใบ กลีบดอก เปลือกเมล็ด และเยื่อหุ้มเมล็ด เป็นต้น ปริมาณของสีจะเข้มข้นแตกต่างกันไป เป็นลักษณะเฉพาะประจำพันธุ์ และลักษณะสีเยื่อหุ้มเมล็ดโดยเฉพาะข้าวเหนียวดำนาเรียกตามท้องถิ่น คือ ข้าวก่ำล้วน (เมล็ดข้าวมีสีม่วงทั้งเมล็ด) กับข้าวก่ำผ่า (เมล็ดมีสีม่วงเพียงบางส่วน) คุณค่าทางอาหารของข้าวเหนียวดำดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ส่วนประกอบคุณค่าทางอาหารของข้าวเหนียวดำ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ	ส่วนประกอบ	ปริมาณ
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	364 .00	เหล็ก (มิลลิกรัม)	2.30
ความชื้น (กรัม)	11.80	เบต้าแคโรทีน (มิลลิกรัม)	16.00
โปรตีน (กรัม)	8.20	วิตามินเอ (มิลลิกรัม)	3.00
ไขมัน (กรัม)	3.00	ไทอามีน (มิลลิกรัม)	0.55
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	76.10	ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม)	0.29
เส้นใย (กรัม)	4.90	ไนอาซิน (มิลลิกรัม)	0.60
เถ้า (กรัม)	0.90	ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	65.00
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	26.00		

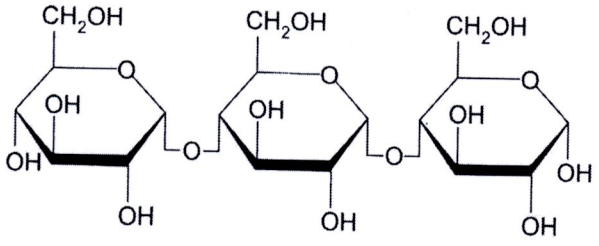
ที่มา: ดัดแปลงจาก กรมอนามัย (2521)

1.6 แป้ง

เมล็ดข้าวในส่วนของเอนโดสเปิร์ม (endosperm) มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ประมาณร้อยละ 84-93 โดยน้ำหนักแห้ง และมีโปรตีน ประมาณร้อยละ 5-14 ในส่วนของแป้งข้าวยังสามารถแยกออกเป็นแป้ง 2 ชนิด คือ

1.6.1 แอมิโลส (amylose)

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิด α–1,4 ดังภาพที่ 4 โครงสร้างของแอมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวคลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ตำแหน่งของแอมิโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง โดยบางส่วนอยู่ในกลุ่มของแอมิโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน และส่วนผลึก แป้งทั่วไปมักจะมีแอมิโลส ประมาณร้อยละ 25 แต่บางชนิดก็มีมากกว่า โดยมีแอมิโลสสูงถึงร้อยละ 70 เรียกว่าแป้งแอมิโลสสูง (high amylose) แป้งจากธัญพืช เช่นแป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณแอมิโลส สูงประมาณร้อยละ 28 ส่วนแป้งจากราก และหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง มีปริมาณแอมิโลส ต่ำกว่าคือประมาณร้อยละ 20 (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ 2546) อะไมโมสเมื่อย้อมสีด้วยสารละลายไอโอดีนจะมีสีน้ำเงิน เมื่อทำให้สุกในน้ำเดือดแล้วทำให้เย็นจะเกิดการคืนตัว (retrogradation) ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลงและมีผลให้ข้าวสุกร่วนและแข็งกระด้างมากขึ้น (งามชื่น คงเสรี 2547)

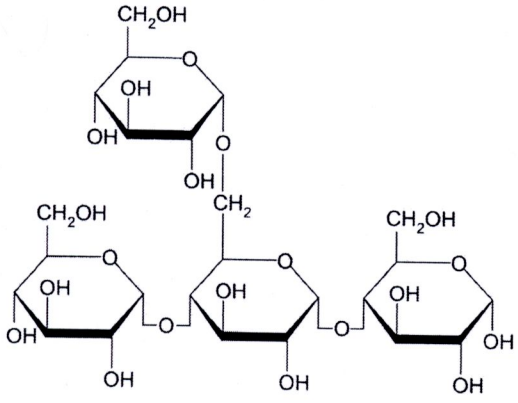


ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของแอมิโลส
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ (2546)

1.6.2 แอมิโลเพคติน (amylopectin)

แอมิโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิด α–1,4 และส่วนที่กิ่งก้านสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิด α–1,6 ดังภาพที่ 5 ขนาดโมเลกุลของแอมิโลเพคตินมีตั้งแต่ขนาดเล็ก จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยจะอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster) แอมิโลเพคตินของแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง สายส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 80–90 ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยวๆ และสายที่เหลืออีกร้อยละ 10–20 จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่ม

ประกอบไปด้วยสายประมาณ 22–25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มแอมิโลเพคติน ทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ ซึ่งช่วยให้เม็ดแป้งมีความทนต่อการเกิดปฏิกิริยาด้วยกรดและเอนไซม์ การเกิดเกลียวคู่ของแอมิโลเพคตินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงวันเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ 2546) แอมิโลเพคตินเมื่อย้อมสีด้วยสารละลายไอโอดีนจะเป็นสีน้ำตาลแดง (red brown) เมื่อทำให้สุก (gelatinization) ในน้ำเดือดจะค่อนข้างคงสภาพเดิมได้นานและเป็นส่วนที่ทำให้ข้าวสุกเหนียวติดกัน (งามชื่น คงเสรี 2547)



ภาพที่ 5 โครงสร้างทางเคมีของแอมิโลเพคติน
ที่มา: กล้าณรงค์ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ (2546)

1.7 คุณสมบัติของแป้ง

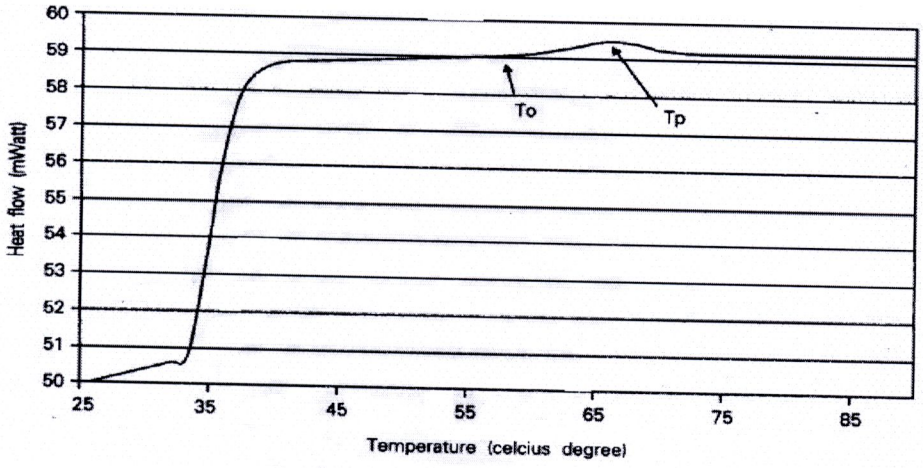
1.7.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย (water uptake, swelling and solubility)

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซลล์ (micelles) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ ทดสอบได้จากการแขวนลอยเม็ดแป้งในสารละลายไอโอดีนเจือจาง จะเกิดสีขึ้นในเม็ดแป้ง แต่เมื่อใส่โซเดียมไทโอซัลเฟต (sodium thiosulfate) ลงไป พบว่าสีหายไปอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเม็ดแป้งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวคัดขนาดโมเลกุล (molecular sieve) รูพรุนเหล่านี้อาจจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง หรืออาจจะมีอยู่แล้วในแป้งตามธรรมชาติแต่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้น แป้งดิบไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าในช่วงการเกิดเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย โมเลกุลน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายคือ ชนิดของแป้ง โดยแป้งจากธัญพืชมีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำสุดเนื่องจากมีปริมาณแอมิโลสสูง ทำให้พองตัวได้ต่ำ แป้งจากส่วนรากหรือส่วนกลางลำต้น เช่น แป้งมันสำปะหลังมีกำลังการพองตัวและการละลายสูงกว่าแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีจำนวนพันธะน้อยกว่า สำหรับแป้งจากส่วนหัว

เช่น แป้งมันฝรั่ง มีการพองตัวสูง เนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ และยังมีหมู่ฟอตเฟตที่ทำให้เกิดการพองตัวได้สูงขึ้น ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปน ปริมาณน้ำ และการดัดแปรแป้งทางเคมีทำให้แป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบการพองตัวและการละลายแตกต่างกัน (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ 2546)

1.7.2 การสุกของเม็ดแป้ง (gelatinization)

การสุกของเม็ดแป้งเป็นกระบวนการที่แสดงถึงการพองตัว (swelling) และการดูดซึมน้ำ (hydration) ของเม็ดแป้งในขณะที่ได้รับความร้อนเพราะ โมเลกุลภายในเม็ดแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะแอมิโลเพคติน ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลหรือระหว่างโมเลกุลเป็นจำนวนมาก ทำให้แรงยึดภายในเม็ดแป้งมีค่าสูงมาก แป้งจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแป้งจะสามารถละลายน้ำได้ดีขึ้น ทำให้เกิดการพองตัวของเม็ดแป้ง การพองตัวของเม็ดแป้งจะเริ่มเกิดเมื่อ ปริมาณความร้อนที่ให้แก่สารละลายแป้งมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการแตกของพันธะไฮโดรเจนในเม็ดแป้ง ทำให้น้ำสามารถเข้าไประหว่างโมเลกุลของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีขนาดใหญ่ขึ้น ช่วงอุณหภูมิที่แป้งมีการดูดน้ำอย่างรวดเร็วและพองตัวขึ้นมากเรียกว่า อุณหภูมิแป้งสุก (gelatinization temperature) การพองตัวอย่างเต็มที่ของเม็ดแป้งจะทำให้สูญเสียลักษณะ birefringence ซึ่งเป็นลักษณะที่บอกถึงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในเม็ดแป้งอย่างเป็นระเบียบ แป้งแต่ละชนิดมีช่วงอุณหภูมิแป้งสุกแตกต่างกันไป การพองตัวของเม็ดแป้งอย่างเต็มที่ทำให้เพสท์ของแป้งมีความใสและความหนืดเพิ่มขึ้น ปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการพองตัวของเม็ดแป้ง คือ แรงยึดระหว่างพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลหรืออาจแยกเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง ดังนี้ คือ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในเม็ดแป้ง สัดส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพคติน การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลสและอะไมโลเพคติน และองค์ประกอบที่ไม่ใช่แป้งภายในเม็ดแป้ง โดยเฉพาะไขมันและโปรตีน ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดที่มีแอมิโลสต่างกันก็จะมีอุณหภูมิที่จะทำให้แป้งสุกต่างกัน การตรวจสอบกระบวนการเจลาติไนเซชัน นอกจากจะใช้การสังเกตการเปลี่ยนโครงสร้างเครื่องหมายกากบาทภายในเม็ดแป้งภายใต้กล้องจุลทรรศน์แล้ว ยังสามารถตรวจสอบโดยเครื่องมือที่วัด และบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการเจลาติไนเซชันได้ คือ เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน (Differential Scanning Calorimeter; DSC) ซึ่งจะวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ปกติพอลิเมอร์ต่างๆในรูปผลึก และอสัณฐานจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน แป้งก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) ที่สูงมาก กล่าวคือในช่วงของ 160-200 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมีประมาณร้อยละ 70 แป้งจะเกิดเจลาติไนเซชัน ซึ่งช่วงของอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง (onset temperature, T_0) และอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak temperature, T_p) คือช่วงอุณหภูมิของเจลาติไนเซชัน สำหรับการวัดลักษณะของการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งด้วยเครื่อง DSC ทำได้โดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างสารผสมแป้งกับน้ำในอัตราส่วน 30 ต่อ 70 จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลยช่วงในการเกิดเจลาติไนเซชัน จะได้ thermogram ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง heat flow และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (enthalpy, ΔH) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักตัวอย่างแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ 2546) ตัวอย่างกราฟที่ได้จากเครื่อง DSC แสดงได้ดังภาพที่ 6



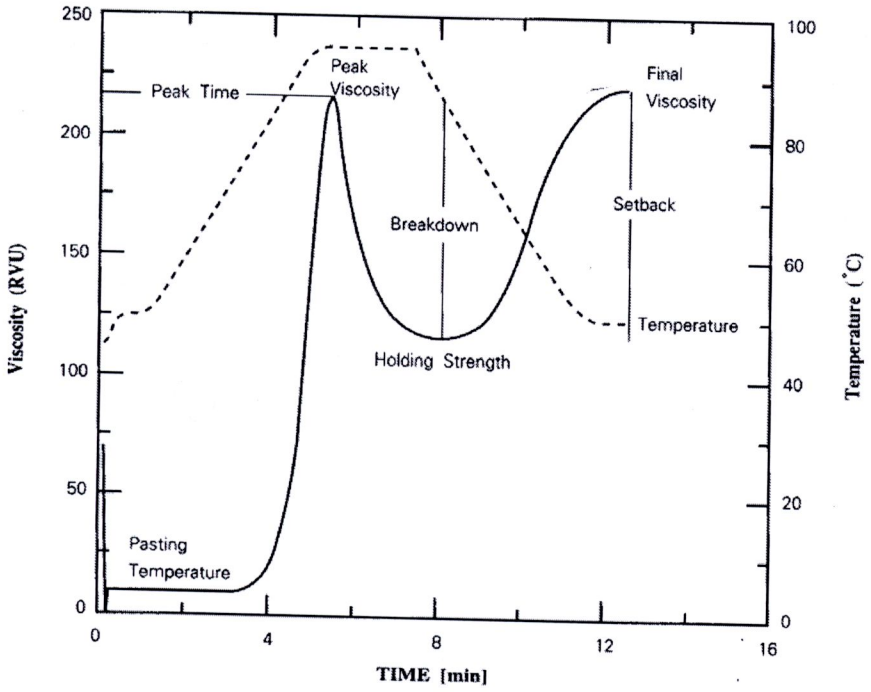
ภาพที่ 6 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

(T_0 คือ Onset temperature, T_p คือ Peak temperature)

ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ (2546)

1.7.3 ความหนืดของเม็ดแป้ง (viscosity)

ความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้ง และการดัดแปรแป้งด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความข้นหนืดขึ้น อุณหภูมิที่กราฟเริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting temperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีก รวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างภายในเม็ดแป้งแตกออก ความหนืดลดลง ต่อมาลดอุณหภูมิลง ทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชั่นความหนืดจะเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้ง ความหนืดของแป้งชนิดต่างๆสามารถตรวจวัดได้หลายวิธี และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีหลายชนิด ได้แก่ เครื่อง Brabender amylograph Brookfield Viscometer และ Rapid Visco Analyzer (RVA) เป็นต้น ซึ่ง Rapid Visco Analyzer (RVA) เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะต้องพิจารณาความหนืดขณะที่ให้ความร้อน คุณสมบัติพิเศษ คือ มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิสามารถทำให้ร้อน และทำให้เย็นได้อย่างแม่นยำ และรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้จึงทำให้สามารถหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting curve) ได้ภายในเวลาอันสั้น (13 นาที) ได้ เนื่องจากมีกลไกการส่งผ่านความร้อนที่ดีกว่า และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่า ตัวอย่างลักษณะของกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ 2546) แสดงดังภาพที่ 7



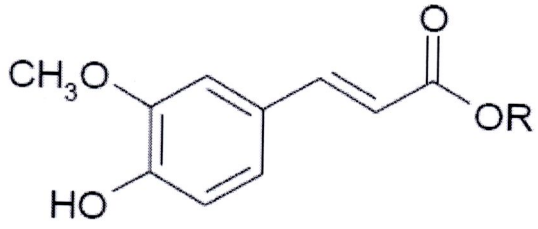
ภาพที่ 7 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA
ที่มา: Newport Science Pty (1995)

การวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA สามารถอ่านค่าต่างๆจากภาพที่ 7 ได้ดังนี้

- Peak time คือ เวลาที่จุดสูงสุด (Peak) ของความหนืด มีหน่วยเป็น นาที
- Pasting temperature คือ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ใน เวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- Peak temperature คือ อุณหภูมิที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- Peak viscosity คือ ความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
- Holding strength คือ ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำเย็น มีหน่วยเป็น RVU
- Breakdown คือ ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (Peak viscosity- Holding strength) มีหน่วยเป็น RVU
- Final viscosity คือ ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU
- Setback from peak คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด (Final viscosity - Peak viscosity) มีหน่วยเป็น RVU
- Setback from trough คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (Final viscosity - Holding strength) มีหน่วยเป็น RVU

2. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแกมมาโอไรซานอล

แกมมาโอไรซานอลค้นพบครั้งแรกในน้ำมันรำข้าวในปี ค.ศ.1954 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Tsuchiya และ Kaneko มีลักษณะเป็นผงสีขาว หรือสีขาวปนเหลืองอ่อนๆ ละลายได้ดีในคลอโรฟอร์ม รองลงมาเป็นอีเทอร์ ละลายได้เล็กน้อยในเฮปเทน และไม่ละลายในน้ำ มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 161.2 องศาเซลเซียส (วราพร พงษ์ธรวรากุลพานิช 2543) โครงสร้างทางเคมีของแกมมาโอไรซานอล ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของแกมมาโอไรซานอล
หมู่ R คือ กลุ่มสเตอรอลหรือกลุ่มไตรเทอปีนแอลกอฮอล์
ที่มา: Xu and Godber (1999)

แกมมาโอไรซานอลเป็นกลุ่มของสารประกอบเอสเทอร์ระหว่างกรดเฟอรูลิก (ferulic acid) และสเตอรอล (sterols) หรือไตรเทอร์ปีนแอลกอฮอล์ (triterpene alcohols) ชนิดต่างๆ แกมมาโอไรซานอลมีอนุพันธ์ ทั้งสิ้น 10 อนุพันธ์ ซึ่งได้แก่ delta-7-stigmastenyl ferulate, stigmasteryl ferulate, cycloartenyl ferulate, 24-methylene cycloartenyl ferulate, delta-7-campestenyl ferulate, campesteryl ferulate, delta-7-sitostenyl ferulate, sitosteryl ferulate, campestanyl ferulate และ sitostanyl ferulate โดยแกมมาโอไรซานอลที่พบในน้ำมันรำข้าวมี 3–4 ชนิด ซึ่งได้แก่ cycloartenyl ferulate, 24-methylene cycloartenyl ferulate , campesteryl ferulate และ sitosteryl ferulate (Xu and Godber 1999) แกมมาโอไรซานอลเป็นสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ จึงทำให้น้ำมันรำข้าวคงสภาพได้นานที่อุณหภูมิสูง คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น สี รส รวมทั้งคุณสมบัติทางเคมีก็ไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาณแกมมาโอไรซานอลที่พบในน้ำมันรำข้าวมีมากกว่าวิตามินอีประมาณ 20 เท่า ซึ่งอาจจะมีปริมาณแกมมาโอไรซานอลสูงถึง 3,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (วราพร พงษ์ธรวรากุลพานิช 2543) ปริมาณแกมมาโอไรซานอลในรำข้าวไทยพันธุ์พื้นเมือง จำนวน 125 พันธุ์ มีปริมาณแกมมาโอไรซานอลอยู่ในช่วง 84.92 - 378.12 มิลลิกรัมต่อรำ 100 กรัม(ละม้ายมาศ ยังสุข 2552) Lilitchan and others (2008) รายงานปริมาณแกมมาโอไรซานอลในรำข้าวไทย 9 สายพันธุ์ดังนี้ SP XBT 60-12, SPXBT 43-7, SP XBT 52-18, SP XBT 56-39, KD XBT 313-19-1-1, Hom Nin, Daw Dum 5647, Daw Dum 5645, Hom Supan พบว่า มีปริมาณแกมมาโอไรซานอลอยู่ในช่วง 1.95-3.07 มิลลิกรัมต่อกรัม

2.1 แหล่งของแกมมาโอไรซานอล

Larry (1989) รายงานแหล่งที่พบแกมมาโอไรซานอลในข้าวได้แก่ ในรำข้าว น้ำมันรำข้าว ต้นอ่อนของข้าว น้ำมันจากต้นอ่อนของข้าว นอกจากนี้ยังพบในธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวไรน์ และข้าวโอ๊ต ปริมาณไขมัน แกมมาโอไรซานอลและวิตามินอีในข้าวเจ้า ข้าวเหนียวดำ และข้าวเหนียวขาว แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ปริมาณไขมัน แกมมาโอไรซานอลและวิตามินอีในข้าวไทยพันธุ์ต่างๆ

Rice Varieties	Fat content (%)	γ-Oryzanol content (μg / g crude oil)	Vitamin E content (μg / g crude oil)
Non-glutinous rice			
- Goo Muang Lauang	17.15 ± 0.13	1,258.33 ± 1.88	194.11
- Pathumthani1	22.73 ± 0.14	1,530.95 ± 1.19	263.77
- Khao Dawk Mali105	21.77 ± 0.36	1,442.99 ± 3.44	559.70
- RD 15	12.61 ± 0.08	1,746.71 ± 4.47	157.43
- Hawm Pitsanuloke 1	19.38 ± 0.24	1,423.51 ± 3.68	536.67
- RD 13	19.04 ± 0.38	1,812.17 ± 1.54	323.38
- Hawm Klong Luang 1	22.26 ± 0.18	1,327.41 ± 3.30	310.39
- Lep Nok Pattani	21.65 ± 0.12	1,394.87 ± 3.78	348.32
- Nahng Phaya 132	22.69 ± 0.14	1,410.65 ± 1.98	452.32
- Chainat 1	14.83 ± 0.15	1,456.49 ± 3.44	234.00
- Tapoa Kaow 161	20.56 ± 0.36	1,046.90 ± 2.76	284.67
- Prajinburi 1	21.50 ± 0.21	1,209.22 ± 3.53	167.44
- RD 19	20.29 ± 0.15	1,124.19 ± 1.78	237.83
- Plai Ngam Prajinburi	15.32 ± 0.17	1,371.02 ± 2.11	362.56
Black-glutinous rice			
- S 1	25.65 ± 0.19	1,965.97 ± 1.66	52.86
- Kham Doi Saket	24.41 ± 0.24	1,890.70 ± 2.08	48.52
White-glutinous rice			
- RD 6	25.55 ± 0.16	1,360.09 ± 4.45	244.62
- Nahng Chalawng	23.14 ± 0.37	1,063.15 ± 2.73	276.24

ที่มา : ดัดแปลงจาก นพมาศ มนัสวรากุล และคณะ (2545)

2.2 การวิเคราะห์แกมมาโอไรซานอล

การวิเคราะห์ปริมาณแกมมาโอไรซานอลสามารถทำได้โดยใช้วิธีต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์โดย UV-vis spectrophotometry เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณแกมมาโอไรซานอลทั้งหมดโดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และราคาถูกกว่าการวิเคราะห์โดย HPLC (Lilitchan and others 2008) ตัวอย่างปริมาณแกมมาโอไรซานอลจากวัตถุดิบต่างๆแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ปริมาณแกมมาโอไรซานอลจากวัตถุดิบต่างๆ

วัตถุดิบ	ปริมาณแกมมาโอไรซานอล (mg/g)	อ้างอิง
Rice bran oil (USA)	9.8	Xu and Godber (1999)
Rice bran oil : (a) Italy (10 samples) (b) Thailand (10 samples) (c) Switzerland (10 samples)	(a) 3.8–4.1 (b) 2.0–2.6 (c) 0.89–1.02	Bucci and others (2003)
Rice bran oil (Pakistan) : (a) Super Kernel (b) 386 (c) 385 (d) Basmati	(a) 0.802 (b) 0.639 (c) 0.415 (d) 0.779	Anwar and others (2005)
Rice bran oil (India) : (a) chemically refined (b) physically refined	(a) 1.4–1.8 (b) 1.39–5.50	Krishna and others (2001)
Unmilled brown rice from Odaesan variety (Korea)	0.199	Ha and others (2006)
Bran from nine varieties (Thailand) (a) (soxhlet) (b) (partial extraction)	 (a) 3.67 (b) 3.43	Lilitchan and others (2008)
Eight cultivars of brown rice (Malaysia)	0.099-0.340	Kiing and others (2009)
Black rice (Korea) Heugjinjubyeo : (a) whole grain (b) endosperm (c) rice bran Heugkwangbyeo : (a) whole grain (b) endosperm (c) rice bran	 (a) 0.75 (b) 0.07 (c) 3.45 (a) 0.60 (b) 0.03 (c) 3.94	Kong and Lee (2010)

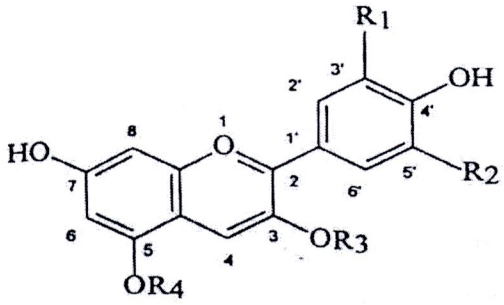
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

3. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแอนโธไซยานิน

แอนโธไซยานินเป็นรงควัตถุที่มีสีในช่วงสีแดงถึงสีน้ำเงิน พบในผัก ผลไม้ ดอกไม้หลายชนิด และข้าวสีม่วงดำ เช่น ดอกอัญชัน ดอกกระเจี๊ยบแดง ผลองุ่น และผลสตรอเบอรี่ เป็นต้น แอนโธไซยานินเป็นสารประกอบในกลุ่มฟลาโวนอยด์ มีโครงสร้างหลักเป็น $C_6C_3C_6$ ซึ่งเป็นอนุพันธ์โพลีไฮดรอกซีของสารฟลาวิเลียม หรือ 2-Phenylbenzopyrylium โมเลกุลประกอบด้วยแอนโทไซยานิดิน หรือเรียกว่า อะไกลโคน (aglycone) จับกับน้ำตาล (Markakis 1982)

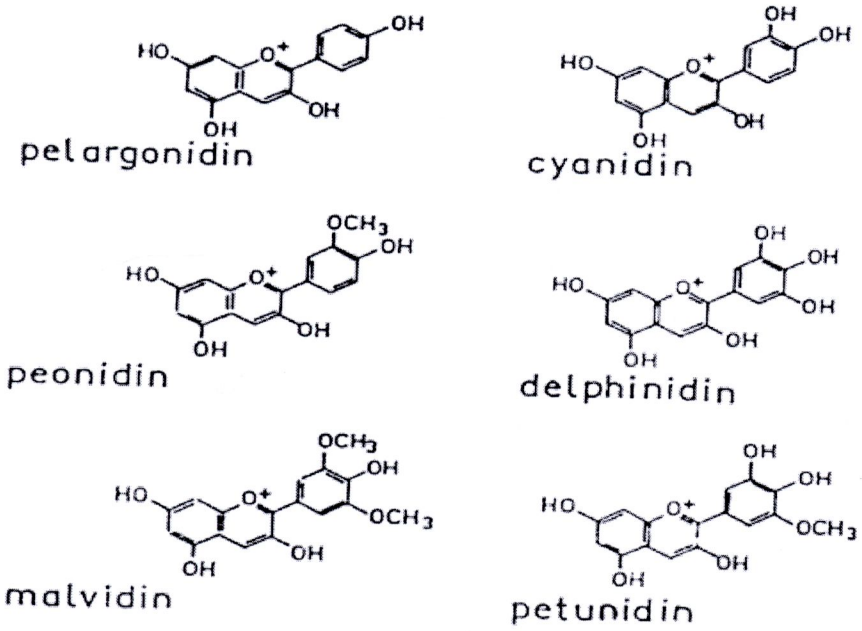
Anthocyanidins + Sugars ⟶ Anthocyanins

แอนโธไซยานินเป็นสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ ซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างหลักประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน 2 วงเชื่อมต่อกันด้วยแกนของคาร์บอน 3 อะตอม เรียกว่า flavan บนวงแหวนเบนซีนทั้งสองมีกลุ่มไฮดรอกซิลเกาะอยู่ได้ในหลายรูปแบบ ฟลาโวนอยด์จัดเป็นสารประกอบฟีนอลลิก ชนิดหนึ่งด้วยเพราะมีส่วนของฟีนอลเป็นองค์ประกอบ (จริงแท้ ศิริพานิช 2550) โครงสร้างหลักของแอนโธไซยานิน แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 โครงสร้างหลักของแอนโธไซยานิน
ที่มา: Elbe and Schwartz (1996)

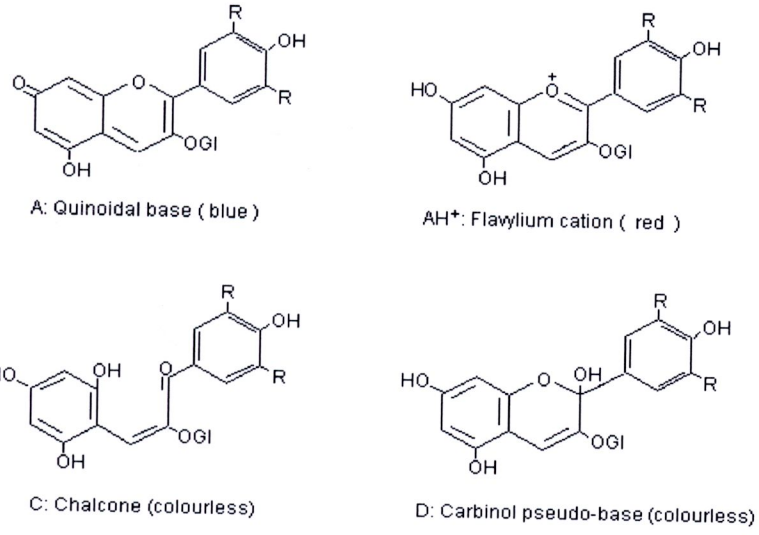
แอนโธไซยานินที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่มี 6 ชนิด คือ pelargonidin, cyanidin, peonidin, delphinidin, petunidin และ malvidin ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 10 โครงสร้างแอนโธไซยานินที่พบในธรรมชาติทั้ง 6 ชนิด
ที่มา: ทิพวดี จิตพิศุทธิ์ (2550)

แอนโธไซยานินในผัก ผลไม้และธัญพืชต่างๆ จะมีอัตราส่วนและปริมาณที่แตกต่างกันไปเนื่องจากแอนโธไซยานิดินมักจะอยู่ในรูปอิสระในเซลล์ของพืช จึงส่งผลต่อความคงตัวของสีเมื่อเกิดปฏิกิริยาต่างๆ โดยแอนโธไซยานินมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปตามค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เปลี่ยนแปลงไป ถ้า pH = 1 (เป็นกรด) มีสีส้มแดง ถ้า pH<6 ไม่มีสี ถ้า pH>6 (เป็นด่าง) มีสีน้ำเงิน และถ้า pH เป็นด่างมากเกินไปจะทำให้แอนโธไซยานินเสียโครงสร้าง แอนโธไซยานินละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น แอลกอฮอล์ โดยความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ถ้าตัวทำละลายมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น และสามารถละลายน้ำได้ด้วย (ยุทธนา จันทร์ชารา 2550)

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของแอนโธไซยานินเป็น 4 รูปแบบ คือ ถ้าอยู่ในรูป quinonoidal base (A) จะมีสีน้ำเงิน ถ้าอยู่ในรูปแฟลวิเลียมแคทไอออน (AH+) จะให้สีแดง แต่ถ้าเป็น chalcone (C) และ carbinol pseudobase (D) จะไม่มีสี ซึ่งจะพบว่าส่วนใหญ่ที่ pH 3 หรือต่ำกว่าจะให้สีแดง pH เป็นกลางถึงด่างเล็กน้อย เช่น 8.5 จะให้สีม่วง และถ้าเป็นด่างมากๆ เช่น ที่ pH 11 จะให้สีน้ำเงิน



ภาพที่ 11 โครงสร้าง 4 แบบของแอนโธไซยานินเมื่ออยู่ในสารละลายกรด

A = quinonoidal (สีน้ำเงิน) บนซ้าย AH+ = เกลือแฟลวิเลียม (สีแดง) บนขวา

C = chalcone (ไม่มีสี) ล่างซ้าย D = pseudobase (ไม่มีสี) ล่างขวา

ที่มา : ดัดแปลงจาก Brouillard and Delaport (1977)

รงควัตถุแอนโธไซยานินที่อยู่ในพืชมีสี ได้แก่ ข้าว ถั่ว และผลไม้ที่มีสี จะถูกทำลายได้ง่ายในกระบวนการแปรรูปอาหารตัวอย่างเช่น การใช้อุณหภูมิสูง ความเข้มข้นของน้ำตาลสูง พีเอช กรดอะมิโน กรดแอสคอร์บิก และสภาวะที่มีออกซิเจน จะมีผลเร่งอัตราเร็วของการสลายตัวของแอนโธไซยานินให้เกิดเร็วขึ้น ตัวอย่างเช่น แยมสตรอเบอรี่ซึ่งมีสีแดง เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 2 ปี จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง เนื่องจากมีสารโฟลบาเฟน (phlobaphen) เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษา แอนโธไซยานินสามารถรวมกับโลหะได้เป็นสีม่วงหรือสีเทา ซึ่งมักจะเกิดขึ้นเมื่อบรรจุอาหารลงในกระป๋องที่มีดีบุก (นิธิยา รัตนาปนนท์ 2545) ปริมาณแอนโธไซยานินจากวัตถุดิบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ปริมาณแอนโธไซยานินจากวัตถุดิบต่างๆ

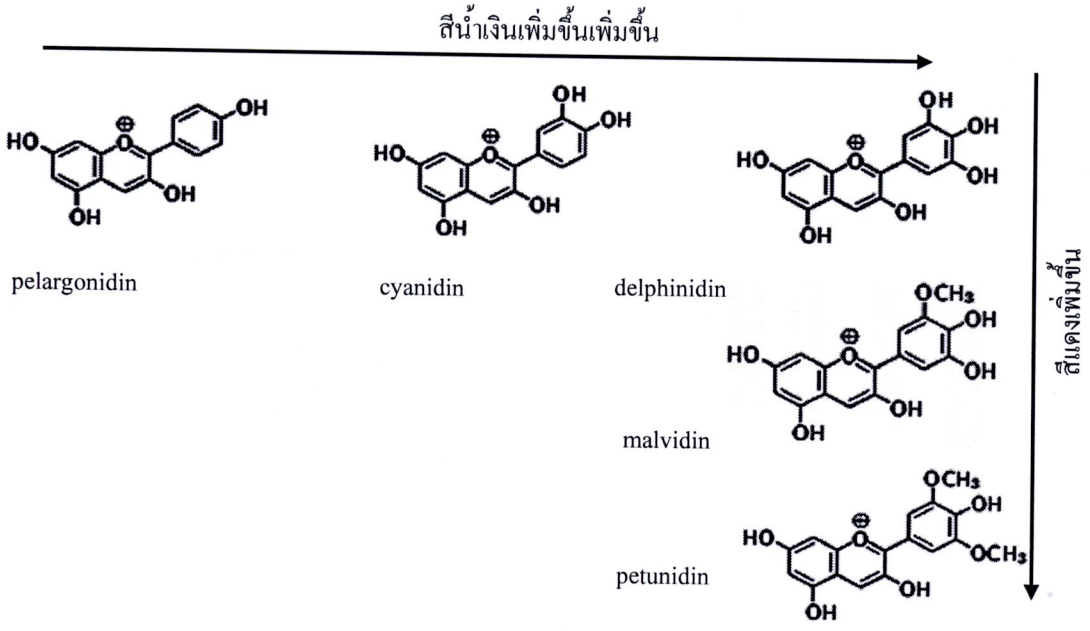
วัตถุดิบ	ปริมาณแอนโธไซยานิน (mg/g)	อ้างอิง
ข้าวเหนียวดำ (Thailand) : (a) พันธุ์ 3437 แพร่ (b) พันธุ์ 0023 ปทุมธานี (c) พันธุ์ก่ำไร่สันป่าตอง (d) พันธุ์ก่ำสุพรรณ (e) พันธุ์ก่ำเปลือกขาว ข้าวเจ้าดำ (Thailand) : (f) พันธุ์สุพรรณ	(a) 0.52 (b) 0.15 (c) 3.10 (d) 1.04 (e) 0.66 (f) 0.69	สุพิศา สมโต (2547)
Canada rice : (a) Black rice (b) Red rice	(a) 3.276 (b) 0.094	Abdel-Aal and others (2006)
Kam Doi Saked (Thailand)	2.54	ดวงกมล ลืมจันทร์ (2550)
Kam Doi Saked (Thailand)	3.52	Tananuwong and Tewaruth (2009)
Purple rice (USA) : (a) inner bran fraction (b)outer bran fraction	(a) 3.5 (b) 29.0	Jang and Xu (2009)
Black rice (Korea): Heugjinjubyeo : (a) whole grain (b) endosperm (c) rice bran Heugkwangbyeo : (a) whole grain (b) endosperm (c) rice bran	 (a)1.89 (b)0.17 (c)10.70 (a)1.00 (b)0.05 (c)7.07	Kong and Lee (2010)

3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของแอนโธไซยานิน

ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความคงตัวของแอนโธไซยานิน เช่น โครงสร้าง อุณหภูมิ แสง ความเป็นกรดด่าง และออกซิเจน เป็นต้น (Mazza 2007)

3.1.1 โครงสร้าง

หากในโครงสร้างวงแหวนฟีนิลมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่เมทอกซิล ($-OCH_3$) เพิ่มขึ้น จะมีผลต่อสีแอนโธไซยานิน เช่น การเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้มากขึ้นจะทำให้มีสีเข้มขึ้นและสีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มขึ้นด้วย การเพิ่มหมู่เมทอกซิลแทนหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3' และ 5' จะทำให้มีสีแดงเพิ่มขึ้น ผลของโครงสร้างของแอนโธไซยานิดินที่มีต่อสีแอนโธไซยานินดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ผลของโครงสร้างของแอนโธไซยานิดินที่มีต่อสีแอนโธไซยานิน
ที่มา: นิธิยา รัตนาปนนท์ (2545)

3.1.2 อุณหภูมิ

มีการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความคงตัวของแอนโธไซยานินในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยต่างให้ผลสรุปทั่วๆไป คือ แอนโธไซยานินจะถูกทำลายด้วยความร้อนระหว่างผ่านกระบวนการต่างๆและการเก็บรักษา Cabrita and others (2000) กล่าวว่าการลดลงของแอนโธไซยานิน ในสารละลาย แอนโธไซยานินเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 เป็น ร้อยละ 60 หลังจากเก็บไว้ 60 วัน เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิการเก็บจาก 10 °ซ เป็น 23 °ซ

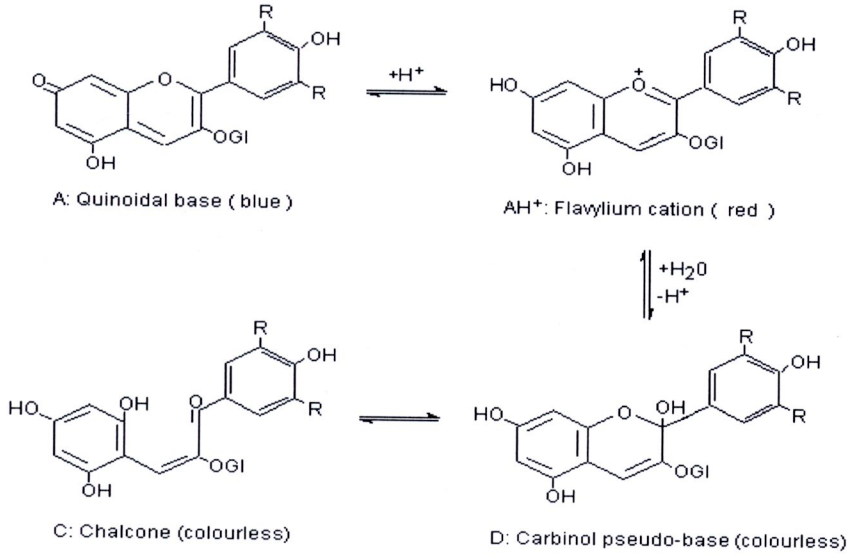
3.1.3 แสง

แสงจะให้ผลที่ตรงกันข้ามกันระหว่าง biosynthesis และการเสื่อมสลายของแอนโธไซยานิน โดยเฉพาะแอนโธไซยานินที่มีหมู่ hydroxyl group ที่ตำแหน่ง C-5 จะสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเนื่องจากแสงได้มากกว่าแอนโธไซยานินที่ไม่มีหมู่ hydroxyl group ที่ตำแหน่ง C-5 นอกจากนี้แสงยังเป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสลายจากความร้อน และการเกิด photo-oxidation ของแอนโธไซยานินจะให้ผลเหมือนกับแอนโธไซยานินที่เสื่อมสลายด้วยความร้อนได้เป็น chalcone (เป็นโครงสร้างที่ไม่มีสี)

3.1.4 ความเป็นกรด-ด่าง

สีของแอนโธไซยานินเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของ pH ในตัวกลางนั้นๆ เมื่อแอนโธไซยานินอยู่ในสารละลายที่เป็นกรดมาก (pH < 0.5) จะอยู่ในรูปของ flavylium cation (red) อยู่เพียงชนิดเดียว ซึ่งทำให้สารละลายมีสีแดง เมื่อ pH สูงขึ้นจนอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อนหรือเป็นกลาง ปริมาณ flavylium cation จะเริ่มลดลงเนื่องจากการเกิด hydration ไปเป็น carbinol base ซึ่งไม่มีสี เมื่อแอนโธไซยานินอยู่ในสารละลายที่มี pH สูง

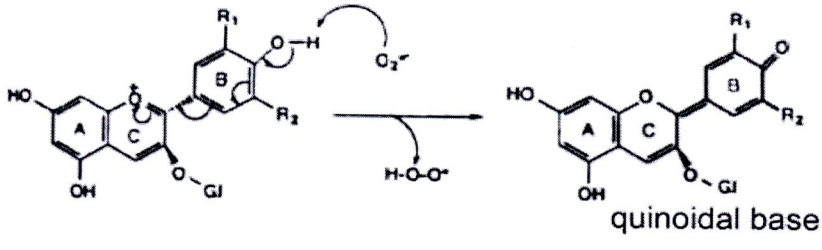
กว่า 4.5 ขึ้นไป หรืออยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง มีเฉพาะโครงสร้างของ carbinol base และ chalcone ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่มีสีและโครงสร้างของ quinoidal base ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีสีน้ำเงินทำให้สารละลายที่ได้มีสีน้ำเงิน การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโธไซยานินเมื่อ pH เปลี่ยน แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอนโธไซยานินเมื่อ pH เปลี่ยน
ที่มา: Brouillard and Delaport (1977)

3.1.5 ออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในสารละลายแอนโธไซยานินมีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น โดยที่โมเลกุลของออกซิเจนจะทำ ปฏิกิริยากับแอนโธไซยานินในตำแหน่งที่ C-2 หรือที่หมู่ hydroxyl group ของ B-ring ได้เป็น carbinol base หรือ chalcone หรือ quinoidal base ซึ่งมีผลทำให้ flavylium cation ลดลง สีแดงของสารละลายจึงลดลง ทั้งนี้อัตราของการเกิดออกซิเดชั่นยังขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย อุณหภูมิ และความเข้มข้นของแอนโธไซยานิน ผลของออกซิเจนต่อความคงตัวของแอนโธไซยานินดังแสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ผลของออกซิเจนต่อความคงตัวของแอนโธไซยานิน
ที่มา: Gaulejac and others (1999)

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานิน

การวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนขึ้นอยู่กับค่า pH แอนโธไซยานินที่เตรียมใหม่ๆ ที่ pH เป็นกลาง จะแสดงลักษณะการดูดกลืนแสงสูงสุดช่วงอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร และช่วงวิสิเบิลที่ความยาวคลื่น 415 และ 520 นาโนเมตร ความยาวคลื่นอาจจะแตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของแอนโธไซยานิน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์โครงสร้างแอนโธไซยานินโดยรวม สามารถใช้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วงวิสิเบิลด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีวิเคราะห์ได้ ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 520 นาโนเมตร (Fabio Galvano 2005)

4. อนุมูลอิสระและสารต้านออกซิเดชัน

มลศิริ วีโรทัย (2545) รายงานว่าอนุมูลอิสระ (free radicals) คือ กลุ่มของสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดไม่เป็นจำนวนคู่ มี unpaired electron ซึ่งทำให้ไม่เสถียร ว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลอื่นๆ เช่น ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต กรดนิวคลีอิก ฯลฯ ซึ่งผลจากการทำปฏิกิริยาอาจก่อให้เกิดความผิดปกติขึ้นในเซลล์ หนังเซลล์ เนื้อเยื่อ หรืออวัยวะต่างๆ และอาจทำให้เกิดโรคบางชนิดเช่น โรคหัวใจและหลอดเลือด มะเร็งในบางอวัยวะ โรคข้ออักเสบ ต้อกระจก เป็นต้น

สารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidants) คือสารที่ทำหน้าที่ต่อต้านหรือยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) สารเหล่านี้อาจพบได้ในธรรมชาติ เช่น วิตามินซี วิตามินอี และเบต้า-แคโรทีน หรือเป็นสารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้เป็นวัตถุเจือปนในอาหาร เช่น BHA, BHT, gallate เป็นต้น ในร่างกายจะมีสารต้านออกซิเดชัน เพื่อทำหน้าที่ยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระ (free radical scavengers) ป้องกันไม่ให้อนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลต่างๆที่จะก่อผลเสียต่อร่างกาย แหล่งที่สำคัญของสารต้านออกซิเดชันได้แก่ อาหารประเภทธัญพืช ผัก และผลไม้ ซึ่งเป็นแหล่งของสารต้านออกซิเดชัน คือ วิตามินซี วิตามินอี เบต้า-แคโรทีน และสารประกอบฟีนอลิค ซึ่งล้วนแต่ช่วยลดหรือป้องกันการเกิดโรคหลายชนิด (สุวลี โล่วิรกรณ์ 2549)

4.1 การวัดกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

ในปัจจุบันสารต้านอนุมูลอิสระได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ได้มีการนำสารต้านอนุมูลอิสระมาใช้ในการส่งเสริมสุขภาพ ป้องกันและรักษาโรคต่างๆ เพราะเชื่อว่าสามารถลดปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านการเกิดอนุมูลอิสระได้ การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีความสำคัญ เพื่อใช้บอกประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระ หากฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีค่าสูงแสดงว่ามีประสิทธิภาพในการต้านการเกิดอนุมูลอิสระสูงด้วยเช่นกัน วิธีที่นิยมใช้ในการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีหลายวิธี เช่น 2,2-diphennyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay, 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS) free radical declorization assay และ oxygen radical absorbance capacity (ORAC) เป็นต้น (จุฬาลักษณ์ ทวีบุตร 2551)

หลักการของ 2, 2-diphennyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay

DPPH เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวัดค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี DPPH มีหลักการที่สารเคมี 2,2-diphennyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) นี้เป็นอนุมูลอิสระสังเคราะห์ที่มีความคงตัว เมื่ออยู่ในรูปสารละลาย DPPH จะมีสีม่วง และสามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 517 nm ทำการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้โดยผสม DPPH• และสารต้านอนุมูลอิสระที่ต้องการทดสอบ (AH) ในหลอดทดลอง ซึ่งเกิดปฏิกิริยากันดังสมการนี้

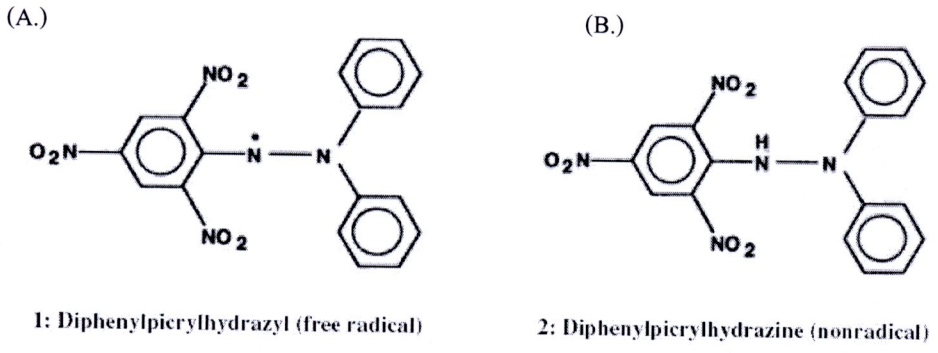
$$DPPH\bullet + (AH) \longrightarrow DPPH\text{-}H + (A\bullet)$$

อนุมูลอิสระใหม่ที่เกิดขึ้น (A•) จะทำปฏิกิริยาต่อไป (radical-radical interaction) โดยกระบวนการ radical disproportionation จนกระทั่งได้เป็นโมเลกุลที่มีความคงตัว (A-A) ดังสมการนี้

$$DPPH\bullet + A\bullet(n) \longrightarrow DPPH\text{-}A\ (n)$$

$$A\bullet + A\bullet \longrightarrow A\text{-}A$$

เมื่ออนุมูลอิสระ DPPH• ได้รับโปรตอนจากสารต้านอนุมูลอิสระที่นำมาทดสอบ สารละลาย DPPH ก็จะเปลี่ยนสีจากสีม่วงเป็นสีเหลือง ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 nm ลดลง



ภาพที่ 15 สูตรโครงสร้างของ DPPH ที่เป็นอนุมูลอิสระ (A.) และไม่เป็นอนุมูลอิสระ (B.)
ที่มา : Molyneux (2004)