

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว

ข้าว (Rice) เป็นพืชในวงศ์หญ้า (Gramineae) มี 2 ชนิด คือ *Oryza glaberrima* และ *Oryza sativa* โดย *Oryza sativa* มีถิ่นกำเนิดและปลูกเป็นอาหารในทวีปเอเชีย มี 3 สายพันธุ์ คือ Indica Japonica และ Javanica (ประภาส, 2531) ข้าวถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย มีการเพาะปลูกทั่วไปทุกภูมิภาค เนื่องจากเป็นอาหารหลักของคนไทย และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง (กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์, 2545)

ตารางที่ 2.1 ประเทศผู้ผลิตข้าวที่มีผลผลิตรวมเป็น 10 อันดับแรกของโลก ปี พ.ศ. 2552-2553

ประเทศ	พื้นที่เก็บเกี่ยว (ล้านไร่)	ผลผลิตเฉลี่ย (กิโลกรัมข้าวเปลือก/ไร่)	ผลผลิตรวม (ล้านตันข้าวสาร)
จีน	185.50	1,054	137.00
อินเดีย	256.25	509	87.00
อินโดนีเซีย	75.00	802	38.80
บังกลาเทศ	72.50	654	31.60
เวียดนาม	45.81	803	24.31
ไทย	68.38	450	20.30
พม่า	43.75	418	10.60
ฟิลิปปินส์	27.81	576	10.10
บราซิล	17.50	658	7.82
ญี่ปุ่น	10.06	1,040	7.62

ที่มา : กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2553)

ประเทศผู้ผลิตข้าวที่มีผลผลิตรวมมากที่สุด คือ จีน รองลงมาได้แก่ อินเดีย, อินโดนีเซีย, บังกลาเทศ, เวียดนาม และไทย ตามลำดับ และข้าวเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่สำคัญต่อวิถีชีวิตของคนไทย และเศรษฐกิจของประเทศไทย ปัจจุบันประเทศไทยผลิตข้าวได้เป็นปริมาณมากและส่งออกข้าวเป็นลำดับแรกของโลก สถิติการค้าข้าวปี พ.ศ. 2549/2550 พบว่าประเทศไทยผลิตข้าวสารได้ 18.3 ล้านตัน ประมาณร้อยละ 52 ของผลผลิตทั้งหมด (9.6 ล้านตัน) ใช้บริโภคภายในประเทศ อีก 45% (8.3 ล้านตัน) เป็นการส่งออก และที่เหลือ (4.3 ล้านตัน) เก็บเป็นส

ต่อกลายปี โดยข้าวสารส่งออกคิดเป็นมูลค่าประมาณ 2,550 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ทั้งนี้ ร้อยละ 41 ของมูลค่าการส่งออกได้จากข้าวหอมมะลิ (กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2553) อย่างไรก็ตาม จากสถานะการแข่งขันทางการตลาดของข้าวสารทั่วโลกนั้นเพิ่มขึ้นทุกปี การคงสภาพผู้ส่งออกข้าวลำดับหนึ่งของประเทศไทยจึงมีปัญหา มีการแข่งขันจากประเทศเพื่อนบ้าน เช่น เวียดนาม ซึ่งผลิตข้าวได้คุณภาพดีและใช้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าข้าวในประเทศไทย (กรมส่งเสริมการค้าส่งออก, 2551) ดังนั้นการหาช่องทางการตลาดอื่น ๆ และการพัฒนาแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าว รวมทั้งการปรับปรุงวัตถุดิบข้าวให้มีคุณภาพและหลากหลายมากขึ้น จะช่วยเพิ่มความสามารถทางการแข่งขันของข้าวไทยในตลาดโลกได้

การเพิ่มมูลค่าหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวนั้นไม่จำกัดอยู่ที่การแปรรูปข้าวให้เป็นผลิตภัณฑ์อื่นเพียงอย่างเดียว สิ่งที่ยั่งยืนและใกล้ชิดที่สุดในการส่งเสริมการบริโภคข้าวไทยในตลาดโลกและการส่งออกคือ การปรับปรุงคุณภาพของข้าวกลิ้งหอมมะลิ แต่เนื่องจากผู้บริโภคไม่นิยมบริโภคข้าวหุงสุกที่มีเนื้อสัมผัสแข็ง ทั้ง ๆ ที่ทราบว่าข้าวกลิ้งมีคุณค่าทางโภชนาการมากกว่าข้าวขาวถึงประมาณ 2 เท่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงคิดว่า ถ้าหากปรับปรุงข้าวกลิ้งให้มีคุณภาพการหุงที่ดีและมีอายุการเก็บรักษาให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค จะเป็นการส่งเสริมการส่งออกข้าวไทย และชาวไทยก็จะบริโภคข้าวกลิ้งมากขึ้น เป็นการส่งเสริมสุขภาพอีกทางหนึ่ง

2.1.1 ลักษณะโครงสร้างของเมล็ดข้าว

โครงสร้างของเมล็ดข้าวประกอบด้วย

1.) เปลือกข้าว (Hull หรือ Husk) เปลือกข้าวประกอบด้วยเปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Palea) หางเมล็ด (Awn) กลีบเลี้ยง (Steriallemma) และข้าวเมล็ด (Rachilla) โดยเปลือกข้าวมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือก

2.) ส่วนของเมล็ดข้าวหรือเมล็ดข้าวกลิ้ง (Caryopsis, Brown rice or Cargo rice) คือส่วนที่เอาเปลือกออกแล้ว เป็นส่วนที่รับประทานได้ ประกอบด้วย

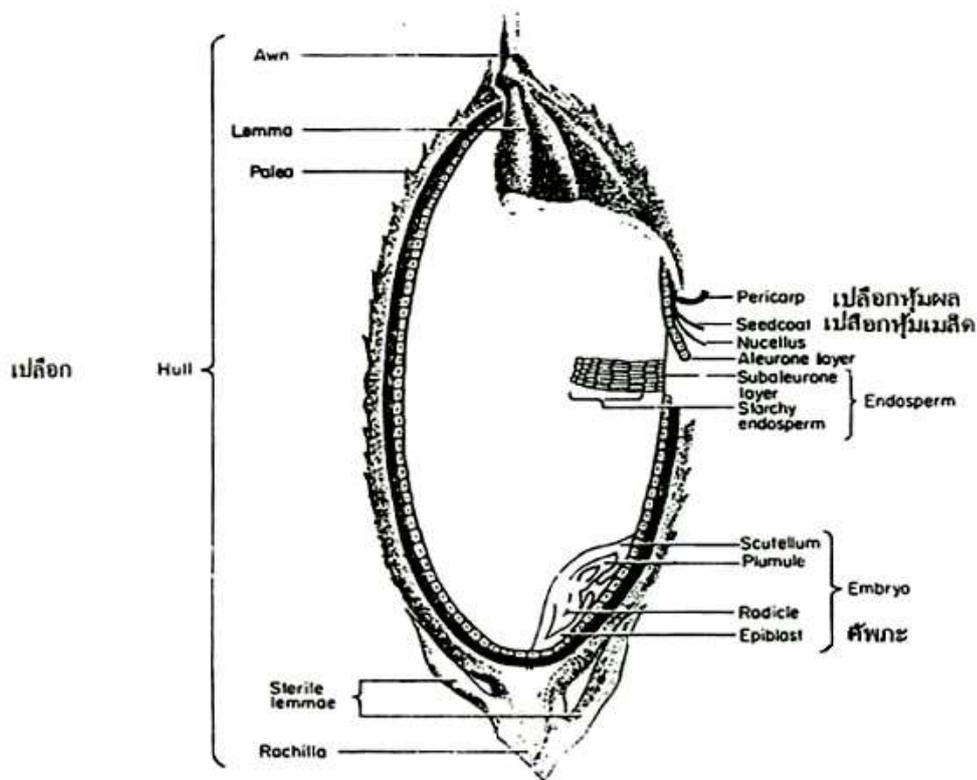
2.1) เยื่อหุ้มผล (Pericarp) ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น คือ epicarp mesocarp และ endocarp มีลักษณะเป็นเส้นใย พนังเซลล์ประกอบด้วยโปรตีน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

2.2) เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat หรือ Teata) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้าไป ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 2 ชั้น เรียงกันเป็นแถวเป็นที่อยู่ของไขมัน

2.3) เยื่อแอลิวโรน (Aleurone layer) อยู่ต่อจากเยื่อหุ้มเมล็ดเข้าไป เยื่อแอลิวโรนจะห่อหุ้มเอนโดสเปิร์มและคัพพะ องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโปรตีน นอกจากนี้ยังประกอบด้วยไขมัน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

2.4) เนื้อเมล็ด (endosperm) อยู่ชั้นในสุดของเมล็ด ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยโปรตีน ไขมัน และเส้นใย ประมาณร้อยละ 7.8 0.5 และ 0.4 ตามลำดับ

2.5) ต้นอ่อน หรือ คัพภะ (Embryo) อยู่ติดกับเนื้อเมล็ดทางด้านเปลือกใหญ่ที่หุ้มเมล็ด เป็นส่วนที่จะเจริญเป็นต้นต่อไป โดยส่วนต้นอ่อนนี้จะมีโปรตีนและไขมันสูง (ศิริมา, 2547)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา : อรอนงค์ (2550)

2.1.2 ข้าวกล้อง

ข้าวเปลือกเมื่อนำมากะเทาะเปลือกออกจะได้ข้าวกล้อง เมื่อนำข้าวกล้องไปขัดสีจะได้ข้าวขาวหรือข้าวสาร เมล็ดข้าวกล้องมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 50 ข้าวหักร้อยละ 19 รำหยาบร้อยละ 10 รำละเอียดร้อยละ 1 และแกลบร้อยละ 20 เนื่องจากข้าวกล้องมีการขัดสีเพียงครั้งเดียวจึงยังคงมีส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดและคัพภะติดอยู่กับเนื้อเมล็ด ทำให้ข้าวกล้องมีคุณค่าทางโภชนาการมากกว่าข้าวขัดขาว ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณค่าทางโภชนาการของข้าวกล้องและข้าวขัดขาว (ต่อน้ำหนัก 100 กรัม)

สารอาหาร	หน่วย	ข้าวกล้อง	ข้าวขาว	ดีกว่า (ร้อยละ)
โปรตีน	กรัม	7.60	6.40	19
วิตามินบี 1	มิลลิกรัม	0.34	0.07	385
วิตามินบี 2	มิลลิกรัม	0.05	0.03	66
ไนอะซิน	มิลลิกรัม	0.62	0.11	463
กรดแพนโทเทนิค	มิลลิกรัม	1.50	0.22	81
กรดโฟลิก	มิลลิกรัม	20.00	3.00	455
เหล็ก	มิลลิกรัม	1.60	0.80	100
แคลเซียม	มิลลิกรัม	32.00	24.0	33
แมกนีเซียม	มิลลิกรัม	52.00	14.0	271
แมงกานีส	มิลลิกรัม	1.50	0.90	67
สังกะสี	มิลลิกรัม	1.90	1.50	27
โคบอลต์	ไมโครกรัม	4.20	0.90	367
ทองแดง	ไมโครกรัม	360.00	230.00	57
ซีลีเนียม	ไมโครกรัม	38.80	31.80	22
ไอโอดีน	ไมโครกรัม	2.20	2.00	10

ที่มา : กรมอนามัย (2535)

2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าว คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำหรือความชื้น ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของข้าวทั้งในลักษณะข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร โดยคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีสตาร์ชเป็นหลัก และสตาร์ชนี้ประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกทินในสัดส่วนต่างๆกันขึ้นอยู่กับชนิดของข้าว ทำให้ข้าวมีลักษณะในการหุงต้มและคุณภาพในการรับประทานต่างกันไป ตลอดจนคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากแหล่งสะสมพลังงาน โปรตีนในข้าวยังนับว่าเป็นแหล่งอาหารโปรตีนหลัก ส่วนไขมันในข้าวจะอยู่ในกลุ่มไขมันที่มีรูปร่าง หรือหยดกลม โดยอยู่ร่วมกับเม็ดสตาร์ชและโปรตีนในชั้นแอลิวโรนและคัพกะ ซึ่งมีผลให้การเสื่อมเสียขณะเก็บรักษาเมล็ด รวมทั้งเมล็ดที่แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆและน้ำหรือความชื้น มีผลต่อคุณภาพข้าวเป็นต้น (อรอนงค์, 2550)

1.) **คาร์โบไฮเดรต** พบในเมล็ดข้าว 3 ประเภท ได้แก่ สตาร์ช โพลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช และน้ำตาลอิสระ

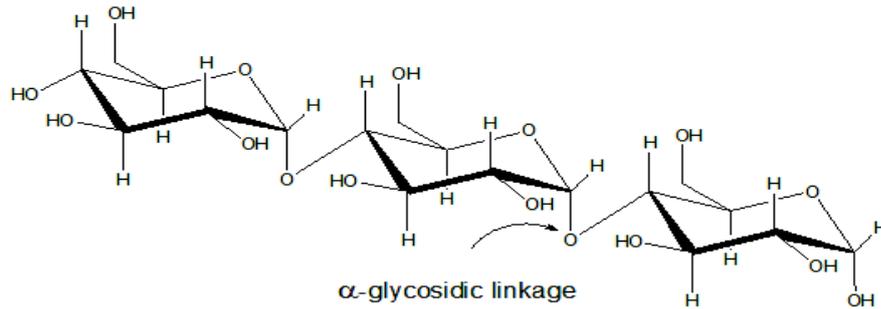
1.1) **สตาร์ช** เป็นองค์ประกอบหลักของเมล็ดข้าว โดยประกอบด้วยอะไมโลส ร้อยละ 7 - 33 ของน้ำหนักเมล็ดข้าวสาร ส่วนที่เหลือคืออะไมโลเพกตินประมาณร้อยละ 67 - 93 ลักษณะและคุณสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินมีผลต่อลักษณะของข้าวสุก ซึ่งสามารถจำแนกตามกลุ่มของข้าวตามปริมาณอะไมโลส ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การจำแนกลักษณะข้าวสุกตามปริมาณอะไมโลส

ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)	ชนิดข้าว	ลักษณะข้าวสุก
1-2	ข้าวเหนียว	เหนียวมาก
2-9	ข้าวเจ้าอะไมโลสต่ำมาก	เหนียว นุ่ม
9-20	ข้าวเจ้าอะไมโลสต่ำ	เหนียว นุ่ม
20-25	ข้าวเจ้าอะไมโลสปานกลาง	นุ่ม ค่อนข้างเหนียว
25-33	ข้าวอะไมโลสสูง	ร่วน แข็ง

โดยข้าวอะไมโลสต่ำ ได้แก่ พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 กข15 และ กข21 เป็นต้น ข้าวอะไมโลสปานกลาง ได้แก่ พันธุ์ กข7 กข 23 และสุพรรณบุรี 60 เป็นต้น และข้าวอะไมโลสสูง ได้แก่ พันธุ์ กข11 กข 25 และเหลืองประทิว 123 เป็นต้น (งามชื่น, 2536)

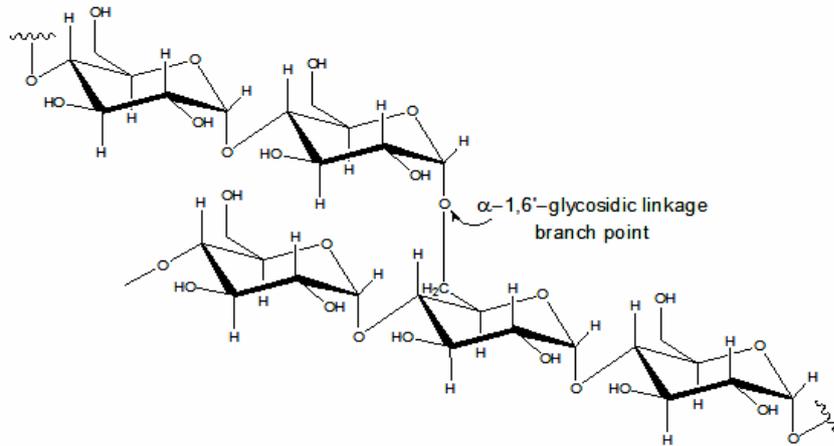
- **อะไมโลส** ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสจัดเรียงตัวกันเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (linear chain) ด้วยพันธะแอลฟา-1,4 มีโซ่กิ่ง (branched chain) อยู่ประมาณ 3-4 กิ่ง ด้วยพันธะแอลฟา-1,6 เมื่อย่อยด้วยเอนไซม์ บีตา-อะไมโลเลส ได้ส่วนที่เหลือจากการย่อยประมาณร้อยละ 73-81 มีระดับชั้นของพอลิเมอร์ไรเซชันเฉลี่ย 1,000-1,100 มีความยาวของสายเฉลี่ย 250-320 จำนวนสายเฉลี่ย 3.4-4.0 และมีโมเลกุลที่เป็นกิ่งก้านร้อยละ 31-49 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลสมีหลายรูปแบบ เช่น สายตรง สายพันเป็นเกลียวเดี่ยว หรือ คู่ มีลักษณะเกลียวม้วน หรือเกลียวที่คลายตัวหรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (อรอนงค์, 2550)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส

ที่มา : อรอนงค์ (2550)

- **อะไมโลเพกติน** ประกอบด้วย น้ำตาลกลูโคสที่จัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์ที่มีโซ่กิ่งเป็นแขนงมาก ประมาณร้อยละ 96 ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4 และอีกร้อยละ 4 ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,6 มีระดับขั้นการพอลิเมอไรเซชันเฉลี่ย 4,700-18,500 ความยาวของสายเฉลี่ย 18-21 มีจำนวนสายเฉลี่ย 220-1,000 โดยความยาวของสายภายนอกเฉลี่ย 12-14 และความยาวของสายภายในเฉลี่ย 5-6 โครงสร้างของอะไมโลเพกตินมีลักษณะกิ่งก้านในลักษณะโซ่กิ่งเกลียวคู่ จากสายที่ต่อกันด้วยน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้น ซึ่งมีคาร์บอนตัวที่หนึ่งเป็นหมู่อิควิง ดังนั้น โมเลกุลของอะไมโลเพกตินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสายแกนหนึ่งสายเท่านั้น (C-chain) สำหรับสายที่มาต่อกับสายนี้จะเป็นสายกิ่งเชื่อม (B-chain) ต่อกับสายอื่นๆ และสายที่มีจุดเชื่อมตำแหน่งเดียว (A-chain) รวมอยู่ในโมเลกุลของอะไมโลเพกตินจำนวน $10^4 - 10^5$ สาย โดยมีสัดส่วนของสายโซ่กิ่งกับสายเชิงเส้นประมาณ 1.0 ทั้งสายโซ่กิ่งและสายเชิงเส้นประมาณ 22-25 สาย รวมกันเป็นกลุ่ม แต่ละกลุ่มซึ่งอยู่ในบริเวณผลึกของเม็ดสตาร์ช สำหรับพันธุ์ข้าวเหนียวซึ่งมีอะไมโลเพกตินเกือบร้อยละ 100 กลุ่มสายโซ่กิ่งจะรวมเป็นกลุ่มเดี่ยวร้อยละ 80-90 และกลุ่มที่เกาะกันระหว่างกลุ่มอีกประมาณร้อยละ 10-20 (อรอนงค์, 2550)



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพกติน

ที่มา : อรอนงค์ (2550)

เมื่อนำเมล็ดข้าว หรือแป้งข้าวมานผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งโดยทั่วไปต้องมีน้ำ และความร้อนมาเกี่ยวข้องเสมอ และจากการที่องค์ประกอบหลักในเมล็ดข้าว หรือแป้งข้าวคือ สตาร์ช ดังนั้น การตรวจสอบคุณสมบัติ หรือลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชจึงมีผลโดยตรงต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวหรือแป้งข้าว ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงคุณภาพของข้าวหรือแป้งข้าวที่ใช้นำมาเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปว่าเหมาะสมต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จากข้าวนั้นหรือไม่ ตามความต้องการของผู้บริโภค (อรอนงค์, 2550)

1.2) โพลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช คือเส้นใยประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส เพกติน ลิกนิน

1.3) น้ำตาลอิสระ ได้แก่ ซูโครส พบมากในส่วนของคัพภะและเนื้อเมล็ด นอกจากนั้นเป็น ราฟไฟโนส กลูโคส และฟรุกโตส ส่วนคัพภะปริมาณน้ำตาลทั้งหมดประมาณร้อยละ 8-25 (ศิริมา, 2547)

2.) โปรตีน โปรตีนในข้าวมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และโดยทั่วไปจะมีปริมาณน้อยกว่าในธัญชาติชนิดอื่น (อรอนงค์, 2550) โปรตีนในเมล็ดข้าวอยู่ในรูปโปรตีนบอดี (Protein body) ซึ่งประกอบด้วย โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต นอกจากนี้โปรตีนในข้าวยังอยู่ในรูปกรดนิวคลีอิกและกรดอะมิโนอิสระ ได้แก่ อะลานีน กรดแอสพาร์ติก แอสพาราจีน วาลีน กรดกลูตามีน ฮีสติดีน และออร์นิติน ข้าวกล้องมีโปรตีนมากกว่าข้าวสารเล็กน้อย เนื่องจากโปรตีนสะสมมากอยู่บริเวณผิวนอกเมล็ด ในส่วนของรำข้าวมีเอนไซม์ที่สำคัญคือ ไลเพส ไลพอกซิจีเนส และเพอร์ออกซิเดส (ศิริมา, 2547)

Cagampang *et al.* (1973) สกัดโปรตีนจากข้าว 3 สายพันธุ์ พบว่าประกอบด้วยโปรตีนที่ละลายในน้ำ หรือ แอลบูมิน (albumin) ประมาณร้อยละ 3.8-8.8 ของโปรตีนทั้งหมด โปรตีนที่ละลายในเกลือ หรือ โกลบูลิน (globulin) ประมาณร้อยละ 9.6-10 โปรตีนที่ละลายในแอลกอฮอล์ หรือ โพรลามิน (prolamin) หรือ ออไรซานิน (oryzanin) ประมาณร้อยละ 66.1-78.0 ซึ่งเป็นโปรตีนหลักที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนสะสม เนื่องจากโปรตีนที่มีอยู่ในเนื้อเมล็ดจะแทรกอยู่ระหว่างเมล็ดสตาร์ช และเชื่อมโยงกับเมล็ดสตาร์ชอาจมีผลต่อการเกิดเจลลาตินในซังของเมล็ดสตาร์ช โดยทำให้การพองตัวของเมล็ดสตาร์ชไม่เสถียรปร่างได้ง่าย และทำให้โมเลกุลของอะไมโลสไม่ซึมผ่านออกมา มีผลต่อลักษณะความอ่อน หรือ แข็งของเจลเมื่อเย็นลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก Chrastil (1990) ทดลองหาอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโปรตีนออไรซานินกับสตาร์ชของข้าวในขณะเก็บรักษา พบว่าความเหนียวของข้าวหุงสุกมีผลมาจากการเกาะเกี่ยวกันของออไรซานินกับโมเลกุลของสตาร์ชทั้งส่วนอะไมโลส และอะไมโลเพกติน โดยโครงสร้างของโปรตีนส่วนที่มีพันธะไดซัลไฟด์จะเกาะเกี่ยวกับเมล็ดสตาร์ชและขัดขวางการพองตัวของเมล็ดสตาร์ชทำให้ความเหนียวและความเหนียวลดลง

3.) **ไขมัน** พบในเมล็ดข้าวอยู่ในลักษณะเป็นหยดกลม (Lipid droplets) แทรกอยู่ในชั้นเอนโดพลาสมิกเรติคูลัม สำหรับไขมันในส่วนของเนื้อเมล็ดจะพบเกาะอยู่ร่วมกับกลุ่มโปรตีน และในเมล็ดสตาร์ชจะมีไขมันชนิดที่มีโครงสร้างร่วมกับสารอื่น (Bound Lipids) เมื่อนำไขมันที่สกัดจากส่วนต่างๆ มาวิเคราะห์องค์ประกอบและชนิดของไขมัน พบว่าไขมันมีมากในส่วนของคัพภะและเยื่อหุ้มเมล็ด สำหรับองค์ประกอบมีกรดไขมันพาล์มมิติก โอเลอิก และลิโนเลอิกใกล้เคียงกัน ในเมล็ดมีกรดโอเลอิกมากที่สุด ข้าวสารมีกรดไขมันพาล์มมิติก และลิโนเลอิกมากที่สุด ในการสกัดไขมันออกจากส่วนต่างๆ ทำให้แบ่งลักษณะไขมันที่สกัดได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ ไขมันที่สกัดได้จากสตาร์ช (Starch lipids) และไขมันที่ไม่ได้มาจากสตาร์ช (Non - starch lipids) เมื่อนำไขมันที่สกัดจากส่วนต่างๆ มาวิเคราะห์องค์ประกอบและชนิดของไขมัน พบว่าเป็นกลุ่มไขมันที่เป็นกลาง (Neutral lipids) ร้อยละ 82-91 (ไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละ 73-82 กรดไขมันอิสระ ร้อยละ 13-17 และเอซิล สเตอรอล ไกลโคไซด์ ร้อยละ 2-4) กลุ่มฟอสโฟไลพิด ร้อยละ 7-10 และไกลโคไลพิด ร้อยละ 2-8 (Juliano, 1985) ไขมันที่อยู่ร่วมกับกลุ่มโปรตีนประกอบด้วยกรดไขมันไมริสติก ร้อยละ 1 กรดพาล์มมิติก ร้อยละ 30-35 กรดสเตียริก ร้อยละ 2 กรดโอเลอิก ร้อยละ 20-26 กรดลิโนเลอิก ร้อยละ 42 สำหรับไกลลิพิด ประกอบด้วยกรดพาล์มมิติก ร้อยละ 32 กรดโอเลอิก ร้อยละ 19 และกรดลิโนเลอิก ร้อยละ 43 ส่วนฟอสโฟลิพิด ประกอบด้วยกรดพาล์มมิติก ร้อยละ 41 กรดโอเลอิก ร้อยละ 19 และกรดลิโนเลอิก ร้อยละ 36 (อรอนงค์, 2550) ข้าวมีปริมาณไขมันประมาณร้อยละ 3 คล้ายคลึงัญชาติชนิดอื่น และมีอยู่ในส่วนด้านนอกของเมล็ดมากกว่าในใจกลางเมล็ด ดังนั้นการขัด

สีข้าวให้ขาวทำให้ข้าวสารมีไขมันอยู่เพียงร้อยละ 0.3-0.5 (Hoseney, 1986) ซึ่งไขมันที่เกาะเกี่ยว (bound lipids) กับสารอื่นอยู่ประมาณร้อยละ 0.3-0.4 โดยไขมันมีความสัมพันธ์กับเมล็ดสตาร์ช 3 ลักษณะ คือ ไขมันอยู่ชิดกันกับ โปรตีน ซึ่งอยู่ที่ผิวของเมล็ดสตาร์ชภายนอก หรืออาจอยู่ร่วมกับ โครงสร้างของอะไมโลเพกตินสายนอก ส่วนผิวของเมล็ดสตาร์ชลักษณะที่สองไขมันอยู่ภายในเมล็ด สตาร์ชโดยเกาะเกี่ยวอยู่กับสตาร์ช และลักษณะที่สามคืออยู่ภายในเมล็ดสตาร์ช แต่ไม่เกาะเกี่ยวกับ สตาร์ช (Morrison, 1988) ปริมาณไขมันทั้งหมดในข้าวขัดขาวและข้าวกล้องหอมมะลิ 105 มี ประมาณ ร้อยละ 0.57 และ 0.68 ตามลำดับ โดยมีปริมาณไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบมากที่สุด รองลงมาคือไดกลีเซอไรด์ มอนอกลิเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระ ตามลำดับ ซึ่งกรดไขมัน อิสระที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในไตรกลีเซอไรด์ในข้าวขัดขาวและข้าวกล้องคือ กรดลิโนเลอิก และกรดโอเลอิก (สุภาวดี, 2542)

4.) **วิตามิน และแร่ธาตุ** วิตามินที่สำคัญในเมล็ดข้าว ได้แก่ วิตามินเอ วิตามินบี 1 และ วิตามินบี 2 ไนอะซิน ไพริดอกซิน กรดแพนโททีนิก ไบโอติน กรดโฟลิก วิตามินบี 12 และวิตามินอี โดยวิตามินอี พบมากในรำข้าว คัพกะ และเยื่อแอร์วาลอน เป็นแหล่งสะสมของวิตามิน ดังนั้นข้าว กล้องจึงมีวิตามินมากกว่าข้าวขัดขาว ส่วนแร่ธาตุในเมล็ดข้าวขึ้นกับสารอาหารในดิน ข้าวกล้องมีแร่ ธาตุมากกว่าข้าวขัดขาว โดยฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เป็นแร่ธาตุหลักที่พบในข้าวกล้อง รองลงมาคือ ซิลิคอน และแมกนีเซียม

ตารางที่ 2.4 ปริมาณวิตามินและเกลือแร่ของข้าวกล้อง ที่ความชื้นร้อยละ 14

วิตามินและเกลือแร่	ปริมาณ
ไทอะมิน (มิลลิกรัม)	0.29 – 0.61
ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม)	0.04 – 0.14
ไนอะซิน (มิลลิกรัม)	3.50 – 5.30
แอลฟา-ทอโคเฟอรอล (มิลลิกรัม)	0.90 – 2.50
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	10.00 – 50.00
ฟอสฟอรัส (กรัม)	0.17 – 0.43
ไพทีนฟอสเฟต (กรัม)	0.13 – 0.27
เหล็ก (กรัม)	0.20 – 5.20
สังกะสี (มิลลิกรัม)	0.60 -2.80

ที่มา : Juliano (1993)

5.) ปริมาณความชื้น องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับคุณภาพของข้าว ทั้งทางตรงและทางอ้อม คือ ปริมาณความชื้นของข้าวทั้งในข้าวเปลือกและข้าวสาร ใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำคัญเพื่อการซื้อขายข้าว เนื่องจากปริมาณความชื้นสามารถบ่งชี้ถึงน้ำหนักของเนื้อข้าวในการซื้อขายโดยตรง ส่วนทางอ้อมนั้นความชื้นสามารถบอกถึงอายุการเก็บรักษาข้าวหรือบ่งบอกถึงความปลอดภัยในการเก็บรักษาให้ข้าวมีคุณภาพดี จากการทดลองพบว่าข้าวที่มีความชื้นสูงจะเสื่อมสภาพเร็วกว่าข้าวที่มีความชื้นต่ำ ระดับความชื้นทั่วไปของข้าวที่ยอมรับว่าปลอดภัยต่อการเก็บรักษา คือ ความชื้นไม่เกินร้อยละ 14 จะเก็บรักษาได้ 6 เดือน และหากความชื้นต่ำกว่านั้นจะเก็บรักษาได้นานขึ้น และการตากข้าวเปลือกให้มีความชื้นอยู่ในระดับที่ปลอดภัยจนถึงเวลาการสีข้าวเปลือกก็จะทำให้ได้ข้าวเต็มเมล็ดสูง และเกิดแตกหักน้อย (Juliano, 1985)

6.) กลิ่นสารระเหยของข้าว ข้าวบางสายพันธุ์มีกลิ่นสารระเหยบางชนิดที่ผู้บริโภคบางกลุ่มชอบ แต่บางกลุ่มไม่ชอบ ซึ่งเป็นกลิ่นที่มีอยู่ประจำสายพันธุ์ เช่น ข้าวหอมที่ซื้อขายกันตามท้องตลาดข้าวของโลก คือ พันธุ์ข้าวที่มีสาร 2-แอซิติล-1-ไพร์โรลีน (2-acetyl-1-pyrroline) ซึ่งเป็นสารหลักของกลิ่นหอมจากข้าว โดยข้าวหอมที่อยู่รูปของข้าวกล้องจะมีสารนี้อยู่ประมาณ 0.1-0.2 ไมโครกรัม/กรัม (น้ำหนักแห้ง) ในขณะที่ข้าวสารมีเพียง 0.04-0.09 ไมโครกรัม/กรัม (น้ำหนักแห้ง) ส่วนกลิ่นเหม็นอาจเกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิ่มตัว กรดอะมิโนที่มีสารไดซัลเฟอร์ในโมเลกุล สารประเภทไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ หรือ อะซิทาลดีไฮด์ซึ่งเป็นกลิ่นที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ (Juliano, 1985 ; Juliano, 1993)

2.1.4 การเสื่อมคุณภาพของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา

การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงของสตาร์ช ไขมัน ผนังเซลล์ และโปรตีน โดยสตาร์ชสร้างพันธะที่แข็งแรงกับสารอื่น เช่น อะไมโลส และหมู่ sulphhydryl ของโปรตีน ทำให้การพองตัวของเมล็ดสตาร์ชลดลงและเมื่อนำไปหุงสุก พบว่าลักษณะเนื้อสัมผัสมีความแข็งขึ้น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่พันธะเอสเทอร์ของเอมิเซลลูโลสทำให้เกิดการสร้างพันธะส่งผลให้ผนังเซลล์มีความแข็งเพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไขมันในเมล็ดข้าวเป็นอีกสาเหตุของการเสื่อมคุณภาพของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา โดยจะส่งผลต่อการเกิดกลิ่นหืนซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Zhou et al., 2002)

1.) การเกิดไฮโดรไลซิสของไขมันในข้าวจากเอนไซม์ไลเปส

การเกิดไฮโดรไลซิสของไขมันในข้าว มักเกิดภายหลังการสีข้าว เนื่องจากการขัดสีไปทำลายโครงสร้างชั้นต่างๆของข้าว มีผลทำให้เอนไซม์ไลเปสซึ่งอยู่ในเยื่อหุ้มเมล็ดมีโอกาสสัมผัสกับไขมันที่อยู่ในชั้นแอริวโลน คัพกะ และเนื้อเมล็ดได้ จึงทำให้เกิดไฮโดรไลซิส ไขมันในรำข้าวพบอยู่ในรูปหยดกลม มีเยื่อหุ้มเป็นสารประเภทไขมันจำพวกฟอสโฟลิพิด ส่วนภายในเป็นพวกสารไตรกลีเซอไรด์ การเกิดไฮโดรไลซิสเริ่มจากเอนไซม์ฟอสโฟไลเปส-ดี (Phospholipase-D) ย่อยสลายฟอสโฟลิพิดที่เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้ม spherosome ทำให้แตกออก และเอนไซม์ไลเปสเข้าไปย่อยสลายไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ภายในเกิดเป็นกรดไขมันอิสระขึ้น กรดไขมันอิสระเหล่านี้มีผลต่อการเกิดกลิ่นหืนในเมล็ดข้าวได้ เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ปริมาณกรดไขมันอิสระจะเพิ่มมากขึ้นด้วย เอนไซม์ไลเปสมีความจำเพาะต่อการไฮโดรไลซ์พันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลของกลีเซอไรด์ซึ่งเอนไซม์ไลเปสในเมล็ดข้าวมาจาก 2 แหล่ง คือ เอนไซม์ที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวตามธรรมชาติ โดยพบมากที่สุดที่ชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด รองลงมาคือส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดชั้นกลาง และแหล่งที่สอง คือ เอนไซม์ที่สร้างขึ้นจากแบคทีเรียที่ปนเปื้อนมา (ศิริมา, 2547)

สุภาวดี (2542) พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ไลเปสในข้าวขัดขาวและข้าวกล้องหอมมะลิ 105 เท่ากับ 5.56 และ 6.20 หน่วย/กรัมน้ำหนักข้าวแห้ง และมีกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลเปสในข้าวขัดขาวและข้าวกล้อง คือ 1.96 และ 2.26 หน่วย/มิลลิกรัมโปรตีน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าระดับการขัดสีข้าวที่มากขึ้น มีผลให้กิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลเปสลดลง

สาโรจน์และคณะ (2540) ศึกษาสมบัติของเอนไซม์ไลเปสจากรำข้าวหอมมะลิ พบว่าเอนไซม์ไลเปสที่สกัดได้ มีค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสม ต่อการทำงาน คือ 6.6 และสามารถคงตัวอยู่ได้ในความเป็นกรด-เบสช่วง 4-9 อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงาน คือ 35 องศาเซลเซียส และคงตัวอยู่ได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 20-45 องศาเซลเซียส

2.) การเกิดออกซิเดชันของกรดไขมันอิสระในข้าว

การเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันชนิดที่ไม่อิ่มตัว ในกระบวนการออกซิเดชันทำให้เกิดสารประกอบคาร์บอนิลหลายชนิดมากขึ้น เช่น แอซีตัลดีไฮด์ โพรพานอล 2-บิวาโนน เพนทานอล และเฮกซานอล (อรอนงค์, 2550) เมล็ดข้าวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ไลเปสออกซิจีเนสและเกิดการออกซิเดชันออกซิเดชัน ดังนี้

2.1) เอนไซม์ไลเปสออกซิจีเนส

เป็นสารชีวโมเลกุลที่มีความจำเพาะต่อการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยเฉพาะกรดไขมันที่มีพันธะคู่ 2 ตำแหน่ง ที่เป็น conjugate diene ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของเอนไซม์ไลเปสและไฮโดรเลสในการสลายโมเลกุลของไขมัน ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ เช่น กรด

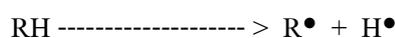
ลิโนเลอิก กรดลิโนเลนิก ซึ่งเป็นกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว เป็นซัสเตรตที่ดีของเอนไซม์ไลพอกซิเจเนส โดยซัสเตรตนี้ไม่ละลายในตัวทำละลายอิมัลชันที่ค่าความเป็นกรด-เบส ที่ต่ำกว่า 7.0 กรดไขมันอิสระสามารถเกิดออกซิเดชันได้โดยการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ไลพอกซิเจเนสได้ สารประกอบที่ไม่เสถียรสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ สารประกอบจำพวก อัลดีไฮด์ คีโตน และ แอลกอฮอล์ ซึ่งก่อให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ (อรอนงค์, 2550) โดยปกติเอนไซม์ไลพอกซิเจเนสจะจับอยู่กับเหล็กในรูป $E-Fe^{++}-O_2$ ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่สามารถทำงานได้ แต่เมื่อมีสารประกอบไฮโดรเพอร์ออกไซด์ซึ่งได้จากกรดไขมันอิสระ เช่น 13-L-ROOH ทำให้เกิดการดึงออกซิเจนออกไปทำให้เอนไซม์อยู่ในรูป $E-Fe^{+++}$ ซึ่งพร้อมจะทำงานได้ เอนไซม์ที่พร้อมทำงานนี้จะดึงเอาอะตอมของไฮโดรเจนของไขมันทำให้เอนไซม์อยู่ในรูป $E-Fe^{++}\dots R\cdot$ ซึ่งสามารถเกิดออกซิเดชันได้โดยการได้รับออกซิเจนในวิถี (pathway) การเกิดออกซิเดชันแบบต้องการออกซิเจนและแบบไม่ใช้เอนไซม์ต่อไป

การเกิดออกซิเดชันของข้าวในระหว่างการเก็บรักษาจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขมันในข้าว เอนไซม์ไลพอกซิเจเนสในเมล็ดข้าวมีการสะสมอยู่มากในส่วนของคัพภะและเยื่อหุ้มเมล็ด โดยอยู่ใน 3 รูปแบบ คือ Lox-1 Lox-2 และ Lox-3 โดยมีค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการเกิดกิจกรรมแตกต่างกัน คือ 4.5, 5.5 และ 7.0 ตามลำดับ โดยเอนไซม์ไลพอกซิเจเนสที่อยู่ในรูป Lox-3 เป็นองค์ประกอบที่พบมากที่สุด Lox-3 ในเมล็ดข้าวมีน้ำหนักโมเลกุล 95,000 ซัสเตรตหลัก คือ กรดลิโนเลอิก สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการออกซิเดชันกรดลิโนเลอิก คือ 9-hydroperoxide ร้อยละ 65 และ 13-hydroperoxide ร้อยละ 35 เมื่อได้รับความร้อน linolate-hydroperoxide เกิดการแตกตัวได้สารประกอบ hexanal และ 2-nonenal

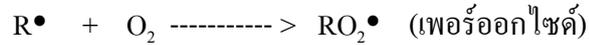
2.2) การเกิดออโตออกซิเดชันในข้าว (Autoxidation)

การเกิดออโตออกซิเดชันของไขมันเกิดโดยมีโลหะ และแสง เป็นตัวเร่งให้เกิดการสลายตัวของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวได้ อธิบายขั้นตอนการเกิดออโตออกซิเดชัน แบ่งได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

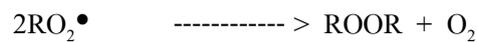
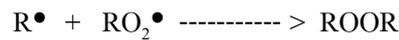
- **ขั้นต้น (Initiation)** ในขั้นนี้โมเลกุลของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเสียไฮโดรเจนไป เกิดเป็นอนุมูลอิสระ และออกซิเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยา เกิดเป็นสารประกอบของอนุมูลอิสระ เช่น peroxy radical ($RO_2\cdot$) alkoxy radical ($Ro\cdot$) และ alkyl radical ($R\cdot$)



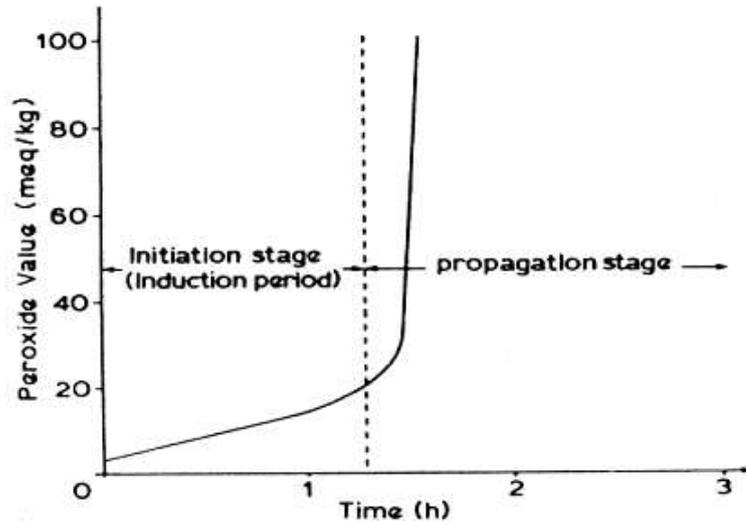
- **ขั้นต่อเนื่อง (Chain propagation)** เป็นขั้นตอนที่ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ เกิดเป็นอนุมูลตัวใหม่ และเกิดปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ ดังนี้



- **ขั้นสุดท้าย (Chain termination)** ขั้นตอนนี้ออนุมูลจะรวมตัวกันเอง เกิดเป็นสารประกอบที่เป็นกลางและมีเสถียรภาพไม่ทำปฏิกิริยาต่อไป

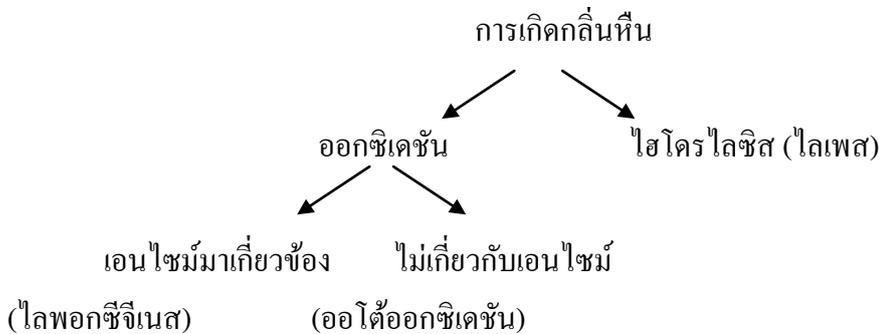


การเกิดออกซิเดชันในช่วงแรกปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้าๆด้วยอัตราเร็วที่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นระยะเหนี่ยวนำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ช่วงแรกเป็นสารประกอบเพอร์ออกไซด์ สารประกอบเพอร์ออกไซด์จะเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดที่เกิดออกซิเดชันอย่างรวดเร็ว ความสัมพันธ์ของค่าเพอร์ออกไซด์และระยะเวลา แสดงดังภาพที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรก ค่าเพอร์ออกไซด์มีปริมาณต่ำและเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่ในช่วงนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเพอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเข้าสู่ช่วงที่สอง กลิ่นหืนจะเกิดขึ้นที่จุดเริ่มของช่วงที่สอง (Allen and Hamilton, 1994) นอกจากนี้การเกิดออกซิเดชันของกรดไขมันที่ไม่มีอิมัลซิไฟเออร์ทำให้เกิดสารประกอบคาร์บอนิลหลายชนิด โดยพบว่าเมื่อใช้กรดโอเลอิก กรดลิโนเลอิก และกรดลิโนเลนิก เป็นซับสเตรตในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสารประกอบคาร์บอนิลที่มีปริมาณมากที่สุด ได้แก่ nonnal hexanal และ hepta-trans-2 cis-4-dienal ตามลำดับ



ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์ออกไซด์ของไขมันกับเวลา ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
ที่มา : Allen and Hamilton (1994)

การเกิดกลิ่นหืนในข้าวแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้ (Barnes and Galliard, 1991) :



2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการเก็บรักษาข้าวกล้อง

อายุการเก็บรักษา หมายถึง ช่วงระยะเวลาการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์จนกระทั่งผลิตภัณฑ์นั้นอยู่ในรูปที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ อายุการเก็บรักษามีความสัมพันธ์กับธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ ภาชนะบรรจุ และสภาพแวดล้อมในระหว่างการเก็บรักษา ข้าวกล้องมีคุณค่าทางโภชนาการสูง แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดคืออายุการเก็บรักษาสั้นเพราะ ข้าวกล้องมีปริมาณไขมันมากจึงเกิดกลิ่นหืนระหว่างการเก็บรักษาทำให้อายุการเก็บรักษาสั้น และข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือหุงสุกช้าเพราะข้าวกล้องมีส่วนเยื่อหุ้มเมล็ดหนาเป็นไขห่อหุ้มเมล็ดข้าวอยู่ทำให้การดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าวลดลง ต้องใช้เวลาในการหุงต้มนาน

1.) อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการยึดหรือลดอายุการเก็บข้าวกล้อง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะเกิดกลิ่นหืนในข้าวกล้องได้เร็ว Shibuya *et al.* (1974) รายงานว่าการเก็บข้าวกล้องที่อุณหภูมิ 30 และ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 75 วัน เมื่อนำมาหุงต้ม พบว่า สารระเหยเฮกซานาล เพนทานาล และ 3-เมทิลบิวทานาล ที่บ่งบอกกลิ่นหืนในข้าวกล้องที่เก็บ ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นในปริมาณร้อยละ 57.4 และ 2 ตามลำดับ ส่วนข้าวกล้องที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีปริมาณสารดังกล่าวเพียงร้อยละ 31.2 และ 1 เท่านั้น สอดคล้องกับการทดลองของ Shin *et al.* (1986) ได้ทำการเก็บรักษาข้าวกล้องเป็นเวลา 1 ปี ที่อุณหภูมิ 5 และ 35 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณเฮกซานาลเป็นตัวบ่งบอกกลิ่นหืน พบว่าที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดกลิ่นหืนมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำและนอกจากนี้อุณหภูมิสูงจะทำให้ข้าวกล้องมีสีคล้ำกว่าการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ จากการทดลองของ ละมุล (2541) พบว่าการเก็บรักษาข้าวกล้องที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ทำให้ข้าวมีสีเหลือง (ค่า b) มากกว่า ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

2.) เวลา

โดยทั่วไปข้าวกล้องจะมีอายุการเก็บรักษาประมาณ 3-6 เดือน เมื่อเก็บรักษานานขึ้นคุณภาพของข้าวกล้องจะลดลง Sharp และ Timme (1986) ได้มีการทดลองเก็บข้าวกล้องที่มีความชื้นร้อยละ 11.4 บรรจุใส่ถุงโพลีเอทิลีนภายใต้สภาวะสุญญากาศ เป็นเวลา 9 เดือน พบว่าเมื่อเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ปริมาณกรดไขมันอิสระจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.81 ในเดือนแรกเป็นร้อยละ 9.67 ในเดือนที่ 9 กรดไขมันนี้ถูกออกซิไดส์เป็นสารอื่น ที่ก่อให้เกิดกลิ่นหืนที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ จึงต้องอาศัยปัจจัยอื่นเข้าช่วยในการยืดอายุ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และชนิดภาชนะบรรจุ เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Ory *et al.* (1980) ที่เก็บข้าวกล้องบรรจุถุงพลาสติกในสภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสภาพปกติ ที่อุณหภูมิ 4 และ 24 องศาเซลเซียส นาน 7 เดือน พบว่าที่อุณหภูมิการเก็บเดียวกัน การเก็บรักษาข้าวกล้องในสภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลิ่น และรสชาติ ซ้ำกว่าการเก็บรักษาในสภาพปกติและเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงกลิ่น และรสชาติน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส

3.) ภาชนะบรรจุ

ภาชนะบรรจุ หมายถึง บรรจุภัณฑ์ที่ทำหน้าที่ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ สามารถคุ้มครองและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ตลอดอายุการเก็บรักษา การพิจารณาเลือกใช้ภาชนะบรรจุอาศัยหลักเกณฑ์ ดังนี้ คือ เมื่อบรรจุผลิตภัณฑ์แล้วต้องไม่เปลืองเนื้อที่ขณะขนส่ง การบรรจุควรทำได้ง่าย เลือกวัสดุที่ใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สะดวกในการกำจัดซาก และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสภาพแวดล้อม (วุฒิชัย, 2545) สำหรับภาชนะบรรจุข้าวควรทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติ

ป้องกันแสง ออกซิเจน การซึมผ่านของความชื้น ป้องกันการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ การซึมผ่านของกลิ่นไม่พึงประสงค์และต้องมีความแข็งแรงป้องกันการแตกหักของเมล็ดข้าวได้ โดยในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด ได้แก่ ถุงโพลีเอทิลีน และ ถุงเคลือบอะลูมิเนียม

- **ถุงโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE)**

ถุงโพลีเอทิลีน เป็นถุงพลาสติกที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย โครงสร้างโพลิเมอร์ของโพลีเอทิลีนนั้นเรียบง่ายไม่ซับซ้อน คุณลักษณะของโพลีเอทิลีนนั้นเปลี่ยนแปลงตามค่าความหนาแน่น โดยความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนสามารถแบ่งได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ชนิดและความหนาแน่นของฟิล์มโพลีเอทิลีน

ชนิด	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
HDPE (High - density polyethylene)	0.941 – 0.959
MDPE (Medium - density polyethylene)	0.926 – 0.939
LDPE (Low - density polyethylene)	0.910 – 0.925
LLDPE (Linear – Low - density polyethylene)	0.910 – 0.925

ที่มา : ทักษ (2547)

คุณสมบัติที่สำคัญของโพลีเอทิลีน

- ความหนาแน่น เพิ่มขึ้น ความใสจะลดลง
- นิยม ยืดหยุ่น มีความเหนียวสูง ฉีกขาดยาก
- ดูดซึมน้ำได้ต่ำมาก ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี
- ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี (HDPE ป้องกันได้ดีกว่า PE ชนิดอื่น) จึงสามารถป้องกัน

กลิ่นได้น้อย

- ป้องกันการซึมผ่านของไขมัน น้ำมันได้ดี (HDPE ป้องกันได้ดีกว่า PE ชนิดอื่น)
- มีความคงรูปต่ำ (HDPE คงรูปดีกว่า PE ชนิดอื่น)
- ปิดผนึกด้วยความร้อนได้ดี (ยกเว้น HDPE) ปิดผนึกที่ 122-155 องศาเซลเซียส
- มีความปลอดภัย สามารถใช้กับอาหาร และยาได้
- สามารถใช้ร่วมกับวัสดุอื่น เช่น พลาสติกต่างชนิด กระดาษ และอะลูมิเนียม ในลักษณะ

ของการประกบ หรือการฉีกร่วม เพื่อเสริมคุณสมบัติในการใช้งานให้เหมาะสม

ฟิล์มโพลีเอทิลีน เทอเรพเทเลท (Polyethylene Terephthalate, PET)

พลาสติกชนิด PET นี้สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ ไชมัน น้ำมัน และกลิ่นได้ดีมาก เมื่อเทียบกับ PVC ทนทานต่อแรงต่างๆ แต่ป้องกันไอน้ำได้ไม่ดี มีความใสมาก ทนต่ออุณหภูมิสูงมากได้ นิยมนำมาทำเป็นฟิล์มหัดตัว ถุงสำหรับใส่อาหารแช่แข็ง ถุงที่ผ่านการฆ่าเชื้อแบบหม้อความดันได้ (ปทุมทริกา, 2548)

- **ถุงเคลือบอลูมิเนียม**

ถุงเคลือบอลูมิเนียม เป็นถุงชนิดลามิเนต การลามิเนตหรือการเคลือบพลาสติก คือ การนำพลาสติก 2 ชนิด มาทำให้อัดกัน ฟิล์มที่นิยมนำมาเคลือบติดกัน เช่น LLDPE, PET, OPP, CPP, ONYLON, ALUMINEAM เป็นต้น โดยการเลือกฟิล์มสำหรับเคลือบติดกันจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการห่อหุ้มอาหาร ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 วัตถุประสงค์ในการใช้ถุงฟิล์มลามิเนต และชนิดของวัสดุที่ใช้ผลิต

วัตถุประสงค์การใช้งาน	วัสดุของฟิล์มลามิเนต
- ถุงพลาสติกที่ต้มได้	โพลีเอสเตอร์ + โพลีเอทิลีน
- ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหารแบบสุญญากาศ	ไนลอน + โพลีเอทิลีน
- ถุงพลาสติกที่ใช้สำหรับบรรจุอาหารแห้ง	อลูมิเนียม + ไวนิลซิติเตด
- ถุงพลาสติกที่ใช้บรรจุอาหารเพื่อทำแห้ง โดยวิธีเยือกแข็งแบบสุญญากาศ	อลูมิเนียม + โพลีเอทิลีน
- ถุงพลาสติกชนิดต้มในน้ำเดือดได้ และทำเป็นสุญญากาศได้	โพลีเอสเตอร์ + โพลีเอทิลีน
- ถุงพลาสติกชนิดกันแสงสว่าง ความชื้น และก๊าซ สำหรับอาหารสำเร็จรูป ชุบแห้ง	อลูมิเนียม + โพลีเอสเตอร์ + โพลีเอทิลีน

ที่มา : ปทุมทริกา (2548)

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอลูมิเนียมและฟิล์มชนิดต่างๆ

คุณสมบัติ	อลูมิเนียม	โพลีเอทิลีน	โพลีเอทิลีน	ไนลอน
		PET	LLDPE	
การป้องกันก๊าซ	ดีมาก	ดี	ไม่ดี	ดี
การป้องกันไอน้ำ และความชื้น	ดีมาก	ดี	ดี	ไม่ดี
การทนน้ำมัน	ดีมาก	ดีมาก	ดี	ดีมาก
ความแข็งแรงของฟิล์ม	ไม่ดี	ดีมาก	ดี	ดีมาก
การป้องกันแรงกระแทก	ไม่ดี	พอใช้	ดีมาก	ดีมาก
การป้องกันแรงกดทะลุ	ไม่ดี	ดี	ไม่ดี	ดีมาก
การทนต่ออุณหภูมิสูง	ดีมาก	ดีมาก	ดี	ดีมาก
การทนต่ออุณหภูมิต่ำ	ดีมาก	ดี	ดี	ดีมาก
คุณสมบัติการพิมพ์	ไม่ดี	ดีมาก	พอใช้	ดีมาก
คุณสมบัติการปิดผนึกด้วยความร้อน	ไม่ดี	ไม่ดี	ดีมาก	ไม่ดี
อุณหภูมิในการละลาย (องศาเซลเซียส)	-	255	110-130	220

ที่มา : ปุณฺทริกา (2548)

2.2 การแปรรูปและคุณภาพของข้าวกล้อง

การให้ความร้อนโดยการหุงข้าวกล้องจะทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชัน มีการเปลี่ยนแปลงหลาย ๆ อย่างในเม็ดสตาร์ช (starch granule) เช่น สูญเสียสมบัติการเป็นผลึก เกิดการดูดน้ำ การพองตัวออก และชะส่วนประกอบบางอย่างออกไป (เช่น อะไมโลส) (Ellis and Ring, 1985) ผู้บริโภคส่วนใหญ่มักประสบปัญหาการหุงต้มข้าวกล้อง คือใช้เวลานานและปริมาณน้ำมาก เนื่องจากเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวกล้องมีใยอาหารที่ดูดซับน้ำได้ไม่ดีและป้องกันการส่งผ่านน้ำเข้าสู่เมล็ดภายในได้ การแช่น้ำเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนการหุงต้มจะช่วยให้ น้ำซึมผ่านเยื่อหุ้มเมล็ดเข้าไปได้ โดยสตาร์ชจะดูดน้ำไว้จนอิ่มตัวและเกิดเจลาติไนเซชัน ดังนั้นหากเม็ดสตาร์ชดูดซับน้ำไม่ดีหรือเวลาที่แช่ข้าวกล้องไม่นานพอ การเกิดเจลาติไนเซชันจะไม่สมบูรณ์ ทำให้ข้าวกล้องไม่สุก หรือข้าวแข็งได้ (สำนักงานปฏิบัติการแห่งชาติเพื่ออนาคตไทย, 2549)

คุณสมบัติของข้าวกล้องที่เป็นอุปสรรคในทางการตลาดและความนิยมของผู้บริโภคคือ สีคล้ำ อายุการเก็บรักษาสั้น (ประมาณ 1 เดือน) และเมื่อหุงสุกแล้วเนื้อสัมผัสไม่นุ่มเหมือนข้าวขาว การที่ข้าวกล้องมีอายุการเก็บรักษาสั้นเนื่องจากในชั้นของรำข้าวอุดมไปด้วยไขมันซึ่งเป็นขั้วสารตรึงของเอนไซม์ไลเปส นอกจากนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันทำให้เกิดกลิ่นหืน ซึ่งปฏิกิริยา

ดังกล่าวจะเกิดขึ้นในอัตราที่เร็วมากหากเป็นรำที่ถูกขัดสี คือภายใน 6 ชั่วโมงหลังการขัดสี (Hammond, 1994) เนื้อสัมผัสที่แข็งของข้าวกล้องเกิดจาก โครงสร้างเส้นใยในชั้นรำข้าวดูดซึมน้ำ ได้ช้าและน้อย รวมทั้งยึดหยุ่นต่ำ (Bello *et al.*, 2004) ความแข็งของข้าวกล้องในชั้นรำข้าวด้านในจะ สูงกว่าด้านนอก เนื่องจากรำข้าวชั้นในมีปริมาณเส้นใยอาหารสูงกว่า ขณะที่รำข้าวชั้นนอกมีปริมาณ โปรตีนมากกว่า (Lamberts *et al.*, 2007)

การพัฒนากระบวนการผลิตข้าวกล้องสดโดยนักวิจัยไทย ด้วย stabilization process ในการ ควบคุมปริมาณกรดไขมันอิสระไม่ให้สูงเกินร้อยละ 5 และผลการวิจัยนี้อยู่ในขั้นตอนของการขอรับ การคุ้มครองจดสิทธิบัตร (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2550a) นอกจากนั้นทีมนักวิจัย จากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารร่วมกับบริษัทเอกชน ได้คิดวิธีการผลิตข้าวกล้องที่ สามารถหุงได้โดยไม่ต้องผสมข้าวขาว และมีความนุ่ม หอมและรสชาติที่หวานกว่าข้าวธรรมดา เรียกว่า “ข้าวกล้องงอก กาบา” โดยนำข้าวเปลือกแช่น้ำเป็นเวลา 48-72 ชั่วโมง แล้วอบด้วยความ ร้อนเพื่อยับยั้งการเจริญของข้าวและลดความชื้นลงที่ร้อยละ 14 (กระทรวงวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี, 2550b) การปรับความนุ่มของข้าวกล้องด้วยการทำข้าวกล้องงอกนี้ อาศัยการทำงานของ เอนไซม์ ในการย่อยสลาย โปรตีน และ โพลีแซ็กคาไรด์ชนิดที่ไม่ใช่สตาร์ช เพื่อเพิ่มปริมาณ ของโอลิโกแซ็กคาไรด์และกรดแอมิโน ทำให้ได้สารสำคัญและปรับปรุงสมบัติทางประสาท สัมผัสได้อีกด้วย เนื่องจากข้าวจะนุ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้ต้องใช้เวลาเช่นกัน เพื่อให้ เมล็ดข้าวงอก แล้วตามด้วยการอบแห้ง จนกว่าความชื้นจะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 13-15 ที่ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เพื่อให้เหมาะสมต่อการขัดสี เกิดการสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ (Ohtsubo *et al.*, 2005) อัตราการผลิตข้าวกล้องงอกจึงยังอยู่ในระดับต่ำ

นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น ๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแปรรูปข้าวกล้องให้มีเสถียรภาพในระหว่างการ เก็บรักษา เช่น การทำลายเอนไซม์ไลเปสด้วยความร้อนชื้นหรือความร้อนแห้ง การกำจัดน้ำมันรำ ข้าวซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ไลเปสโดยการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ การใช้เอทานอลเพื่อทำให้เอนไซม์ไลเปสเสถียรภาพ และการใช้ออกซิเจนเอทานอลในการทำข้าว กล้องคงตัว (Champange *et al.*, 1952) วิธีที่นิยมปฏิบัติในการผลิตข้าวกล้องที่คงตัว ณ ปัจจุบันคือ การผลิตแบบ parboiled rice ซึ่งประกอบด้วยการแช่ข้าวเปลือก การนึ่ง และอบแห้ง การแช่น้ำใช้ เวลานาน เนื่องจากต้องให้ข้าวเปลือกดูดซับน้ำเข้าเต็มที่เพื่อให้เกิดการเจลาติไนซ์ของสตาร์ชได้ อย่างเพียงพอ (0.40-0.45 กิโลกรัม/กิโลกรัมฐานแห้ง) เนื่องจากเปลือกข้าวมีสมบัติเหมือนซิลิกา ซึ่ง เปียกน้ำช้ามาก (Bello *et al.*, 2004) ข้าวกล้องชนิด parboiled เก็บรักษาได้นานกว่าข้าวกล้อง ธรรมดาเนื่องจากเอนไซม์ถูกทำลายด้วยความร้อนระหว่างการนึ่ง (Heinemann *et al.*, 2005; da Silva *et al.*, 2006)

2.2.1) เทคโนโลยีการผลิตข้าวหุงสุกเร็ว

การหุงข้าวด้วยวิธีปกติใช้เวลาประมาณ 30 นาทีขึ้นไป เนื่องจากการหุงข้าวที่ต้องใช้เวลานานร่วมกับการเกิดปัญหาในการหุง เช่น บางครั้งสตาร์ชในข้าวถูกเจลาติไนซ์ไม่สมบูรณ์, เมล็ดสตาร์ชแตกทำให้เกิดลักษณะขุ่นหนืด เหนียว หรือคล้ายแป้งเปียก (Weibye, 1983) จึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกเร็วขึ้นมาโดยมีการเตรียมที่สะดวกและรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกเร็วสามารถลดระยะเวลาการเตรียมเพื่อบริโภค โดยทำให้เมล็ดข้าวเจลาติไนซ์แล้วนำไปผ่านกระบวนการให้เมล็ดเกิดโครงสร้างที่ดูนุ่มได้เร็ว และคงสภาพเมล็ดข้าวได้สมบูรณ์ ไม่แตกหักหรือลีบแบน ผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกเร็วที่ผ่านกระบวนการนี้สามารถลดระยะเวลาการเตรียมข้าวสุกจากประมาณ 30-60 นาที เหลือเพียง 3-4 นาที เมื่อใช้การเตรียมด้วยการหุงแบบไม่เช็ดน้ำและใช้ไมโครเวฟตามลำดับ (ปริศนาและวรรณรัตน์, 2546) ผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกเร็วจึงมีความเหมาะสมในการบริโภคและยังรักษาคุณค่าทางโภชนาการของข้าวอีกด้วย (Weibye, 1983) ตัวอย่างผลงานวิจัยที่ศึกษาวิธีการทำข้าวหุงสุกเร็วได้แก่ การศึกษาของ สุทธยา (2549) ได้นำข้าวกล้องหอมมะลิแดงมาผ่านกรรมวิธีให้หุงสุกเร็วขึ้นได้ (ข้าวหุงสุกเร็ว) ซึ่งสามารถนำมาผสมกับข้าวขัดสีในสัดส่วนที่สูงขึ้นได้ และใช้กรรมวิธีการหุงข้าวแบบทั่วไปในการหุงให้ข้าวทั้งสองชนิดสุกพร้อมกันได้ ซึ่งเป็นทางหนึ่งที่จะช่วยอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้บริโภคในการบริโภคข้าวกล้องผสมข้าวขัดสีในการผลิตข้าวหุงสุกไวสามารถทำได้หลายวิธี โดยเริ่มจากการเพิ่มความชื้นให้แก่เมล็ดข้าว อาจใช้การแช่น้ำหรือพ่นน้ำให้เมล็ดข้าวมีปริมาณความชื้นในระดับที่ต้องการ จากนั้นให้ความร้อนแก่เมล็ดข้าว เพื่อให้เมล็ดสตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์ ขั้นตอนสุดท้ายทำการระเหยน้ำออกเพื่อลดความชื้นในเมล็ดข้าว ทำให้เก็บรักษาได้ที่อุณหภูมิห้อง การผลิตข้าวหุงสุกไวนั้นอาจสูญเสียสมบัติการต้านอนุมูลอิสระและวิตามินในข้าวกล้องไปบางส่วน เนื่องจากสีของเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบในกลุ่มแอนโทไซยานินซึ่งมีสมบัติต้านอนุมูลอิสระและละลายน้ำได้ดี โดยจะมีการสูญเสียไปกับน้ำที่ใช้แช่ รวมถึงวิตามินที่ละลายได้ในน้ำด้วย นอกจากนี้ในขั้นตอนการให้ความร้อนก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการสูญเสียสมบัติดังกล่าวเช่นกัน ขณะที่ Weibye (1983) รายงานว่าการสเปรย์น้ำร้อนและไอน้ำร้อนให้กับข้าว ทำให้ข้าวเกิดการเจลาติไนซ์ได้เร็วและสมบูรณ์แต่เป็นวิธีที่ใช้พลังงานสูง

นอกจากนี้ยังมีวิธีการผลิตข้าวหุงสุกเร็วอีกหลายวิธี เช่น วิธี soak – boil – dry : แช่ข้าวที่อุณหภูมิห้องให้มีความชื้นร้อยละ 30 ต้มในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:5) จนมีความชื้นร้อยละ 50-60 จากนั้นต้มหรือึ่งต่อไปให้มีความชื้นร้อยละ 60-70 แล้วจึงนำข้าวมาล้างน้ำเย็นอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ทันที นำข้าวที่ได้ไปทำแห้งด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จนข้าวมีความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 7-10 วิธีนี้ข้าวใช้เวลาในการ

คั้นรูปประมาณ 3-4 นาที เกิดรอยแตกภายในเมล็ดข้าวจึงทำให้น้ำถูกดูดซับเร็วขึ้นในระหว่างการคั้นรูป (รัตนวดีและอรวรรณ, 2547; พรทิพย์และคณะ, 2550), วิธี dry heat treatment : ให้ความร้อนแห้งแก่ข้าวด้วยเตาอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที จากนั้นหุงข้าวในน้ำเดือด ล้างน้ำเย็น และทำแห้ง ด้วยสภาวะเช่นเดียวกับวิธี soak – boil – dry วิธีนี้เมล็ดข้าวจะเกิด dextrinization, รอยแตกจำนวนมากตลอดเมล็ดข้าว ทำให้น้ำแทรกซึมเข้าเมล็ดมากขึ้นและขยายตัว ใช้เวลาในการคั้นรูปประมาณ 2-4 นาที (รัตนวดีและอรวรรณ, 2547; พรทิพย์และคณะ, 2550) วิธี freeze-vacuum drying: นำข้าวมาหุงในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:5) ล้างน้ำเย็น นำข้าวหุงสุกมาแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง และละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิห้อง เวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปทำแห้งโดยการทำแห้งแบบสุญญากาศ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส วิธีนี้ใช้เวลาคั้นรูป 7 นาที การแช่เยือกแข็งข้าวสุกจะทำให้โครงสร้างของเมล็ดข้าวขยายขนาดขึ้น มีลักษณะรูพรุนคล้ายฟองน้ำ จึงเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าว ส่วนการทำแห้งแบบสุญญากาศ จะช่วยลดเวลาในการทำแห้ง (พรทิพย์และคณะ, 2550) วิธี centrifugal fluidized bed drying : ภายหลังคั้นข้าวจนสุก ทำการลดความชื้นโดยใช้ centrifugal fluidized bed dryer อุณหภูมิ 146 องศาเซลเซียส แรงลม 3000 rpm. นาน 5 นาที ข้าวที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากมีรูพรุนเกิดขึ้นในเมล็ดข้าวจำนวนมาก (รัตนวดีและอรวรรณ, 2547)

2.2.2) การใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร

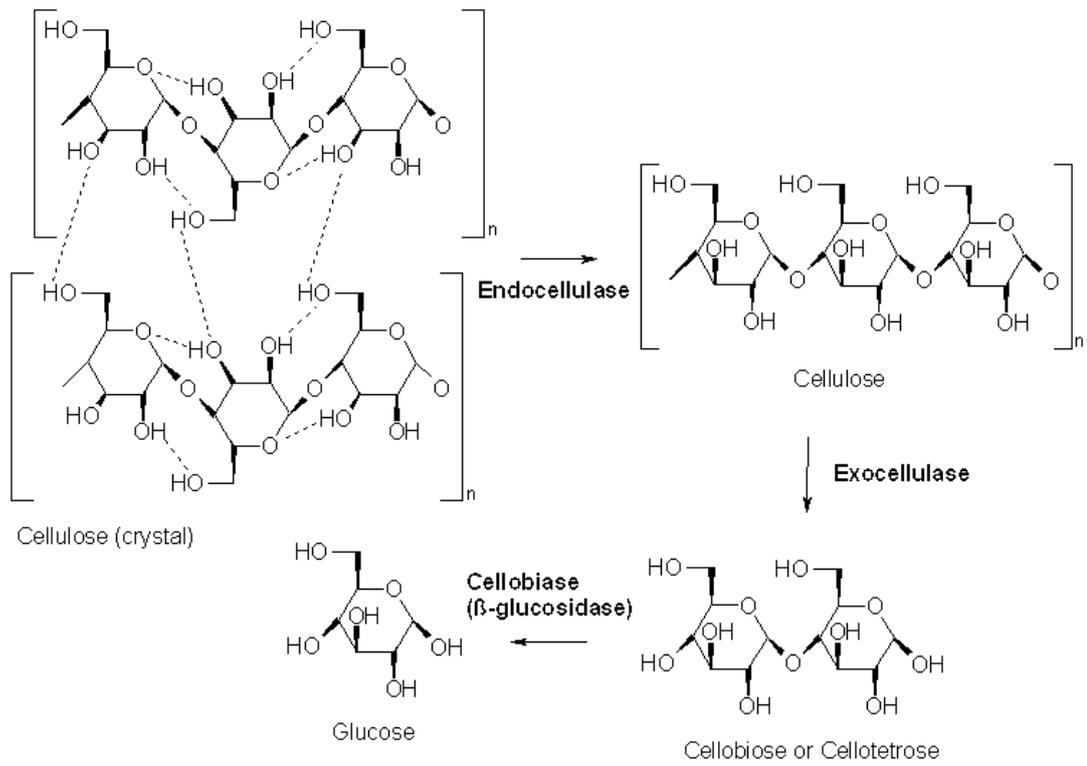
ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่ระหว่าง 300 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) ถึง 300 จิกะเฮิรตซ์ (GHz) ไมโครเวฟอยู่ในรูปของพลังงานและถูกเปลี่ยนเป็นความร้อน โดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุและ/หรือการ หมุนตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้ชนกับอนุภาคหรือโมเลกุลข้างเคียง ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่วัตถุได้รับคลื่น และดูดซับพลังงานดังกล่าว ทำให้เกิดความร้อน เนื่องจากการเกิดความร้อนในอาหารบริเวณที่สัมผัสกับไมโครเวฟ ความร้อนจะกระจายออกไปยังส่วนอื่น ๆ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม นับว่าเป็นข้อดีของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (ธีรพล, ม.ปป.)

นักวิจัยจากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้คิดค้นวิธีการผลิตข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคอุโมงค์ไมโครเวฟ และเมื่อนำข้าวกล้องไปหุงให้สุกในตู้อบไมโครเวฟเป็นเวลา 8 นาทีก็จะได้ข้าวกล้องที่มีเมล็ดเรียงกันสวยงามน่ารับประทาน (กรมส่งเสริมสหกรณ์, ม.ปป.) ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟทำให้สตาร์ชในข้าวกล้องถูกเจลาติไนซ์ จึงทำให้หุงสุกเร็ว นอกจากนี้ Lukkakula *et al.* (2004) ได้ศึกษาการสร้างเสถียรภาพในรำข้าวที่ขัดออกจากข้าวกล้องด้วยไมโครเวฟ พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น

น้อยมากจากสัปดาห์แรกถึงสัปดาห์ที่ 6 (ร้อยละ 2.8-3.89) ของการเก็บรักษาในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งต่ำกว่าปริมาณสูงสุด (ร้อยละ 10) ที่ยอมรับได้สำหรับการบริโภค

2.2.3) เซลลูโลสและเอนไซม์เซลลูเลส

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืชทุกชนิด เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีอยู่มากที่สุดในโลก เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสมาต่อเรียงกันด้วยพันธะ บีตา-1,4-ไกลโคไซด์ การที่จะนำเซลลูโลส การที่จะนำเซลลูโลสไปผลิตเป็นน้ำตาลกลูโคสหรือผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่มีคุณค่าเพิ่มขึ้นนั้นทำได้ยาก เพราะเซลลูโลสทนต่อการย่อยสลายถึงแม้จุลินทรีย์บางชนิดจะมีเอนไซม์ที่สามารถไฮโดรไลซ์เซลลูโลสได้ (นิธิยา, 2549) เซลลูเลส คือเอนไซม์ที่ถูกสร้างจากเชื้อรา แบคทีเรีย และโพรโตซัว โดยจะไปเร่งปฏิกิริยาการสลายเซลลูโลส (cellulysis) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เซลลูโลสที่ 1,4-β-D-glycosidic linkages ชื่ออื่น ๆ ของเซลลูเลสได้แก่ ‘endoglucanases’ ประกอบไปด้วยเอนไซม์ endo-1,4-β-glucanase, carboxymethyl cellulase, endo-1,4-β-D-glucanase, β-1,4-glucanase, β-1,4-endoglucan hydrolase และ celludextrinase นอกจากนี้ยังมีเซลลูเลสชนิดอื่น ๆ อีกโดยจะถูกเรียกเป็น ‘exocellulases’ (Chapin III *et al.*, 2002) การทำงานของเซลลูเลสในการสลายเซลลูโลส ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ endo-cellulase ทำลายพันธะภายในเซลลูโลสทำให้เกิดการแตกตัวของโครงสร้างผลึกและได้เป็นสายโพลีแซคคาไรด์ของเซลลูโลสที่แยกจากกัน จากนั้น exo-cellulase จะเข้าไปสลายด้านปลายของสายโพลีแซคคาไรด์ที่ได้จากการสลายของ endo-cellulase ประมาณ 2-4 หน่วย ได้เป็น เตตระแซคคาไรด์ หรือ ไดแซคคาไรด์ เช่น เซลโลไบโอส (cellobiose) (โดย exo-cellulase มีอยู่ 2 ชนิด ชนิดแรกจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับด้านปลายที่เป็นหมู่อริดิคัลของเซลลูโลส อีกชนิดจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับด้านปลายที่เป็นหมู่นอนรีดิคัลของเซลลูโลส) ขั้นตอนสุดท้าย เซลโลไบโอส (cellobiose) หรือ β-glucosidase เข้าไปสลายส่วนที่ได้จากการทำงานของ exo-cellulase ได้เป็น มอนอแซคคาไรด์ (Sulzenbacher *et al.*, 1997)



ภาพที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาสลายเซลลูโลสด้วยเซลล์ูลัส