บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้าว

ข้าวเป็นอาหารหลักของคนกว่าครึ่งโลก เมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนเปลือกที่ห่อหุ้มอยู่ภายนอก ถัดเข้าไปจะเป็นชั้นรำที่เป็นเยื่อบางๆ ห่อหุ้มเม็ดข้าวขาวและจมูกข้าวไว้ ตัวเม็ดข้าวขาวที่เราบริโภคกันประกอบขึ้นจากโมเลกุลของแป้งที่อัดกันแน่นเป็นนุภาคเล็กๆ นับล้านล้านอนุภาค และส่วนของจมูกข้าวจะอยู่ปลายเมล็ด ซึ่งเป็นส่วนของต้นอ่อนที่จะเจริญงอกงามเป็นต้นข้าวต่อไป ในจมูกข้าวหรือคัพภะของข้าวนี้เป็นแหล่งของเอนไซม์ วิตามินและเกลือแร่ที่เกี่ยวข้องกับการงอกของเมล็ด สำหรับส่วนของรำข้าวนั้นเป็นชั้นที่อุดมด้วยไขมันรำข้าว โปรตีน กากใยอาหาร และวิตามิน ซึ่งเป็นที่น่าเสียดายที่เทคโนโลยีการขัดสีข้าวสมัยใหม่ได้ขัดเอาชั้นรำสีคล้ำๆ นี้ทิ้งไปพร้อมกับจมูกข้าวเหลือแต่ข้าวขาวที่เป็นแป้งล้วนๆ ให้เรารับประทานกัน ผลของการขัดสีข้าวทำให้วิตามิน บี 1 วิตามินบี 3 และวิตามินบี 6 หายไปถึงร้อยละ 90 ธาตุแมงกานีสและฟอสฟอรัสหายไปร้อยละ 50 ธาตุเหล็กหายไปร้อยละ 60 ส่วนกากใยอาหารหายไปเกือบทั้งหมด

การจำแนกชนิดข้าว

ข้าวสามารถจำแนกได้ตามลักษณะส่วนประกอบทางเคมี ดังนี้

1. ข้าวเหนียว (Glutinous rice หรือ Waxy rice) เมล็ดข้าวสารจะมีลักษณะขุ่น มีอะไมโลสเป็นสัดส่วนประกอบทางเคมีประมาณร้อยละ 0.2 และมีอะไมโลเพคตินเป็นส่วนใหญ่ซึ่งทำให้ข้าวเมื่อหุงสุกจะนุ่มจับตัวติดเหนียวเป็นก้อนได้และมีลักษณะใส มีแป้งอะไมโลสอยู่เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย

2. ข้าวเจ้า (Non-glutinous rice) เมล็ดข้าวสารจะมีสีขาวใส มีปริมาณอะไมโลสเป็นสัดส่วนประกอบทางเคมีประมาณร้อยละ 20-34 ที่เหลือเป็นอะไมโลเพคติน ซึ่งมีผลให้ข้าวสารที่นำไปหุงเป็นข้าวสุกจะมีสีขาวขุ่น มีลักษณะร่วนไม่เกาะติดกัน

อัตราส่วนของส่วนประกอบทางเคมีทั้งสองชนิดนี้จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวมีคุณสมบัติการหุงต้มที่ต่างกัน คือ ข้าวที่มีอะไมโลสสูงจะดูดน้ำและขยายปริมาตรในระหว่างการหุงต้มได้มากกว่าข้าวอะไมโลสต่ำ ส่งผลให้ข้าวสุกมีลักษณะร่วน ส่วนข้าวที่มีอะไมโลสต่ำจะดูดน้ำและขยายตัวได้น้อยกว่าข้าวที่มีอะไมโลสสูง ข้าวจะเหนียวและนุ่มกว่า

องค์ประกอบของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวเป็นผลชนิด caryopsis เนื่องจากส่วนที่เป็นเมล็ดเดี่ยว (single seed) ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล (pericarp) เมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนใหญ่ๆ 2 ส่วนคือ

1. ส่วนที่ห่อหุ้ม เรียกว่า แกลบ (hull หรือ husk) ประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) หาง (awn) ขั้วเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmas)

2. ส่วนที่รับประทานได้ เรียกว่า ข้าวกล้อง (caryopsis หรือ brown rice) หรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออกแล้ว ประกอบด้วย

2.1 เยื่อหุ้มผล (pericarp) หรือ fruit coat ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้นด้วยกัน คือ epicarp mesocarp และ endocarp ซึ่งเยื่อหุ้มผลมีลักษณะเป็น fibrous ผนังเซลล์ประกอบด้วยโปรตีน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส

2.2 เยื่อหุ้มเมล็ด (tegmen หรือ seed coat) อยู่ถัดจาก pericarp เข้าไปประกอบด้วยเนื้อเยื่อสองชั้นเรียงกันเป็นแถวเป็นที่อยู่ของสารประเภทไขมัน (fatty material)

2.3 เยื่อแอลิวโรน (aleurone) อยู่ต่อจาก tegmen ห่อหุ้ม ข้าวสาร (starchy endosperm) และ คัพภะ (embryo) ชั้นแอลิวโรนมีโปรตีนสูง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยไขมัน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

2.4 ส่วนที่เป็นแป้ง (starch endosperm) หรือส่วนที่เป็นข้าวสารอยู่ชั้นในสุดของเมล็ด ประกอบด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่และมีโปรตีนอยู่บ้าง แป้งในเมล็ดข้าวมี 2 ชนิด คือ อะไมโลเปคติน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของ D-glucose ที่ต่อกันเป็น branch chain และอะไมโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของ D-glucose ที่ต่อกันเป็น linear chain สำหรับส่วนประกอบของแป้งทั้ง 2 ชนิด มีสัดส่วนแตกต่างกันไปตามชนิดข้าว ในข้าวเหนียวจะมีอะไมโลสอยู่ประมาณร้อยละ 0-2 ส่วนที่เหลือเป็นอะไมโลเปคติน ข้าวเจ้ามีอะไมโลสมากกว่าคือประมาณร้อยละ 7-33 ของน้ำหนักข้าวสาร

2.5 คัพภะ (embryo) อยู่ติดกับ endosperm ทางด้าน lemma เป็นส่วนที่จะเจริญเป็นต้นต่อไป embryo ประกอบด้วยต้นอ่อน (plumule) รากอ่อน (radicle) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (coleoptile) เยื่อหุ้มรากอ่อน (coleorhiza) ท่อน้ำท่ออาหาร (epiblast) และใบเลี้ยง (scutellum) คัพภะเป็นส่วนที่มีโปรตีนและไขมันสูง

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

แป้ง (Starch) เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่จัดอยู่ในกลุ่มโฮโมโพลีแซคคาไรด์ (homo-polysaccharide หรือ homoglycans) พบในรูปของหน่วยอิสระเป็นเม็ดเล็กๆ อัดกันแน่น เรียก เม็ดแป้ง (starch granule) ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสเป็นโมโนแซคคาไรด์เพียงชนิดเดียวแต่เชื่อมต่อกันเป็นสายโพลิเมอร์ 2 แบบ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของแป้ง คือ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน

ซึ่งทั้งอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะอยู่ในรูป helix ซึ่งสตาร์ชจากข้าวเจ้าและข้าวเหนียวจะมีคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพที่แตกต่างกันไปบ้างดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมี–กายภาพของสตาร์ชข้าวเจ้าและข้าวเหนียว

คุณสมบัติ	สตาร์ชข้าวเจ้า	สตาร์ชข้าวเหนียว
อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจล ($^{\circ}C$)	58 – 79	58 – 78.5
ขนาดเม็ดสตาร์ช (ไมโครเมตร)	1.6 – 8.7	1.9 – 8.1
ความหนาแน่น (แทนที่โดยไลซีน), กรัม/มิลลิกรัม	1.46 – 1.51	1.48 – 1.50
ความสามารถในการจับไอโอดีน (ร้อยละ)	2.36 – 6.96	0.15 – 0.86
โปรตีนที่เหลืออยู่ (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	0.02 – 0.12	0.01 – 1.64

ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2539)

ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต

รำข้าว

การผลิตข้าวเหนียวส่วนใหญ่ผลพลอยได้ที่ออกมาจากกระบวนการขัดขาว ได้แก่ รำข้าว คือ ส่วนประกอบของเนื้อเยื่อสีน้ำตาลที่อยู่ถัดจากเปลือกหุ้มเมล็ด (hull) หรือแกลบ (hull) ประกอบด้วย เยื่อหุ้มผล (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (tegmen) และเยื่ออัลลูโรน (aleurone later) และจมูกข้าว (germ) ที่ถูกขัดออกในระหว่างกระบวนการขัดสีข้าว (milling) ในกระบวนการขัดสีที่รุนแรงอาจมีบางส่วนของเอมบริโอ (embryo) เกิดการแตกหักและสตาร์ชส่วนนอกของเอนโดสเปิร์ม (endosperm) หลุดปะปนออกมารวมกับรำข้าว โดยทั่วไปจะแบ่งรำเป็นสองส่วนคือ รำหยาบ (bran) ได้จากการขัดผิวเมล็ดข้าวกล้องรำนี้จะมีสีน้ำตาล และรำขาวหรือรำละเอียด (white bran หรือ polish) ได้จากการขัดขาวและขัดมัน โดยในรำหยาบจะมีโปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า แร่ธาตุที่จำเป็น และวิตามินบางชนิดมากกว่ารำละเอียด ยกเว้นคาร์โบไฮเดรต ดังนั้นจึงมีการนำรำข้าวไปสกัดน้ำมัน โปรตีน และสารอาหารอื่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นจากเดิมที่ใช้เป็นอาหารสัตว์เท่านั้น ซึ่งรำข้าวที่ปรับปรุงคุณภาพดีแล้วสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารได้หลายชนิด และการที่รำเป็นแหล่งของสารอาหารต่างๆ ที่มีปริมาณมากกว่าส่วนอื่นของเมล็ดข้าว รำข้าวเป็นผลพลอยได้จากการขัดสีข้าว ปริมาณของโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวที่ได้จากกระบวนการขัดสีข้าวนับจากการกะเทาะเปลือกหุ้มแข็ง (แกลบ) ออกไปแล้ว จะขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวและสภาวะแวดล้อมที่ปลูกจนถึงกรรมวิธีในการขัดผิวเมล็ดข้าวกล้อง การขัดขาวและการขัดมันให้ได้ข้าวสารขาวและมันวาว

คุณค่าทางอาหารและสารสำคัญในรำข้าว

รำข้าวมีคุณค่าทางอาหารที่สำคัญหลายอย่าง ในข้าวกล้องมีคาร์โบไฮเดรตให้พลังงานแก่ร่างกาย โปรตีนช่วยซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ ไขมันให้พลังงานและความอบอุ่นแก่ร่างกาย เส้นใยช่วยเพิ่มกากอาหารทำให้ขับถ่ายสะดวก ป้องกันอาการท้องผูกและการเป็นมะเร็งลำไส้ใหญ่ วิตามินบี 1 (Thiamin) ช่วยป้องกัน โรคเหน็บชา ช่วยการทำงานของระบบประสาทเป็นไปอย่างมี ประสิทธิภาพ วิตามินบี 2 (Riboflavin) ป้องกันปากนกกระจอก ช่วยเผาผลาญอาหารให้เป็นพลังงาน ไนอาซิน (Niacin) ช่วยในการทำงานของระบบผิวหนังและระบบประสาท แคลเซียม - ฟอสฟอรัส บำรุงกระดูกและฟันให้แข็งแรง เหล็กช่วยสร้างเม็ดเลือดแดง (ตารางที่ 2.2) นอกจากนั้นยังมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น GABA, gamma-oryzanol และแอลฟา-โทโคเฟอรอล (ตารางที่ 2.3) เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของรำหยาบและรำละเอียดจากข้าว

องค์ประกอบทางเคมี (ความชื้น 14%)	รำหยาบ	รำละเอียด
โปรตีน (%N×6.25)	12.0-15.6	11.8-13.0
ไขมัน (%)	15.0-19.7	10.1-12.4
เส้นใยหยาบ (%)	7.0-11.4	2.3-3.2
คาร์โบไฮเดรต (%)	34.1-52.3	51.1-55.0
เถ้า (%)	6.6-9.9	5.2-7.3
เกลือแร่		
แคลเซียม (mg/g)	0.3-1.2	0.5-0.7
แมกนีเซียม (mg/g)	5-13	6-7
ฟอสฟอรัส (mg/g)	11-25	10-22
ไฟทิน ฟอสฟอรัส (mg/g)	9-22	12-17
ซิลิกา (mg/g)	6-11	2-3
สังกะสี (mg/g)	43-258	17-60
วิตามิน		
ไทอะมิน (mg/g)	12-24	3-9
ไรโบเฟลวิน (mg/g)	1.8-4.3	1.7-2.4
ไนอะซิน (mg/g)	267-499	224-389

ที่มา : Luh and Benedito de Barder (1991)

ตารางที่ 2.3 การสะสมวิตามินในรำข้าวและข้าวสาร

ส่วนของข้าว	% การสะสมของวิตามิน (ต่อ 100% ของวิตามินทั้งหมด)			
	ไทอะมิน	ไรโบเฟลวิน	ไนอะซิน	แอลฟา-โทโคเฟอรอล
รำ	78	47	67	95
รำขัดขาว (bran)	65	39	54	-
รำขัดมัน (polish)	13	8	13	-
คัพภะ	-	-	-	95
ข้าวสาร	22	53	33	5

ที่มา : Juliano (1995)

สรีระของเมล็ดข้าว

การพัฒนาของเมล็ดข้าว

การพัฒนาของเมล็ดข้าวเกิดจากการผสมเกสร (pollination) และการผสมพันธุ์ (double fertilization) การผสมเกสรอาจเกิดก่อนหรือหลังดอกบานเล็กน้อย ดอกข้าวจะบานหลังรวงข้าวโผล่พ้นกาบใบธงได้ 1-2 วัน และเริ่มบานจากปลายลงมาหาโคนรวงใช้เวลาประมาณ 7 วันจึงจะบานครบทุกดอก การผสมเกสรเริ่มจากอับเกสรตัวผู้ปล่อยละอองเกสรตกลงบนพู่รับละอองเกสร หลังจากการผสมเกสรจะเกิดการผสมพันธุ์ โดยละอองเกสรตัวผู้จะส่งเชื้อเพศผู้หรือสเปิร์มนิวเคลียสลงไปตามก้านพู่เพื่อผสมกับเชื้อเพศเมีย สเปิร์มนิวเคลียสหนึ่งตัวเข้าไปผสมกับไข่แล้วเจริญต่อไปเป็นคัพภะ ส่วนสเปิร์มนิวเคลียสอีกหนึ่งตัวจะผสมกับโพลาร์นิวคลีไอ (polar nuclei) แล้วเจริญต่อไปเป็นเนื้อเมล็ดข้าว ซึ่งใช้ระยะเวลาทั้งหมดประมาณ 12-24 ชั่วโมง (ชาญ มงคล, 2536) การพัฒนาเมล็ดข้าวแบ่งเป็น 3 ระยะ คือ

1.1 ระยะข้าวน้ำนม ใช้เวลาประมาณ 7 วัน หลังผสมเกสรและผสมพันธุ์ ระยะต้นๆ ลักษณะภายในของเมล็ดข้าวจะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนม เปลือกของเมล็ดมีสีเขียว

1.2 ระยะข้าวเม่า หรือเป็นไต หรือเป็นโด (dough stage) ใช้เวลาประมาณ 14-21 วัน หลังผสมเกสร เปลือกใหญ่และเปลือกเล็กเริ่มแข็ง มีสีเขียวอมเหลืองหรืออมน้ำตาล เนื้อในเมล็ดซึ่งเป็นน้ำนมจะมีน้ำน้อยลง เหนียวและแข็งขึ้นตามลำดับ

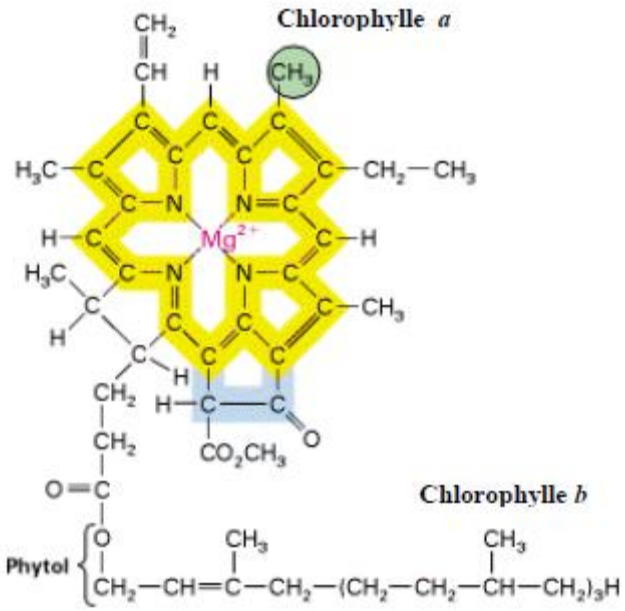
1.3 ระยะเมล็ดแก่เต็มที่ หรือระยะเก็บเกี่ยว (maturation stage) ใช้เวลาประมาณ 30 วันหลังผสมเกสร เมล็ดมีโครงสร้างสมบูรณ์เต็มที่ทั้งขนาดและความแข็งของเปลือก สีเปลือกที่สุกที่เต็มมีสีน้ำตาลทอง เหลืองทอง อาจมีสีน้ำตาลเข้ม น้ำตาลม่วง น้ำตาลดำ ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ส่วนเนื้อของเมล็ดมีสีขาว

สารสี (pigment) ในข้าว

สารสีของเปลือกและเมล็ดข้าว ประกอบด้วยสารสีหลายประเภทตามขั้นตอนการพัฒนาของเมล็ด โดยมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ระยะข้าวน้ำนมที่มีสีของเปลือกเมล็ดเป็นสีเขียว ซึ่งสารสีเขียวนี้เป็นสารสีกลุ่มคลอโรฟีลล์ (chlorophyll pigment) เมื่อเข้าสู่ระยะข้าวเม่าเปลือกเริ่มเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวอมเหลืองอมน้ำตาลของสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoid pigment) จากนั้นเมื่อเมล็ดแก่เต็มที่สีเปลือกเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลทอง เหลืองทอง น้ำตาลเข้ม น้ำตาลม่วง น้ำตาลดำ ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวซึ่งสารสีที่พบคือสารสีแอนโทไซยานิน (anthocyanin pigment) (Reddy *et al*., 1995) สำหรับเมล็ดข้าว เนื้อในเมล็ดมีสีขาว ส่วนผิวของเมล็ดข้าวในส่วนเยื่อหุ้มผล มีสารสีเป็นส่วนประกอบทำให้ข้าวกล้องมีสีเหลืองอ่อน น้ำตาล แดง และม่วงเข้ม ซึ่งสารสีน้ำตาล แดง และม่วงเข้ม เป็นสารสีของแอนโทไซยานินเช่นกัน (Reddy *et al*., 1995) ข้าวกล้องที่มีสีเข้มต้องใช้เวลาในการขัดขาวนานมากหรือใช้แรงกดมาก เพื่อทำให้ส่วนของรำที่เป็นสีเข้มหลุดออก เป็นผลให้ข้าวหักมากปริมาณข้าวเต็มเมล็ดน้อย ข้าวกล้องที่มีสีอ่อนเป็นที่นิยม เช่น เหลือง หรือน้ำตาล (เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข, 2534) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวกล้องนั้นเกิดจากปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง (non enzymatic) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโนอิสระ อัลดีไฮด์ และคีโตน ซึ่งพบมากบริเวณชั้นนอกของข้าวสารโดยมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งอาจเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของสารสีจากบริเวณชั้นอลูโรนที่ไปยังเอนโดสเปิร์ม (Bason *et al*., 1990) และสารสีจากเปลือก ซึ่งส่วนเปลือกจะมีสารสีในกลุ่ม คลอโรฟีลล์ แคโรทีนอยด์ แอนโทไซยานิน ที่อาจจะละลายน้ำออกมาได้และซึมผ่านเข้าไปในส่วนของเอนโดเสปริ์มในระหว่างการแช่ข้าวเปลือก สารสีที่สำคัญ ได้แก่

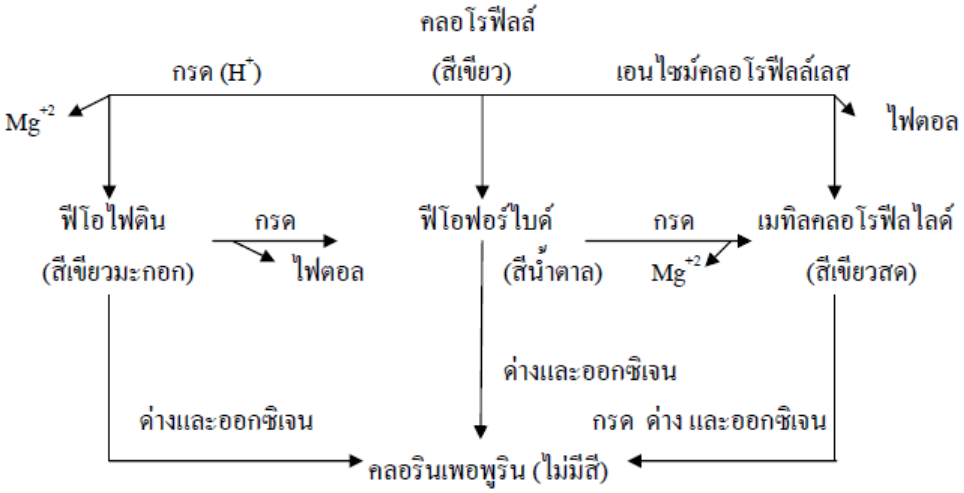
1. คลอโรฟีลล์

คลอโรฟีลล์เป็นรงควัตถุสีเขียวที่พบในพืชทั่วไป คลอโรฟีลล์ที่พบในพืชมี 2 ชนิด คือ คลอโรฟีลล์เอและบี สำหรับคลอโรฟีลล์ที่พบในพืชสีเขียวชั้นสูงจะมีอัตราส่วนของคลอโรฟีลล์เอต่อคลอโรฟีลล์บีประมาณ 3 : 1 คลอโรฟีลล์เอ มีสูตรโครงสร้างเป็นเตตระไพโรล ซึ่งวงแหวนพอร์ไฟรินอยู่ในรูปไดไฮโดร มีแมกนีเซียมเติมอยู่ตรงกลางโมเลกุล มีหมู่เมทิลที่ตำแหน่ง 1 3 5 และ 8 มีหมู่ไวนิล (vinyl) ที่ตำแหน่ง 2 หมู่เอทิลที่ตำแหน่ง 4 หมู่โพรพิโอเนต (propionate) ที่ตำแหน่ง 7 ถูกเอสเทอริไฟด์ด้วยไฟติลแอลกอฮอล์ (phytyl alcohol) มีหมู่คีโต (keto) ที่ตำแหน่ง 9 และมีหมู่คาร์โบเมทอกซี (carbomethoxy) ที่ตำแหน่ง 10 ทำให้คลอโรฟีลล์เอมีสูตรโมเลกุล $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ (ภาพที่ 2.1) ไฟติลแอลกอฮอล์หรือไฟตอล (phytol) เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่มีจำนวนคาร์บอน 20 อะตอม โครงสร้างเป็นไอโซพรีนอยด์ (isoprenoid) (Clydesdale and Franceis, 1976)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของคลอโรฟีลล์เอ คลอโรฟีลล์บี และไฟตอล
ที่มา : Clydesdale and Franceis (1976)

เมื่อคลอโรฟีลล์ได้รับความร้อน มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยา pheophytinization โดยแมกนีเซียมไอออนถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนอะตอม ทำให้สีเขียวของคลอโรฟีลล์เปลี่ยนเป็นฟีโอไฟติน (pheophytin) ซึ่งมีสีน้ำตาล (olive-brown) (ภาพที่ 2.2) ในเปลือกของข้าวคลอโรฟีลล์ค่อยๆ สลายตัวเมื่อแก่เต็มที่ และปรากฏสารสีของแคโรทีนอยด์ขึ้นมาอย่างเด่นชัด

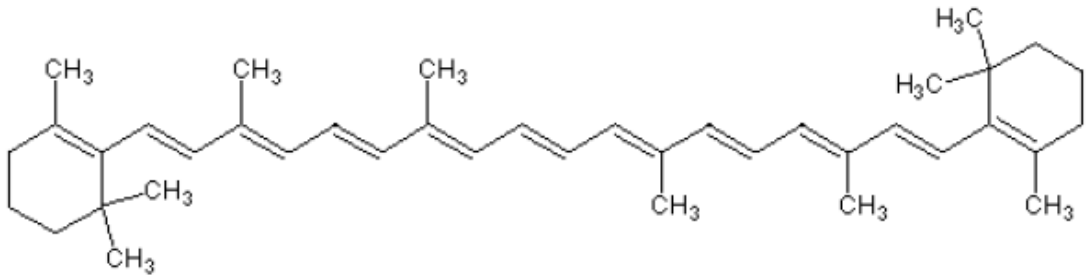


ภาพที่ 2.2 การสูญเสียแร่ธาตุแมกนีเซียมในโครงสร้างของคลอโรฟีลล์
ที่มา : Von Elbe and Schwartz (1996)

2. แคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์เป็นสารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เป็นรงควัตถุที่ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีในน้ำมันและตัวทำละลายอินทรีย์ สีของแคโรทีนอยด์ผันแปรไปตามจำนวนของพันธะคู่ (conjugated double bond) ในโมเลกุล ถ้ามีจำนวนพันธะคู่มากทำให้มีสีแดงเข้มขึ้น จำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ที่น้อยที่สุดมี 7 คู่ ซึ่งให้สีเหลือง พันธะคู่อาจอยู่ในรูป *cis* หรือ *trans* ก็ได้ แต่แคโรทีนอยด์ที่พบในพืชส่วนใหญ่อยู่ในรูป all-trans อาจพบ cis บ้างเป็น mono-*cis* หรือ di-*cis* แต่น้อยมาก แคโรทีนอยด์ที่มีโครงสร้างอยู่ในรูป all-*trans* มีสีเข้ม ถ้ามีจำนวนพันธะคู่ที่อยู่ในรูป *cis* เพิ่มมากขึ้นทำให้สีจางลง ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนจาก *trans* เป็น *cis* คือ แสง ความร้อน และกรด เมื่อได้รับความร้อนจะเกิด *trans-cis* isomerization ได้ หากอยู่ในรูป *cis* มากขึ้นทำให้แคโรทีนอยด์สลายตัวได้ง่ายเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Von Elbe and Schwartz, 1996)

การเปลี่ยนแปลงของแคโรทีนอยด์ ระหว่างได้รับความร้อนคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเสื่อมสลายหรือชราภาพ (senescence) ของผักและผลไม้ เช่น การทำสับปะรดกระป๋องความร้อนในกระบวนการแปรรูปทำให้เกิดกรด ซึ่งเปลี่ยนแคโรทีนอยด์เป็น *cis* isomer โดยปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) ของแคโรทีนอยด์ทำให้มีสีจางลง (Von Elbe and Schwartz, 1996) การทำ extrusion แป้งข้าวโพดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดสารสีที่มีสเปกตรัมของ 15-*cis*-β-carotene (Deman, 1990)



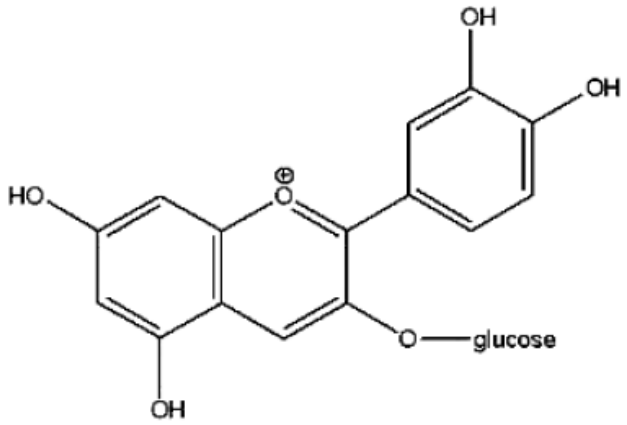
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของ β-Carotene
ที่มา : Lee (1975)

3. แอนโทไซยานิน

แอนโทไซยานินเป็นสารสีในกลุ่มฟลาโวนอยล์ที่ละลายในน้ำ พบในแวคิวโอลของเซลล์ในชั้น epidermis ของพืช ทำให้เกิดช่วงสีแดง ม่วง และน้ำเงินขึ้นอยู่กับชนิดของพืชนั้นๆ โดยถูกบดบังด้วยสีเขียวและสีเหลืองของคลอโรฟิลล์และคาโรทีนอยด์ในขณะที่พืชยังอ่อนหรือไม่บริบูรณ์

(immature) เมื่อข้าวเจริญเติบโตเต็มที่ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เปลือกลดลง และมีการสังเคราะห์แอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นระหว่างการชราภาพทำให้เกิดสีแดง ม่วง และน้ำเงิน บริเวณเปลือกข้าวและชั้นอลูโรน

แอนโทไซยานินเป็นสารประกอบ glycoside ของ anthocyanidine ซึ่งเชื่อมต่อกับน้ำตาล 1 ตัวหรือมากกว่า 1 ตัว น้ำตาลที่เป็นส่วนประกอบของโมเลกุลแอนโทไซยานินมี 5 ชนิด คือ glucose, rhamnose, galactose, xylose และ arabinose มักมีโมเลกุลน้ำตาลเกาะที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 3 แอนโทไซยานิดินที่สำคัญ มี 6 ชนิดคือ pelargonidin, cyanidin, delphinidin, peonidin, petunidin และ malvidin สำหรับรูปของแอนโทไซยานินที่พบมากที่สุดในพืชคือ cyanidin-3- rutinoside (Mazza and Maniati, 1993)



ภาพที่ 2.4 โครงสร้าง flavylium cation
ที่มา : Mazza and Maniati (1993)

แอนโทไซยานินที่พบในพืชมีคุณสมบัติที่ไม่เสถียรโดยมีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะปัจจัยต่างๆ เช่น แสง ออกซิเจน ความร้อน พีเอช เอนไซม์ในกลุ่มเปอร์ออกไซด์ ไอออนของโลหะ โมเลกุลของน้ำตาล ฟีนอล และสารสีอื่นๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแอนโทไซยานินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีที่ปรากฏขึ้นด้วย ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงแอนโทไซยานิน เช่น พีเอช เมื่อข้าวสุกแก่เต็มที่เข้าสู่ระยะบริบูรณ์มีปริมาณกรดลดลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช ซึ่งในสภาพที่เป็นกรดทำให้แอนโทไซยานินมีสีน้ำตาลแดง แต่เมื่อระดับพีเอชสูงขึ้นแอนโท-ไซยานินแสดงออกเป็นสีน้ำตาลเข้ม สำหรับผลไม้มีรายงานจากการศึกษาของ Lee and Wicker (1991) พบว่าสีแดงที่ปรากฏของเปลือกลิ้นจี่เกี่ยวข้องกับความคงตัว (stability) ของโครงสร้างแอนโทไซยานินทั้งนี้อยู่กับพีเอชของเซลล์เป็นหลัก เช่น ผลลิ้นจี่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วภายหลังการเก็บเกี่ยว นอกจากนี้สภาวะที่มีการใช้สารเคมีร่วมในการแช่เปลือกข้าวหรือผลไม้ เช่น

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำให้เกิดการฟอก (bleach) สีของแอนโทไซยานิน ถ้าใช้ความเข้มข้นที่ต่ำสีของแอนโทไซยานินอาจเปลี่ยนคืนกลับมาได้ แต่ถ้าใช้ที่ความเข้มข้นสูงพบว่าแอนโทไซยานินอาจมีการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร (Litcher, 2000)

ส่วนแบ่งการตลาดข้าวของไทย

ภูมิภาคเอเชียเป็นแหล่งเพาะปลูกข้าวที่สำคัญของโลก มีผลผลิตคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 90% ของผลผลิตทั้งหมดของโลก ซึ่งการผลิตของหลายประเทศเน้นผลิตเพื่อการบริโภคภายในประเทศเป็นหลัก โดยเฉพาะจีน (ผู้บริโภครายใหญ่สุดของโลก) อินเดียและอินโดนีเซีย มีผลให้การค้าข้าวในตลาดโลกมีสัดส่วนเพียง 8-9 % ของผลผลิตทั้งหมด โดยประเทศผู้ส่งออกหลัก (ข้อมูลปี 2558) คือ ไทย สัดส่วนการส่งออกประมาณ 24% ของปริมาณการส่งออกข้าวทั่วโลก ตามด้วยอินเดีย (22%) และเวียดนาม (17%) ปัจจุบันไทยมีพื้นที่นาข้าวประมาณ 62 ล้านไร่ทั่วประเทศ ให้ผลผลิตข้าวเปลือก 31 ล้านตันต่อปี (หรือ 20.5 ล้านตันข้าวสาร) การปลูกข้าวของไทยเน้นพึ่งน้ำฝน มีช่วงเวลาเพาะปลูกในเดือน ก.ค.-ก.ย.ของทุกปี ซึ่งเรียกว่า “ข้าวนาปี” มีผลผลิตประมาณ 85% ของผลผลิตรวม และอีก 15% เป็นข้าวที่ปลูกนอกฤดูเพาะปลูกซึ่งอาศัยน้ำจากระบบชลประทาน ซึ่งเรียกว่า “นาปรัง”

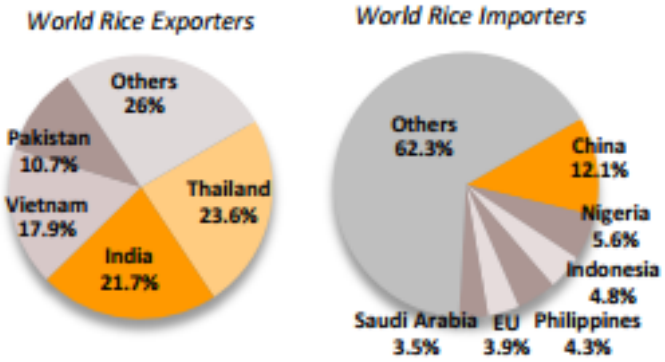
ไทยมีผลผลิตข้าวเกินความต้องการบริโภคค่อนข้างมาก เนื่องจากมีการขยายพื้นที่ปลูกและการพัฒนาพันธุ์ข้าวมาอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ความต้องการบริโภคข้าวของตลาดในประเทศมีเพียงปีละ 10-12 ล้านตันข้าวสาร และเป็นตลาดที่มีอัตราการเติบโตในแต่ละปีค่อนข้างต่ำ ท่าให้การส่งออกข้าวของไทยจึงมีสัดส่วนสูงขึ้นเป็นลำดับ ปัจจุบันส่งออกมากกว่า 50% ของผลผลิตข้าวทั้งหมด ข้าวไทยถือว่าได้เปรียบด้านคุณภาพและเป็นที่ยอมรับมาช้านานในตลาดโลก ทำให้ยังคงเป็นที่ต้องการของตลาด โดยการส่งออกข้าวไทยแบ่งเป็นข้าวขาว (คิดเป็นสัดส่วน 50% ของปริมาณการส่งออก) ข้าวนึ่งและข้าวหอมมะลิ (คิดเป็นสัดส่วน 24% และ 14% ตามล่าดับ) ที่เหลือเป็นการส่งออกปลายข้าวและข้าวเหนียว โดยไทยมีการส่งออกข้าวไป 150 ประเทศทั่วโลก มีตลาดส่งออกสำคัญคือ จีน (สัดส่วน 10%) สหรัฐอเมริกา (9%) ฟิลิปปินส์ (7%) ประเทศแถบแอฟริกา และ อาเซียน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการแข่งขันในตลาดค้าข้าวโลกทวีความรุนแรงขึ้น

ข้าวขาว เป็นข้าวที่ไทยส่งออกในสัดส่วนถึง 50% (ในเชิงปริมาณ) จัดเป็นข้าวที่มีราคาถูกและการแข่งขันทางด้านราคาในตลาดโลกค่อนข้างรุนแรง อีกทั้งในตลาดโลกมีผู้ผลิตรายใหม่ที่มีศักยภาพในการส่งออกเพิ่มขึ้น อาทิ กัมพูชา และ พม่า

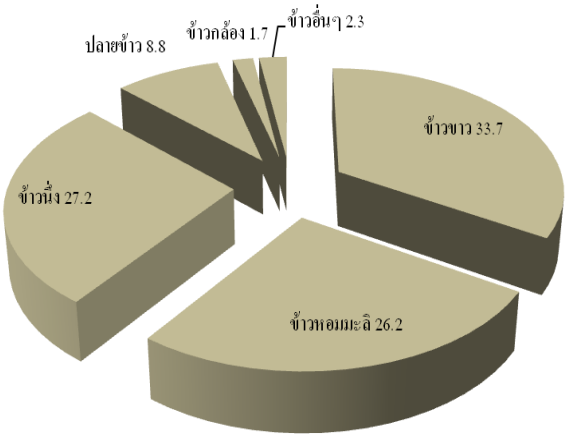
ข้าวหอมมะลิ จัดเป็นข้าวคุณภาพราคาสูง ปัจจุบันเผชิญการแข่งขันเพิ่มขึ้น จากข้าวบาสมาติของอินเดีย อีกทั้งสหรัฐฯ และเวียดนามยังมีการพัฒนาพันธุ์ข้าวคุณภาพสูงใกล้เคียงข้าวหอมมะลิของไทย

ข้าวนึ่ง ตลาดส่วนใหญ่อยู่ในทวีปแอฟริกา ปัจจุบันไทยมีคู่แข่งสำคัญ คือ อินเดียและคู่แข่งรายใหม่อย่างปากีสถานและอุรุกวัย ซึ่งผลิตข้าวนึ่งได้ในราคาต่ำกว่าไทยมาก

โดยเฉพาะข้าวนึ่ง โดยสัดส่วนการส่งออกข้าวนึ่งของไทยมีสัดส่วน ร้อยละ 27.2 ของการส่งออกข้าวทั้งหมด สำหรับประเทศที่นิยมบริโภคข้าวนึ่งอยู่ในทวีปแอฟริกา เอเชียใต้ และประเทศในตะวันออกกลาง ซึ่งการส่งออกข้าวนึ่งของอินเดียเริ่มมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และจะกลับมาแย่งตลาดข้าวนึ่งเหล่านี้คืนไปจากไทย ดังภาพที่ 2.5 และ 2.6 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559)



ภาพที่ 2.5 สัดส่วนการส่งออกข้าวและนำเข้าในตลาดโลก ปี 2558 (USDA)
ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2559)



ภาพที่ 2.6 สัดส่วนประเภทข้าวส่งออกของไทย (กระทรวงพาณิชย์)
ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2559)

แนวทางการปรับตัวของผู้ส่งออกข้าวไทย ซึ่งต้องแยกการปรับตัวตามประเภทของข้าว เนื่องจากข้าวแต่ละประเภทเผชิญการแข่งขันในตลาดที่แตกต่างกัน ซึ่งการส่งออกข้าวนึ่งของไทยครองตลาดโลก ในช่วงที่อินเดียงดการส่งออก โดยมีคู่แข่งอย่างอุรุกวัยที่เข้ามาสร้างความผันผวนให้กับตลาดส่งออกในบางช่วง แต่ก็เป็นเพียงช่วงระยะสั้นๆ เท่านั้น แต่การกลับเข้ามาส่งออกข้าวนึ่งของอินเดีย ทำให้ตลาดข้าวนึ่งมีการแข่งขันอย่างรุนแรง เนื่องจากราคาข้าวนึ่งของอินเดียอยู่ในระดับต่ำกว่าไทย โดยในช่วงเดือนมกราคม 2555 ราคาข้าวนึ่งของอินเดียอยู่ในระดับ 470 ดอลลาร์/ตัน

ในขณะที่ข้าวนึ่งไทยอยู่ในระดับ 529 ดอลลาร์/ตัน ส่งผลให้ประเทศผู้รับซื้อข้าวนึ่ง ซึ่งส่วนใหญ่จำกัดอยู่เฉพาะในแอฟริกาและตะวันออกกลางหันไปซื้อข้าวนึ่งจากอินเดีย ผู้ส่งออกข้าวนึ่งของไทยคงต้องรอจังหวะการส่งออกข้าวนึ่งหลังจากผู้ส่งออกอินเดีย ซึ่งในช่วงที่ชะลอการผลิตข้าวนึ่งก็อาจปรับมาผลิตข้าวขาวทั้งเพื่อส่งออกและป้อนตลาดในประเทศไปก่อน หรือการเจาะขยายตลาดข้าวนึ่งในยุโรปและสหรัฐฯ ซึ่งจัดว่าเป็นตลาดข้าวนึ่งตลาดบน หรือตลาดที่บริโภคข้าวนึ่งในฐานะที่เป็นข้าวเพื่อสุขภาพ แม้ว่าปัจจุบันตลาดยังมีขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเทียบกับตลาดในแอฟริกาและตะวันออกกลาง แต่ก็เป็นตลาดที่น่าสนใจ เนื่องจากมีแนวโน้มเติบโตอยู่ในเกณฑ์ดี

การที่รัฐบาลอินเดียอนุมัติให้ส่งออกข้าวขาวและข้าวนึ่งโดยเสรีในปี 2555 หลังจากที่ในช่วงปลายปี 2554 อินเดียกลับมาส่งออกข้าวขาวและข้าวนึ่งโดยกำหนดโควตาไว้ที่ 2 ล้านตัน นับว่าส่งผลกระทบต่อตลาดข้าวโลกอย่างมาก โดยอินเดียเบียดแย่งสัดส่วนตลาดข้าวไทย โดยเฉพาะตลาดข้าวนึ่งทั้งในแอฟริกาและบังคลาเทศ รวมทั้งยังส่งผลให้ราคาข้าวในตลาดโลกมีแนวโน้มลดลง โดยทั้งไทยและเวียดนาม ซึ่งเป็น ผู้ส่งออกข้าวอันดับหนึ่งและสองของโลก ต้องหันมาปรับลดราคาส่งออกเพื่อแข่งขันกับอินเดีย ผู้ส่งออกข้าวของไทยต้องเร่งปรับตัวรับกับสภาพตลาดข้าวที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการเร่งเจาะขยายตลาดข้าวคุณภาพดี รวมทั้งหันมาขยายการผลิตผลิตภัณฑ์ข้าว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ข้าวนึ่งที่มีมูลค่าต่ำให้มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งนอกจากจะเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์แล้ว ยังช่วยส่งเสริมขีดความสามารถในการแข่งขันของข้าวนึ่งของไทยในตลาดโลก และยังเป็นการสร้างตลาดทั้งในประเทศและตลาดส่งออก เพื่อหลีกเลี่ยงการแข่งขันอีกด้วย

ข้าวนึ่ง

ชาวอินเดียที่ยากจนรู้จักกระบวนการแปรรูปข้าวนึ่งมาตั้งแต่สมัยโบราณ โดยไม่มีหลักฐานแน่ชัดว่าใครเป็นผู้ค้นพบกรรมวิธีการทำข้าวนึ่งนี้ แต่ได้สืบทอดกันต่อมาจนถึงปัจจุบันยังเป็นที่นิยมของกลุ่มชนในแถบเอเชียใต้ เช่น อินเดีย ศรีลังกา บังกลาเทศ ปากีสถาน และเนปาล นอกจากนี้ยังได้แพร่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของโลก ได้แก่ ทวีปแอฟริกา โดยเฉพาะแอฟริกาใต้ ประเทศในแถบทะเลแคริเบียน เอเชียตะวันออกกลาง เช่น แคเมอรูน ไนจีเรีย ซาอุดิอาระเบีย เป็นต้น และยังแพร่หลายไปยังประเทศในทวีปยุโรป และอเมริกา โดยการอพยพย้ายถิ่นฐานของชาวเอเชียใต้ จึงทำให้เกิดการแพร่กระจายความนิยมบริโภคข้าวนึ่งดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และสำคัญมากต่อเศรษฐกิจการค้าข้าวของโลกต่อไปในอนาคต

โดยในปัจจุบันกระบวนการผลิตข้าวนึ่งได้มีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นทั้งระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรม ซึ่งแต่ละกระบวนการผลิตข้าวเหนียวนึ่งก็จะมีเทคนิคที่แตกต่างกันบางส่วน แต่กระบวนการผลิตส่วนใหญ่แล้วก็จะมีขั้นตอนการผลิตคล้ายกัน ซึ่งประกอบด้วย การแช่ (soaking) คือ การนำข้าวเปลือกแช่ในน้ำประมาณ 6-24 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำที่แช่ซึมผ่านเปลือกเข้าไปสู่เนื้อในเมล็ดข้าวจนอิ่มตัว การนึ่ง (steaming) คือ การนำข้าวเปลือกขึ้นจากการแช่มานึ่งให้สุก เพื่อทำให้แป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดเป็นเจล (gelatinization) ซึ่งจะส่งผลทำให้

ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดหลังการสีเพิ่มขึ้น รวมทั้งคุณภาพของข้าวนึ่งจะดีขึ้น การอบแห้ง (drying) คือ การนำข้าวเปลือกนึ่งมาทำการอบแห้ง โดยการตากแดดหรืออบ เพื่อให้ข้าวเปลือกมีความเหมาะสมต่อการสีและการเก็บรักษา และการสี (hulling) หรือกะเทาะเปลือกออก คือ การแยกเปลือกออกไป เพื่อให้ได้ข้าวในลักษณะข้าวกล้องหรือข้าวขาว

จากการศึกษาพบว่าข้าวนึ่งเป็นสินค้าที่มีศักยภาพในการแข่งขันในตลาดสูง เพราะมีจุดเด่นหลายประการ อาทิ มีกลิ่นหอม สีสวย อุดมด้วยคุณค่าทางอาหาร เป็นที่ต้องการของตลาดและขายได้ราคาสูงกว่าข้าวขาวเต็มเมล็ดทั่วไป แต่จากสอบถามปัญหาและความต้องการของผู้ประกอบการและรัฐวิสาหกิจชุมชนที่มีต่อกระบวนการผลิตข้าวนึ่ง พบว่าปัญหาหลัก คือ อัตราการผลิตข้าวนึ่งต่อวันค่อนข้างต่ำ ประมาณ 300-500 กิโลกรัม/วันเท่านั้น เนื่องจากอุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตยังใช้แบบพื้นบ้าน เช่น การนึ่งข้าวเปลือกด้วยหวดไม้ไผ่จักสานขนาดเล็ก และสถานที่ทำการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่งโดยการตากแดดมีพื้นที่จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูฝนก่อให้เกิดอุปสรรคต่อการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่งเป็นอย่างยิ่งส่งผลให้ผู้ประกอบการไม่สามารถผลิตได้ทันกับความต้องการของตลาดที่สั่งซื้อเข้ามาเป็นจำนวนมาก และยังพบว่าคุณภาพทางเคมี กายภาพ และโภชนาการยังไม่มีความสม่ำเสมอ ทางผู้ประกอบการยังมีความต้องการที่จะให้นักวิชาการทางด้านเทคโนโลยีอาหารเข้าไปช่วยในการพัฒนากระบวนการผลิตข้าวเหนียวนึ่งให้มีกำลังการผลิตที่สูงขึ้นและช่วยพัฒนาคุณภาพของข้าวนึ่งให้มีมาตรฐานตามความต้องการของผู้บริโภคมากขึ้น นอกจากนั้นยังรวมไปถึงการนำผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต เช่น รำข้าว มาสร้างมูลค่าเพิ่มและใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

การที่ข้าวนึ่งได้รับความสนใจในการบริโภคเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องมีการพิจารณาถึงค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic Index : GI) ของข้าวนึ่งด้วย เนื่องจากประชาชนในส่วนใหญ่นิยมรับประทานข้าวเป็นอาหารหลัก และจากข้อมูลสมาพันธ์เบาหวานนานาชาติ (international diabetes federation : IDF) ได้รายงานสถานการณ์ผู้เป็นเบาหวานทั่วโลกแล้ว 285 ล้านคนและได้ประมาณการว่าจะมีจานวนผู้เป็นเบาหวานทั่วโลกเพิ่มมากกว่า 435 ล้านคน ในปี พ.ศ. 2573 หากไม่มีการดาเนินการในการป้องกันและควบคุมที่มีประสิทธิภาพ สำหรับประเทศไทยข้อมูลจากสำนักนโยบายและยุทธศาสตร์ กระทรวงสาธารณสุข พบว่ามี ผู้เสียชีวิตจากโรคเบาหวานใน ปี พ.ศ. 2552 ประมาณ 7,019 คน หรือประมาณวันละ 19 คน (สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์, 2557) และในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2542-2552) พบว่าคนไทยนอนรักษาตัวที่โรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข ด้วยโรคเบาหวานเพิ่มขึ้น 4.02 เท่า เฉพาะ ปี พ.ศ. 2552 มีผู้ที่นอนรักษาตัวที่โรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุขด้วยโรคเบาหวาน 558,156 ครั้ง หรือประมาณวันละ 1,529 ครั้ง หรือคิดเป็นผู้ที่นอนรักษาตัวที่โรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข ด้วยโรคเบาหวานชั่วโมงละ 64 ครั้ง เบาหวานเป็นสาเหตุทำให้เกิดการป่วยและตายก่อนวัยอันสมควร จากภาวะแทรกซ้อนต่อตา ไต ระบบประสาท หัวใจและหลอดเลือดสมอง (สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์, 2557) แต่ทั้งนี้การสำรวจสถานะสุขภาพอนามัย

ของคนไทย ครั้งที่ 4 พบว่า 1 ใน 3 ของผู้ที่เป็นเบาหวานไม่ทราบว่าตนเองเป็นโรคเบาหวานมาก่อน ส่วนผู้ที่ได้รับการวินิจฉัยโดยแพทย์ว่าเป็นเบาหวาน ร้อยละ 3.3 ไม่ได้รับการรักษา และผู้ที่ได้รับการรักษามีเพียงร้อยละ 28.5 ที่คุมระดับน้ำตาลให้อยู่ในเกณฑ์ น้อยกว่า 126 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตรได้ (วิชัย เอกพลากร, 2553) ปัญหาสุขภาพเหล่านี้เกิดจากการบริโภคอาหารไม่สมดุล ข้าวซึ่งเป็นอาหารที่ให้พลังงานหลัก จึงน่าจะมีบทบาทสำคัญที่เกี่ยวข้องกับปัญหาดังกล่าวโดยตรง ดังนั้นการพัฒนากระบวนการผลิตข้าวนึ่งในระดับอุตสาหกรรม เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางเคมี กายภาพ และโภชนาการจะต้องคำนึงถึงค่าดัชนีน้ำตาลด้วย เพื่อให้มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำจึงเป็นสิ่งที่ท้าทายในการพัฒนากระบวนการผลิต ด้วยสาเหตุที่ข้าวที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ อาจเกิดจากข้าวมีโครงสร้างของ amylopectin แบบพิเศษที่เอนไซม์ในกระเพาะไม่สามารถย่อยได้ง่าย เม็ดแป้งอาจมีโครงสร้างที่กันการเข้าถึงของเอนไซม์ได้ดี หรืออาจเกิดจากปริมาณ phytate ในเมล็ดสูงก็เป็นได้ จากการศึกษาค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวโดยทั่วไป พบว่ามีค่าดัชนีน้ำตาลค่อนข้างสูง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความมุ่งหมายเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตข้าวเหนียวนึ่งในระดับต้นแบบและระดับอุตสาหกรรม เพื่อลดค่าดัชนีน้ำตาลในข้าวนึ่งสำหรับผู้บริโภคข้าวเป็นอาหารหลักและผู้ป่วยโรคเบาหวาน รวมทั้งพัฒนาประสิทธิภาพและกำลังการผลิต และการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐานระดับสูงและสม่ำเสมอ รวมไปถึงการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากข้าวนึ่งที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำและผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพจากผลพลอยได้ในกระบวนการผลิตมาสร้างมูลค่าเพิ่ม และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทั้งตลาดในและต่างประเทศ

กระบวนการผลิตข้าวนึ่ง

ข้าวนึ่ง (parboiled rice) คือ ข้าวเปลือกที่ผ่านการทำให้สุกด้วยกระบวนการให้ความร้อนชื้น (hydrothermal process) โดยนำข้าวเปลือกมาเพิ่มความชื้นด้วยการแช่น้ำ ทำให้น้ำซึมเข้าสู่เมล็ดข้าวเปลือกจนอิ่มตัว แล้วจึงแยกน้ำออกจากข้าวเปลือก จากนั้นนำไปต้มหรือนึ่งด้วยไอน้ำ เพื่อทำให้เนื้อในเมล็ดที่มีเปลือกหุ้มสุกบางส่วนโดยเฉพาะที่ผิวรอบนอกของเมล็ด แล้วจึงนำไปลดความชื้นโดยการอบแห้งให้เหลือความชื้นประมาณ 16% (d.b.) และต้องเก็บรักษาหรือพักข้าวไว้อย่างน้อย 7 วัน ก่อนนำไปผ่านกระบวนการสีต่อไป (น้ำฝน ศีตะจิตต์ และอรอนงค์ นัยวิกุล, 2546) จุดประสงค์ของการทำข้าวนึ่งเพื่อปรับปรุงคุณภาพข้าว โดยเฉพาะข้าวเปลือกที่มีคุณภาพการสีต่ำให้มีคุณภาพการสีสูงขึ้นคือ เพิ่มปริมาณต้นข้าว เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เช่น วิตามินบี และแร่ธาตุบางชนิดที่แพร่เข้าสู่ภายในเมล็ดข้าวเปลือกพร้อมกับน้ำที่ใช้แช่และนึ่ง (เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข, 2536) และได้มีนักวิจัยบางกลุ่มได้ศึกษาด้านสุขภาพของกลุ่มคนที่บริโภคข้าวนึ่งและข้าวขาวธรรมดา พบว่ากลุ่มที่บริโภคข้าวนึ่งไม่เป็นโรคเหน็บชา เพราะว่าในข้าวนึ่งมีวิตามินบี 1 (ไทอะมิน) มากกว่าข้าวขาวธรรมดา

ดังนั้นจึงสามารถป้องกันโรคเหน็บชาได้ (Bhattacharya, 1985) ซึ่งขั้นตอนการผลิตข้าวนึ่งที่สำคัญ คือ การแช่ (soaking) การนึ่ง (steaming) และการอบแห้ง (drying) มีรายละเอียดดังนี้

1. การแช่ (soaking)

การแช่ข้าวเปลือก (soaking) เพื่อให้น้ำแพร่เข้าไปภายในเมล็ดข้าวเปลือกจนอิ่มตัว แต่ไม่ถึงขั้นปริแตกออกจากกัน (ประมาณ 45-50% d.b.) ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงกรรมวิธีการแช่ข้าวเปลือกจากเดิมที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งเสียเวลานาน มาเป็นการแช่ด้วยน้ำอุ่น (อุณหภูมิประมาณ 60-70°C) เป็นช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชันของแป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhattacharya and Rao (1966) ซึ่งได้ศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำแช่กับการเปลี่ยนแปลงความชื้น ซึ่งผลจากการแช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิน้ำปกติข้าวมักจะมีกลิ่นเนื่องจากการหมัก แต่การแช่ในน้ำอุ่นข้าวจะไม่มีกลิ่น ถ้าใช้อุณหภูมิน้ำแช่สูงและระยะเวลาในการแช่นานเกินไปจะทำให้เมล็ดข้าวเปลือกปริแตกออก ซึ่งจะมีแป้ง วิตามินและแร่ธาตุบางส่วนละลายในน้ำแช่ ต่อมา Kar *et al*. (1999) พบว่าความร้อนจะทำให้น้ำแพร่เข้าไปในเมล็ดได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตข้าวนึ่งลงได้มาก แต่ระยะเวลาและอุณหภูมิตลอดจนน้ำที่ใช้ในการแช่มีอิทธิพลต่อคุณภาพข้าวนึ่ง น้ำฝน ศีตะจิตต์ และอรอนงค์ นัยวิกุล (2546) กล่าวว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแช่ข้าวเปลือก คือ อุณหภูมิน้ำ และระยะเวลาในการแช่และความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำแช่ ซึ่งมีผลต่อ สี กลิ่น และรสชาติ ข้าวนึ่งจะมีสีเข้มเมื่ออุณหภูมิน้ำที่ใช้แช่สูงกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนเซชัน ซึ่งในการแช่ไม่ควรใช้อุณหภูมิเกิน 70°C และระยะเวลาในการแช่อย่างต่ำ 3 ชั่วโมง แต่ไม่ควรเกิน 5 ชั่วโมง ความเป็นกรด-ด่างของน้ำแช่ ประมาณ 5 เพราะว่าจะทำให้ข้าวนึ่งมีสีอ่อน ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้ข้าวนึ่งมีสีเข้มส่วนกลิ่นและรสชาติของข้าวนึ่งมีผลมาจาก อุณหภูมิของน้ำ และระยะเวลาในการแช่ ถ้าระยะเวลาในการแช่นาน จะมีผลต่อการย่อยสลายของสารอาหารที่มีในเมล็ดข้าว เช่น เอนไซม์แอมิเลสจะย่อยสลายแป้งทำให้ได้น้ำตาลมอลโทสและกลูโคสเพิ่มขึ้นได้ที่อุณหภูมิ 60°C และน้ำจะช่วยให้การย่อยสลายของโปรตีน ชนิดแอลบูมิน ทำให้เกิดกรดแอมิโนหลายชนิด โดยกรดแอมิโนที่มีองค์ประกอบด้วยซัลเฟอร์เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดสารไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารซัลไฟด์อินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถรวมตัวกับสารประเภทแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสลายตัวของสารลิกนินในส่วนของเปลือกข้าวกลายเป็นสารประกอบที่ให้กลิ่น เช่น ไทโอแอลกอฮอล์ และไทโออีเทอร์ซึ่งให้กลิ่นรสเฉพาะของข้าวนึ่ง แต่ถ้าแช่ข้าวเปลือกนานเกิน 8 ชั่วโมง จะเกิดกลิ่นหมักจากการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียในน้ำที่ใช้แช่ทำให้เกิดกลิ่น รส ที่ผู้บริโภคบางกลุ่มไม่ชอบ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2. การนึ่ง (Steaming)

จุดประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณต้นข้าวหลังจากการสี ปรับปรุงสมบัติของข้าวเปลือกให้เก็บรักษาได้นาน และเพิ่มคุณภาพทางโภชนาการ การนึ่งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเมล็ดข้าวเปลือก (Luh, 1991) คือ ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นเนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำทำให้น้ำแพร่เข้าไปภายในเมล็ดข้าวเปลือก และทำให้แป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดเจลา-ทิไนเซชันสมบูรณ์ขึ้น นอกจากนั้นการนึ่งจะช่วยประสานรอยร้าวภายในเมล็ดข้าวเปลือก ทำให้เนื้อข้าวเกาะตัวกัน แน่นขึ้น แยกเปลือกออกได้ง่ายเมื่อนำไปสี หยุดการงอกของเมล็ดข้าวเปลือก ตลอดจนทำลายสปอร์ของเชื้อรา ไข่ ตัวอ่อนของแมลง ซึ่งส่งผลทำให้ข้าวเปลือกนึ่งสามารถเก็บรักษาได้นาน ปัจจัยที่มีผลต่อการนึ่งข้าวเปลือก คือ ความชื้นข้าวเปลือกก่อนนึ่งระยะเวลาในการนึ่ง อุณหภูมิหรือความดันไอน้ำ (Luh, 1991) ปัจจัยดังกล่าวมีผลทำให้ข้าวนึ่งมีคุณลักษณะและคุณภาพแตกต่างกัน กล่าวคือ ข้าวนึ่งที่แป้งภายในเมล็ดข้าวจะเกิดเจลาทิไนซ์อย่างสมบูรณ์ทั่วทั้งเมล็ดเรียกว่า ข้าวนึ่งสมบูรณ์ (fully parboiled rice) ส่วนเมล็ดข้าวที่สตาร์ชเกิดเจลาทิไนซ์เพียงบางส่วนเรียกว่า ข้าวนึ่งบางส่วน (partially or surface parboiled rice) ขณะที่ข้าวนึ่งสีอ่อน (light parboiled rice) นั้นเกิดจากข้าวนึ่งที่ผ่านการนึ่งด้วย ไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาสั้น ส่วนข้าวนึ่งที่มีสีเข้มนั้นเกิดจากการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูง เป็นระยะเวลานานจึงทำให้ได้ข้าวนึ่งสีเข้ม (dark parboiled rice) การนึ่งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำจะมีผลทำให้แป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ เช่น สีน้ำตาลจากเปลือกข้าวที่ละลายน้ำได้แพร่เข้าไปภายในเมล็ดข้าวเปลือก เนื่องจากความร้อนและความดันที่ใช้ในการนึ่งแป้งภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดเจลา-ทิไนซ์เมื่อถูกทำให้เย็นลงจะเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลใหม่จะทำให้การสะท้อนแสงแตกต่างไปจากเดิม น้ำตาลรีดิวซิ่งที่เกิดจากเอ็นไซม์ที่ย่อยสลายแป้งที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการแช่และนึ่ง ทำปฏิกิริยากับกรดแอมิโนในกระบวนการเกิดสีน้ำตาลแบบเมลลาร์ด (maillard) จากงานวิจัยของ Luh (1991) พบว่าสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำจาก 100 เป็น 120°C Adhikaritanayake and Noomhorm (1998) ทำการทดสอบกับข้าวเปลือกแช่น้ำที่ 65°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงแล้วถ่ายน้ำที่แช่ออก ปล่อยทิ้งไว้อีก 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปผ่านการนึ่งแบบต่อเนื่อง พบว่าเงื่อนไขที่ทำให้คุณภาพข้าวนึ่งดีที่สุด คือ เวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในเครื่องนึ่ง 99.1 วินาที จะได้ร้อยละต้นข้าว 64.9% ร้อยละ White belly 0% ความขาวและคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ของข้าวทั่วไป Bhattacharya (1996) ได้นำข้าวเปลือกไปทำการแช่น้ำอุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปนึ่งด้วยไอน้ำภายใต้ความดันต่างๆ คือ 101-304 kPa (ระบบปิด) ระยะเวลา 0-60 นาที พบว่าการเปลี่ยนสีของข้าวนึ่งทั้งหมดเป็นไปตามจลศาสตร์อันดับ 0 ถ้าระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตนานและความดันที่ใช้เพิ่มมากขึ้น จะมีผลทำให้ข้าวสารที่ได้มีความเหลืองเพิ่มขึ้น

3. การอบแห้ง (Drying)

จุดประสงค์ของการอบแห้งเพื่อลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหมาะสมต่อการสี และการเก็บรักษากระบวนการอบแห้งข้าวนึ่งจะแตกต่างจากจากข้าวเปลือกธรรมดา เพราะว่าข้าวเปลือกนึ่งมีความชื้นสูง (มากกว่า 45% d.b.) และเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวเปลือกเกาะตัวกันแน่น เนื่องจากสตาร์ชที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดเจลาทิไนซ์ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงกว่า แต่ยังคงแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกจะลดความชื้นให้เหลือประมาณ 18-20% d.b. และพักตัว (tempering) เพื่อปรับสภาพข้าวให้ความชื้นแพร่กระจายทั่วทั้งเมล็ด เพื่อลดการแตกร้าวของเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดจากความเค้น (Stress) เนื่องจากความแตกต่างของความชื้นและอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าว ระยะเวลาที่เหมาะสมประมาณ 2-48 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปอบแห้งในช่วงที่สองเพื่อให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณ 16% d.b. แล้วจึงนำไปเก็บรักษาหรือการนำไปสี ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งข้าวนึ่ง คือ อุณหภูมิอบแห้ง ระยะเวลาในการอบแห้งและระยะเวลาในการพักตัว ตลอดจนวิธีการอบแห้งข้าวเปลือก Sutherland and Ghaly (1992) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดโดยใช้อากาศร้อน พบว่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกมีผลต่อร้อยละต้นข้าว ถ้าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกต่ำกว่า 18% w.b. (22% d.b.) เมื่อนำไปสีจะได้ร้อยละต้นข้าวลดลง โดย Taweerattanapanish *et al*. (1999) พบว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นระหว่าง 23-31% w.b. (30-42.8% d.b.) เมื่อผ่านการอบแห้งแล้วจะได้ร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีเป่าด้วยลมธรรมชาติ คาดว่าเกิดจากการที่แป้งบางส่วนภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดเจลาทิไนเซชัน

คุณภาพของการเก็บรักษาข้าวนึ่ง

ข้าวนึ่งจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของไขมันได้ง่ายเนื่องจากลิเพสถูกทำลายด้วยความร้อน และในสภาพการเก็บที่มืดมีอากาศถ่ายเทจะช่วยให้เกิดการเหม็นหืนช้ากว่าการเก็บที่สว่างและในถุงที่ปิดมิดไม่มีอากาศถ่ายเท การสูญเสียวิตามินบีน้อยกว่าข้าวธรรมดา และข้าวนึ่งจะทนต่อการทำลายของแมลงกัดกินเมล็ดข้าวหลายชนิด จึงเก็บข้าวนึ่งได้นานกว่าข้าวธรรมดา

คุณภาพในการขัดสีข้าวนึ่ง

เมื่อนำข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการทำข้าวนึ่งมาขัดสี จะได้ข้าวเต็มเมล็ดมากขึ้นเกือบ 100% เนื่องจากสตาร์ชที่เป็นเจลแล้วจะจัดเรียงตัวกัน หรืออาจจับกับโปรตีนบางส่วน เกิดการเชื่อมติดของรอยร้าวทำให้ผิวของข้าวใสและแข็งแรงขึ้น ไม่หักง่ายในขณะขัดสี แต่ต้องใช้พลังงานในการขัดสีมากขึ้น ผลของการขัดสีทำให้สูญเสียแร่ธาตุ น้ำตาลและวิตามิน น้อยกว่าการขัดสีข้าวเปลือกธรรมดา

คุณภาพการหุงต้ม (Cooking quality)

คุณภาพการหุงต้มสามารถคาดคะเนโดยคุณสมบัติทางเคมี (Grain chemical properties) ปัจจัยที่ทำให้ข้าวพันธุ์ต่างๆมีคุณภาพการหุงต้มแตกต่างกันขึ้นกับองค์ประกอบดังนี้

1. ปริมาณแอมิโลส (Apparent amylose content)

ถึงแม้ว่าแป้งข้าวจะมีอะไมโลเพคตินมากกว่าอะไมโลส แต่โดยทั่วไปจะแบ่งประเภทข้าวโดยถืออะไมโลสเป็นหลัก อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้ข้าวมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ปริมาณอะไมโลสเป็นสาเหตุทำให้ข้าวสุกมีความเหนียวลดลงหรือร่วนมากขึ้นและทำให้ข้าวนุ่มน้อยลงด้วย ทั้งนี้จากสมบัติการคืนตัวของอะไมโลสที่สุกแล้ว (retrogradation) ได้มีการแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณอะไมโลสดังตารางที่ 2.4 ข้าวที่มีอะไมโลสสูงจะดูดน้ำได้มากในระหว่างการหุงต้ม ดังนั้นปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มจึงมีผลต่อคุณภาพของข้าวสุก เช่นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำต้องการน้ำน้อยถ้าใส่มากเกินไปจะทำให้ข้าวสุกแฉะเละ

ตารางที่ 2.4 ประเภทข้าว ปริมาณอะไมโลสและลักษณะของแป้งสุก

ประเภทข้าว	ปริมาณอะไมโลส (%)	ลักษณะข้าวสุก
ข้าวเหนียว	0-2	เหนียวมาก
ข้าวอะไมโลสต่ำ	10-19	เหนียวนุ่ม
ข้าวอะไมโลสปานกลาง	20-25	ค่อนข้างร่วนไม่แข็ง
ข้าวอะไมโลสสูง	25-34	ร่วนแข็ง

2. ความคงตัวของแป้งสุก (Gel consistency)

ข้าวที่มีอะไมโลสเท่ากัน อาจมีความแข็งของข้าวสุกแตกต่างกันทั้งนี้เนื่องจากแป้งมีอัตราการคืนตัวไม่เท่ากัน ทำให้แป้งสุกมีความแข็งและอ่อนแตกต่างกัน สามารถแบ่งข้าวตามความคงตัวของแป้งสุกได้ 3 ประเภทดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าความคงตัวของแป้งสุก

ประเภทแป้งสุก	ระยะทางที่แป้งไหล (มม.)
แป้งสุกแข็ง	26-40
แป้งสุกปานกลาง	41-60
แป้งสุกอ่อน	61-100

3. ระยะเวลาในการหุงต้ม

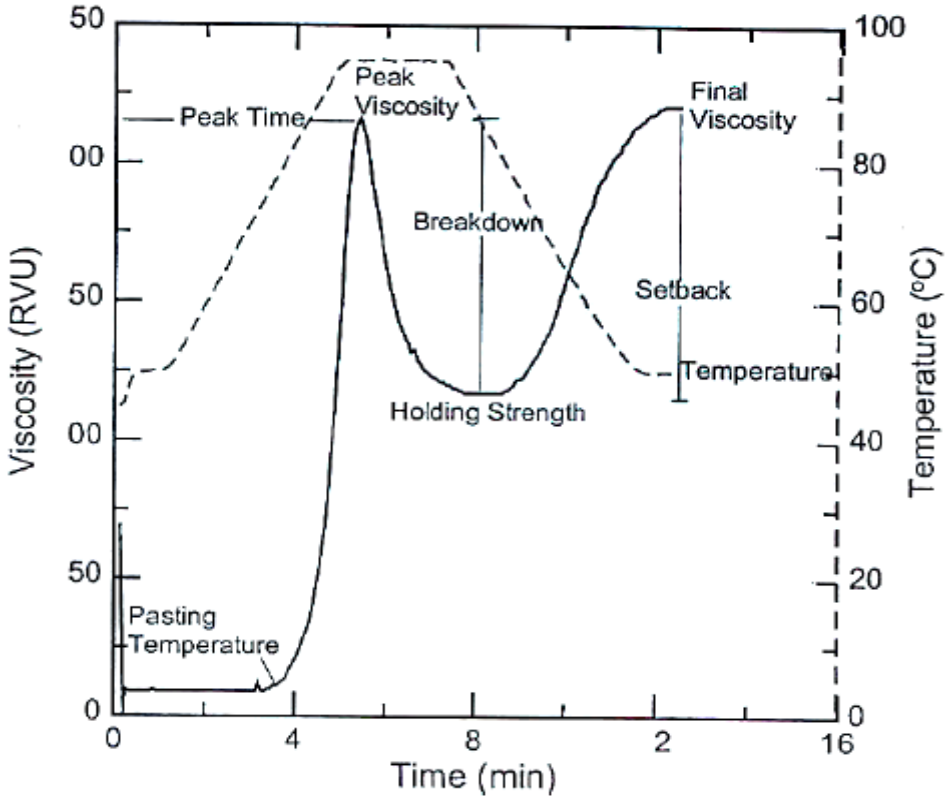
การต้มเมล็ดข้าวให้สุกอาจใช้เวลา 14-15 นาที เมล็ดข้าวต้องไม่มีไตของแป้งดิบภายในเมล็ด ระยะเวลาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแป้งสุก การวิเคราะห์อาจใช้วิธีการหาอุณหภูมิที่ทำให้ความหนืดของน้ำแป้งเพิ่มขึ้นหรือประมาณระดับของอุณหภูมิแป้งสุก โดยการหาค่าการสลายเมล็ดข้าวสารในด่าง โดยการแช่ในสารละลาย KOH 1.7% นาน 23 ชั่วโมง และใช้ค่าการสลายของเมล็ดที่ปรากฏสามารถประมาณระดับอุณหภูมิได้ดังตารางที่ 2.6 แม้ว่าระยะเวลาหุงต้มจะขึ้นกับอุณหภูมิแป้งสุก แต่ความหนาของเมล็ดข้าวทำให้ต้องยืดเวลาการหุงต้มไปอีก เช่น ข้าวที่มีอุณหภูมิแป้งสุกเท่ากัน ข้าวที่มีเมล็ดหนาจะต้องใช้เวลาการหุงต้มนานกว่าข้าวเมล็ดบางกว่า

ตารางที่ 2.6 ระดับอุณหภูมิแป้งสุก

อุณหภูมิแป้งสุก (°C)	ระดับ	ค่าการสลายเมล็ดในด่าง	ระยะเวลาการหุงต้ม (นาที)
ต่ำกว่า 65	ต่ำ	6-7	12-16
70-74	ปานกลาง	4-5	16-24
มากกว่า 75	สูง	1-3	>24

4. การวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง RVA (Rapid Visco Analyzer)

เครื่อง RVA (Rapid Visco Analyzer) เป็นเครื่องวิเคราะห์ความหนืดของตัวอย่างที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีหลักการวัดค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเครื่องทำให้ส่วนผสมของตัวอย่างกับน้ำได้รับความร้อนจนเกิดความหนืด ในขณะที่ร้อนขึ้นด้วยอัตราระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสม่ำเสมอจนถึงอุณหภูมิสูงสุด (โดยทั่วไปจะประมาณ 95°C) ต่อไปก็จะคงอุณหภูมิที่สูงสุดนี้ไว้ระยะเวลาหนึ่ง เพื่อวัดความคงทนของความหนืดต่อแรงเฉือนของเครื่อง และต่อมาจึงตรวจสอบค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเครื่องทำให้ส่วนผสมเย็นลงในอัตราระหว่าง เวลาและอุณหภูมิที่ลดลง (โดยทั่วไปจะประมาณ 50°C) ความเปลี่ยนแปลงของความหนืดทั้ง 3 ระยะ เป็นผลของลักษณะทางเคมีกายภาพของตัวอย่างที่ปรากฏเป็นความหนืดนั่นเอง สมบัติทางด้านความหนืดของแป้งซึ่งแสดงด้วยกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA

ผลที่อ่านได้จากการวิเคราะห์เส้นกราฟมีดังนี้

1. Peak Time = เวลาที่เกิด Peak ของความหนืด มีหน่วยเป็นนาที

2. Peak Viscosity = ความสามารถในการพองตัวของแป้งเมื่อสุก (ความหนืดทำให้เกิดค่า peak) มีหน่วยเป็น RVU (Rapid Visco Unit)

3. Pasting Temperature = อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดหรืออุณหภูมิที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVA ใน 20 วินาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

4. Peak Temperature = อุณหภูมิที่เกิด Peak มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

5. Holding Strength = ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำให้เย็น มีหน่วยเป็น RVU

6. Breakdown = ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดของ Peak (Peak Viscosity) และความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

7. Final Viscosity = ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU

8. Setback from Peak = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุด Peak มีหน่วยเป็น RVU

9. Setback from Trough = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bello *et al*. (2004) ได้ศึกษาการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าวเมื่อแช่ในสารละลายต่างๆ ได้แก่ น้ำ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) สารละลายกรดอะซิติก (CH_2COOH) สารละลายกรดฟอสฟอริก (H_2PO_4) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) โดยนำข้าวเปลือกมาแช่ที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

1. น้ำที่อุณหภูมิ 25, 35, 45, 55 และ 65°C

2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1, 1.0 และ 10 g/ 100 ml ที่อุณหภูมิ 35 และ 55°C

3. สารละลายกรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.1, 1.0 และ 10 g/ 100 ml ที่อุณหภูมิ 35 และ 55°C

4. สารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.1, 1.0 และ 10 g/ 100 ml ที่อุณหภูมิ 35 และ 55°C

5. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1, 1.0 และ 10 g/ 100 ml ที่อุณหภูมิ 35 และ 55°C

6. สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.1, 1.0 และ 10 g/ 100 ml ที่อุณหภูมิ 35 และ 55°C

วัดความชื้นทุกๆ 5 นาที จากการทดลองพบว่าอัตราการดูดซึมน้ำของข้าวเปลือกที่แช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก กรดอะซิติก และกรดฟอสฟอริกที่ 25°C มีค่าใกล้เคียง แต่ต่ำกว่าการแช่ในน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่วนข้าวเปลือกที่แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนตจะให้สัมประสิทธิ์การแพร่และอัตราการดูดซึมน้ำสูงกว่าการแช่ในน้ำ

Thakur and Gupta (2005) ได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะในการดูดซึมน้ำของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และแกลบ โดยแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิ 30, 45 และ 60°C และวัดปริมาณความชื้นทุกๆ 1 ชั่วโมงถึงจุดสมดุล (ข้าวดูดซึมน้ำจนถึงจุดอิ่มตัวและปริมาณความชื้นไม่เพิ่มอีก) และใช้ arrhenius-type equation ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ถึงจุดสมดุลเร็วขึ้น และจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำพบว่าข้าวกล้องมีสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือ ข้าวเปลือกและแกลบ ตามลำดับ

Ahromrit *et al*. (2006) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการลดเวลาในการแช่ข้าวโดยใช้ความดันสูงเพื่อกระตุ้นให้มีการดูดซึมน้ำเข้าสู่เมล็ดข้าวมากขึ้น ซึ่งทำการทดลองโดยนำข้าวสารมาแช่ในน้ำอุณหภูมิ 20, 50, 60 และ 70 $^{\circ}$C ร่วมกับการใช้ความดัน 0.1, 100, 200, 300, 400, 500 และ 600 MPa ในท่อที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความดัน (temperature-controlled pressure vessel system) โดยแช่เป็นเวลา 15, 30, 45, 60, 75, 95, 105 และ 120 นาที พบว่า อัตราการดูดซึมน้ำและการเข้า

สู่สมดุลของความชื้นเกิดได้ดีขึ้นเมื่อความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น อุณหภูมิจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำที่ความดันน้อยกว่า 300 MPa โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 50 °C การแพร่จะไม่เพิ่มขึ้นอีก

การแช่ข้าวที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์จะทำให้ได้ข้าวนึ่งที่มีคุณภาพต่ำลงเนื่องจากข้าวเกิดการแตกปริและทำให้ได้ข้าวเต็มเมล็ดลดน้อยลง จากรายงานของ Bello *et al*. (2004) ศึกษาการทำข้าวนึ่งด้วยวิธี hydrothermal ซึ่งมีขั้นตอนที่สำคัญ คือ

1. การแช่ข้าวเปลือก
2. การปรับสภาพความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือก
3. การใช้ความร้อนด้วยน้ำร้อน และ
4. การทำแห้ง พบว่าการแช่ข้าวเปลือกในน้ำที่มีอุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ใช้เวลาในการปรับสภาพความชื้นของข้าวเปลือก 1 ชั่วโมง ให้ความร้อนด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 174.4 นาที และนำไปทำแห้งจะทำให้ได้ข้าวนึ่งที่มีคุณภาพดี คือ ได้ปริมาณต้นข้าวสูง (head rice yield) เท่ากับ 86.6%

Elbert *et al*. (2000) ได้ศึกษาผลของสภาวะการทำแห้งต่อข้าวเต็มเมล็ดและดัชนีสีน้ำตาลของข้าวนึ่ง โดยพวกเขาได้ทำการแช่ข้าวเปลือก 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการนึ่งด้วยไอน้ำที่ความดัน 198.53 mPa เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาทำให้แห้งด้วยเครื่องอบแห้ง โดยการอบแห้งนั้นได้ทำอยู่ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะนำข้าวไปในถุงป้องกันความชื้นแล้วนำไปวางบน Thin-layer dryer ที่ให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25°C ไปจนถึง 95°C โดยมีลมร้อนพัดด้วยความเร็ว 5 m/s ขั้นตอนที่สองจะทำการอบแห้งข้าวต่อจนความชื้นของข้าวลดเหลือ 0.12-0.13 kg/kg (dry basis) หลังจากการอบแห้งเสร็จเรียบร้อย จะนำข้าวเปลือกที่ได้ไปเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 สัปดาห์ แล้วทำการสี คัดแยกข้าวเต็มเมล็ดและข้าวหักออกจากกัน แล้วคำนวณปริมาณข้าวที่ได้ โดยปริมาณข้าวเต็มเมล็ดมีค่า 72.27 และค่าดัชนีสีน้ำตาลมีค่าเท่ากับ 39.65

Saif *et al*. (2004) ได้ศึกษาผลของกระบวนการผลิตและการผึ่งต่อคุณสมบัติด้านการยืดขยายของเมล็ดข้าวนึ่ง โดยพวกเขาได้นำข้าวเปลือกมาทำการแช่ที่อุณหภูมิ 55°C เป็นเวลา 240 นาที จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ได้มาทำการนึ่งด้วยไอน้ำที่ความดัน 105 mPa เป็นเวลา 5 และ 10 นาที แล้วนำไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 21 และ 40°C และทำการผึ่งข้าวที่อุณหภูมิ 21 °C แล้วนำข้าวไปทำการวิเคราะห์การยืดขยายตัวต่อไป โดยผลที่ได้คือข้าวที่ผ่านการนึ่งจะมีการยืดขยายเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม