บทที่ 2
วารสารปริทัศน์

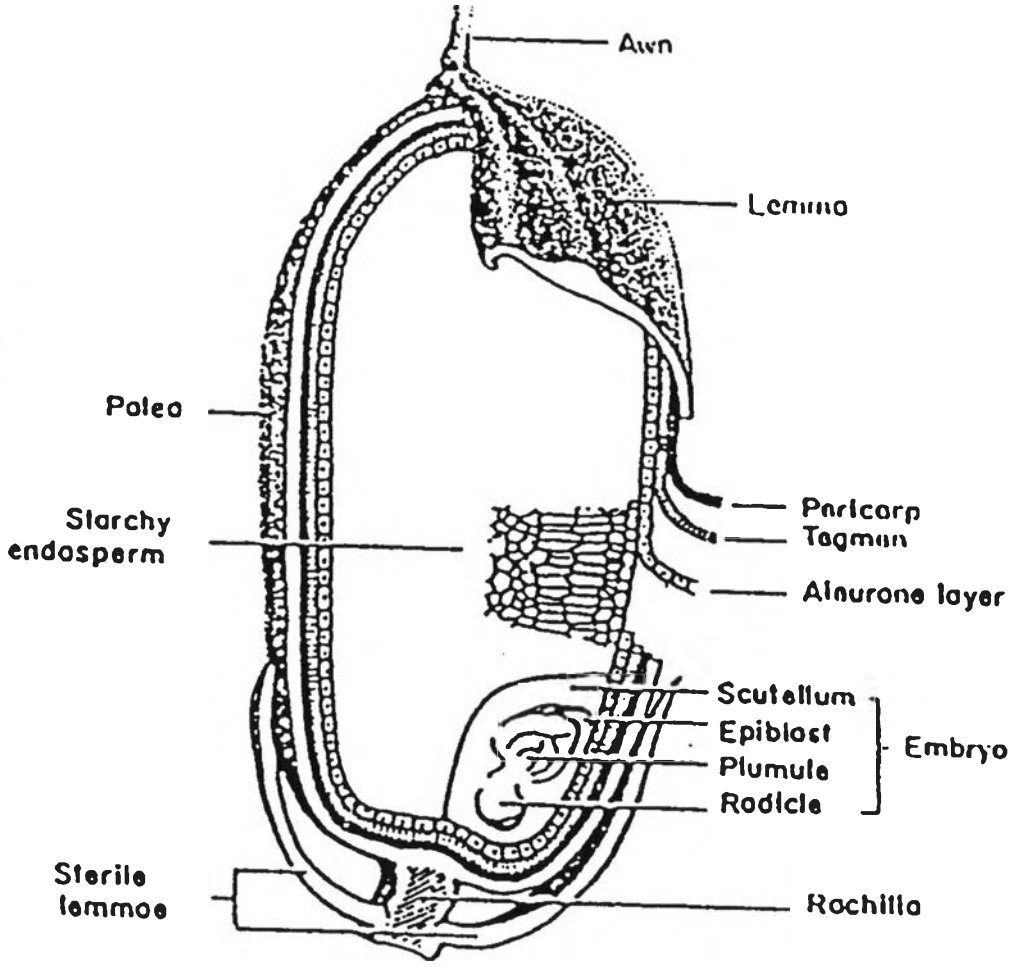
2.1. ลักษณะทั่วไปของข้าว

ข้าวเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลหญ้าที่จัดอยู่ในวงศ์ *Oryza* (Genus *Oryza*) สามารถเจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อนและอบอุ่น ข้าวที่ปลูกเพื่อใช้เป็นอาหารมี 2 พันธุ์คือพันธุ์ *Oryza sativa* L. ซึ่งมีถิ่นกำเนิดแถบทวีปเอเชียและพันธุ์ *Oryza glaberrima* Steud. ซึ่งมีถิ่นกำเนิดในแถบทวีปอัฟริกา (Marshall and Wadworth, 1994) ข้าวที่ผลิตและขายในปัจจุบันเป็นข้าวพันธุ์ *O. sativa* L. เกือบทั้งหมด ซึ่งแบ่งเป็นข้าว indica japonica และ javanica ข้าว indica มีเมล็ดเรียวยาวให้ผลผลิตค่อนข้างต่ำ แต่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ง่าย ปลูกในประเทศเขตร้อน เช่น อินเดีย จีนตอนใต้และบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นต้น ข้าว japonica หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Bulu มีเมล็ดป้อมสั้น ให้ผลผลิตสูง พบปลูกในเขตอบอุ่น เช่น ญี่ปุ่น เกาหลีและจีนตอนเหนือ เป็นต้น และข้าว javanica มีลักษณะอยู่ระหว่างข้าว indica และ japonica แต่ไม่นิยมปลูกเนื่องจากให้ผลผลิตต่ำ (Matz, 1959; Juliano et al., 1990)

ข้าวชัยนาท 1 เป็นข้าวที่ปลูกได้ตลอดปี นิยมปลูกมากทางภาคเหนือตอนล่าง ภาคกลางและภาคใต้ของประเทศไทย ให้ผลผลิตต่อไร่สูงคือประมาณ 740 ก.ก.ต่อไร่ มีความต้านทานต่อเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยกระโดดหลังขาว และโรคใบหงิก เป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง หุงขึ้นหม้อ เมื่อหุงสุกจะได้ข้าวเนื้อแน่นและร่วน

2.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

โครงสร้างของเมล็ดข้าวแบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา : Juliano, 1985

ได้แก่

ก. <u>เปลือกแข็งหุ้มเมล็ดหรือแกลบ</u> (hull) เป็นส่วนของกลีบดอก (palea และ lemma) ซึ่งห่อหุ้มเมล็ดเอาไว้ภายใน ส่วนนี้มีน้ำหนักประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักเมล็ดข้าว มีเซลลูโลส (cellulose) สูงถึงร้อยละ 25 ลิกนิน (lignin) ร้อยละ 30 และ เพนโทแซน (pentosans) ร้อยละ 15 และเถ้าร้อยละ 21 ซึ่งในส่วนของเถ้านี้จะเป็นซิลิกา (silica) ถึงร้อยละ 95 และเนื่องจากแกลบมีปริมาณลิกนินและซิลิกาสูง จึงทำให้มีสารอาหารต่ำ ทั้งยังมีมูลค่าต่ำในทางการค้า (Hoseney, 1994)

ข. เปลือกหุ้มผล (pericarp) เป็นเซลล์รูปแท่งห่อหุ้มอยู่รอบเมล็ดตามความยาวของเมล็ด มีอยู่ด้วยกัน 6 ชั้น มีผนังเซลล์บางอยู่ชั้นนอกสุด ผนังเซลล์ของเปลือกหุ้มผลมีความหนา 2 ไมโครเมตร มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ให้โครงสร้าง เช่น เซลลูโลส ฮีมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีโปรตีน ไขมัน รวมทั้งแร่ธาตุต่าง ๆ มีรายงานว่าเปลือกหุ้มผลมีประมาณร้อยละ 5 ของเมล็ด ประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 6 เถ้าร้อยละ 2 เซลลูโลสร้อยละ 20 ไขมันร้อยละ 0.5 และอีกร้อยละ 71.5 เป็น nonstarch polysaccharides (Hoseney, 1994)

ค. เมล็ด

ภายในเมล็ดประกอบด้วย

ค.1 เปลือกหุ้มเมล็ด (tegmen หรือ seedcoat) เป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์บาง รูปร่างยาวรี อาจมีแถวเดียว สองแถวหรือมากกว่านั้น เซลล์ชั้นในมีสารให้สีอยู่ด้วย ทำให้เนื้อเมล็ดมีสีต่าง ๆ นอกจากนี้ยังเป็นชั้นที่อุดมไปด้วยไขมัน จึงมีสมบัติในการป้องกันน้ำไม่ให้เข้าสู่เนื้อเมล็ด ชั้นนี้มีความหนาประมาณ 5 ถึง 8 ไมโครเมตร (Hoseney, 1994)

ค.2 ชั้นเยื่อโปร่งใส (hyaline layer หรือ nucellus) อยู่ติดกับชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด มีลักษณะโปร่งใสและยังประกอบด้วยสารให้สี เช่นเดียวกับในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด

ค.3 ชั้นแอลิวโรนหรือเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ด (aleurone layer) มีลักษณะเป็นเซลล์รูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง ผนังเซลล์หนา ประกอบด้วยโปรตีน เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส โดยในข้าวประกอบด้วยเซลล์ในชั้นนี้ 1 ถึง 7 ชั้น ชั้นแอลิวโรนเป็นชั้นที่สำคัญเพราะอุดมด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิด ภายในเซลล์แอลิวโรนจะมีเม็ดแอลิวโรน (aleurone grain) ขนาดเล็กอยู่มากมาย ซึ่งภายในเม็ดประกอบด้วยกรดไฟติก (สารประกอบฟอสฟอรัส) มีเกลือโพแทสเซียมและแมกนีเซียมรวมทั้งอุดมไปด้วยโปรตีนซึ่งสะสมอยู่และจะห่อหุ้มเมล็ดแอลิวโรนเอาไว้ นอกจากนี้ยังอุดมไปด้วยวิตามินต่าง ๆ เช่น วิตามินบี 1 (thiamin) บี 2 (riboflavin) และบี 3 (niacin) ซึ่งพบมากในชั้นนี้มากกว่าในส่วนอื่น

ค.4 คัพภะ (germ หรือ embryo) เป็นส่วนที่จะเจริญเป็นต้นอ่อนของเมล็ดหรือจุดกำเนิดของต้นซึ่งอยู่ด้านในฐานใกล้กับรอยต่อของเมล็ดและมีชั้นแอลิวโรนล้อมรอบอยู่ ภายในคัพภะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ ส่วนสกูเทลลัม (scutellum) เป็นเกราะป้องกันอยู่ระหว่างเนื้อเมล็ดกับคัพภะ และส่วนของคัพภะ (embryonic axis) ซึ่งพร้อมจะเจริญเป็นยอดอ่อน ต้นและรากต่อไป ในส่วนนี้จะอุดมไปด้วยสารอาหาร แร่ธาตุและวิตามินเพื่อการเจริญเติบโต สารอาหารที่มีมากคือโปรตีน และไขมัน ส่วนวิตามินที่มีมาก คือ วิตามินบีและวิตามินอี (tocopherol)

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.5 <u>เนื้อเมล็ด</u> (endosperm) แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ติดกับชั้นแอลิวโรน (subaleurone layer) เป็นเซลล์ที่มีผนังบาง มีขนาดเล็กรูปลูกบาศก์ ส่วนที่อยู่ถัดไปเป็นเซลล์เนื้อเมล็ด (inner endosperm) ประกอบด้วยเซลล์รูปร่างยาวเป็นแนวรัศมีเข้าสู่จุดกลางเมล็ด เซลล์เหล่านี้จะมีผนังเซลล์บาง ส่วนของผนังเซลล์ซึ่งถือเป็นกำแพงห่อหุ้มเซลล์เนื้อเมล็ดนี้จะประกอบด้วยเซลลูโลส เพนโทแซน และเบต้า-กลูแคน (ß-glucan) แทบจะไม่มีเซลลูโลสอยู่เลย ส่วนภายในเซลล์เนื้อเมล็ดจะอยู่รวมกันภายในเม็ดสตาร์ช (starch granule) ซึ่งเม็ดสตาร์ชที่เกิดในผนังเซลล์ของเนื้อเมล็ดจะรวมกันภายในเม็ดสตาร์ช (starch granule) ซึ่งเม็ดสตาร์ชของข้าวมีขนาดเล็กมาก (ประมาณ 3-5 ไมครอน) และเป็นรูปหลายเหลี่ยม ลักษณะเม็ดส่วนใหญ่จะรวมกันอยู่เป็นกลุ่ม (compound granule) พบมากถึง 150 เม็ดต่อกลุ่ม และพบเป็นเม็ดเดี่ยวเช่นกัน โปรตีนที่พบในเนื้อเมล็ดจะอยู่รวมกับเม็ดสตาร์ชโดยเกาะรวมกันเป็นรูปร่างกลม ซึ่งพบอยู่ในชั้นติดกับชั้นแอลิวโรนเป็นส่วนใหญ่

เนื้อเมล็ดเป็นส่วนที่ได้จากการสีข้าว (milling fraction) โดยการสีข้าวจะนำเมล็ดข้าวมากะเทาะเปลือกแข็งที่หุ้มเมล็ดออกได้เป็นข้าวกล้อง และนำข้าวกล้องมาขัดสีเอาส่วนต่างๆ ที่ไม่ใช่เนื้อเมล็ดออกเพื่อให้ได้เป็นข้าวสาร ผลพลอยได้จากกระบวนการนี้คือ แกลบ และรำข้าว (bran and polish) และองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวสารและส่วนต่าง ๆ ของข้าว ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวสาร เปลือกข้าว รำข้าว ส่วนคัพภะ และจมูกข้าว (ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)

ส่วนประกอบ	ข้าวเปลือก	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร	เปลือกข้าว	รำข้าว	คัพภะ	จมูกข้าว
โปรตีน (N*5.95)	6.7-8.3	8.3-9.6	7.3-8.3	2.3-3.2	13.2-17.3	17.7-23.9	13.0-14.0
ไขมัน	2.1-2.7	2.1-3.3	0.4-0.6	0.4-0.7	17.0-22.9	19.3-23.8	11.7-14.4
เส้นใย	8.4-8.6	0.7-1.2	0.3-0.6	40.1-53.4	9.5-13.2	2.8-4.1	2.7-3.7
เถ้า	3.4-6.0	1.2-1.8	0.4-0.9	15.3-24.4	9.2-11.5	6.8-10.1	6.1-8.5
แป้ง	62.1	77.2	90.2	1.8	16.1	2.4	48-55.4
เส้นใยอาหาร	19.1	4.5	2.7	77.3	27.6-33.3	0	0

ที่มา : Pomeranz และ Ory (1982)

2.3 การจำแนกลักษณะของข้าว

ข้าวที่คนไทยบริโภคนั้นจำแนกได้ 2 ชนิด คือ ข้าวเจ้า (non-glutinous rice) และข้าวเหนียว (waxy rice) โดยลักษณะของข้าวเจ้าจะมีเนื้อเมล็ด (endosperm) ค่อนข้างใส ในขณะที่ข้าวเหนียวมีเนื้อเมล็ดขุ่นกว่า เมื่อนำข้าวเหนียวไปหุงให้สุกจะมียางเหนียวและเมล็ดเกาะติดกันดี (จำรัส โปร่ง-ศิริวัฒนา, 2534)

ขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าวเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความชอบของผู้บริโภคโดยมีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก ขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าวขึ้นกับมาตรฐานของแต่ละประเทศ (Simpson et al., 1965) ซึ่งในแต่ละประเทศนิยมบริโภคข้าวที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน เช่นชาวเกาหลีและญี่ปุ่นนิยมบริโภคข้าวเมล็ดป้อม แต่คนไทยนิยมบริโภคข้าวเมล็ดเรียวยาว (งามชื่น คงเสรี, 2542) แต่เนื่องจากในแต่ละประเทศมีมาตรฐานในการกำหนดขนาดและรูปร่างของเมล็ดไม่เหมือนกัน ดังนั้นสถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ (International Rice Research Institute, IRRI) จึงได้กำหนดขนาดรูปร่างและความยาวของเมล็ดข้าวเพื่อให้มีมาตรฐานที่ใช้ได้เป็นสากลโดยใช้มาตรฐานของ USDA (United State Department of Agriculture) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานของขนาดเมล็ดข้าวสาร

ขนาดของเมล็ดข้าวสาร	ขนาด (ม.ม.)
Extra long grain	ยาวกว่า 7.50
Long grain	6.61 – 7.50
Medium	5.51 - 6.50
Short	สั้นกว่า 5.50

ที่มา : Juliano (1979)

ตารางที่ 2.3 รูปร่างและอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเมล็ดข้าวสาร

รูปร่าง	อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (L/W)
เรียว (slender)	มากกว่า 3.0
ปานกลาง (medium)	2.1 – 3.0
ป้อม (bold)	1.1 – 2.0
กลม (round)	ต่ำกว่า 1.0

ที่มา : Juliano (1979)

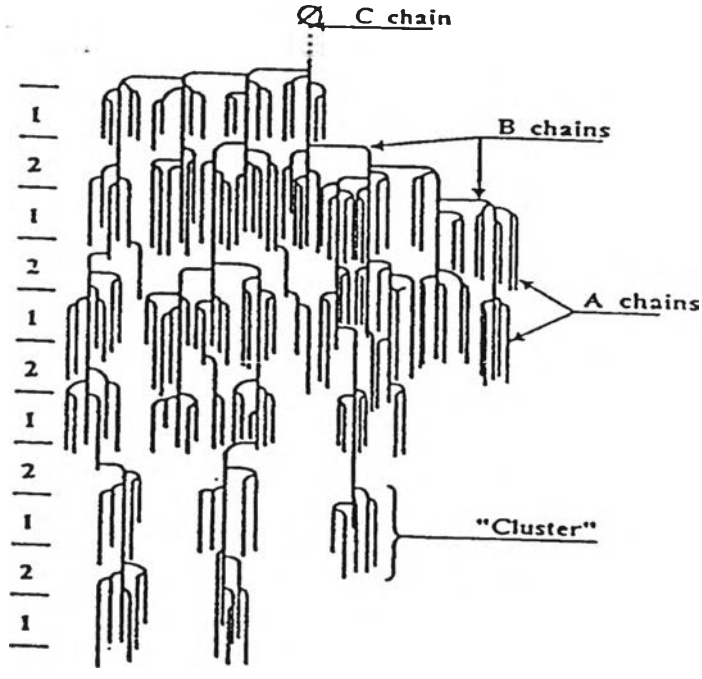
ตามมาตรฐานข้าวของไทย แม้ไม่ได้ระบุรูปร่างของเมล็ดข้าว แต่ผู้ค้าข้าวมักพิจารณารูปร่างของเมล็ดข้าวควบคู่ไปกับความยาวของเมล็ดข้าว ซึ่งข้าวที่มีเมล็ดเรียวยาวจะเป็นข้าวที่นิยมบริโภคสำหรับผู้บริโภคคนไทย

นอกจากนี้ การแบ่งลักษณะของข้าวนิยมใช้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเมล็ดข้าวเพื่อเปรียบเทียบและคัดเลือกข้าวให้มีคุณภาพการหุงต้มและการนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค โดยสมบัติที่พิจารณา เช่น ปริมาณอะไมโลส อุณหภูมิการเกิดเจลาติ-ไนเซชั่น (gelatinization temperature) และการเปลี่ยนแปลงลักษณะของแป้งระหว่างการหุงต้ม (pasting properties) (งามชื่น คงเสรี และคณะ, 2516; เครือวัลย์และงามชื่น, 2517; ตติย สีหร่าย, 2538; Hirohata and Chen, 1959; Juliano et al., 1964a; 1964b, Palmino et al., 1968; Hettiarachchy, 1997) ซึ่งสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญสำหรับการส่งข้าวไปจำหน่ายยังตลาดโลกเพื่อให้ตรงตามความต้องการของประเทศผู้ซื้อ

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวสาร

องค์ประกอบที่สำคัญที่พบในเมล็ดข้าวคือสตาร์ช (starch) และส่วนประกอบที่ไม่ใช่สตาร์ช (non-starch constituents) ซึ่งได้แก่ โปรตีน ไขมัน เส้นใย วิตามิน และแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ

2.4.1 <u>คาร์โบไฮเดรต</u> เป็นองค์ประกอบที่พบมากที่สุดในเมล็ดข้าว มีประมาณร้อยละ 70-80 โดยน้ำหนักแห้ง แบ่งเป็นเส้นใยซึ่งพบมากในแกลบและสตาร์ชซึ่งปรากฏในรูปของ starch granule โดยเม็ดแป้งข้าวมีขนาดประมาณ 3-5 ไมครอน มีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยม เนื่องจากขณะที่เม็ดแป้งกำลังก่อรูปร่างจะมีแรงดึงดูดกันระหว่างโปรตีนและแป้ง ทำให้เม็ดแป้งซึ่งมีผิวที่อ่อนนุ่มแต่เหนียวเข้ามาใกล้กันมากขึ้นและอัดตัวกันจนเกิดเป็นรูปหลายเหลี่ยม (Sandhya Rani and Bhattacharya, 1985) ส่วนใหญ่เม็ดแป้งข้าวจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (compound granule) มากถึง 150 เม็ดต่อกลุ่ม แต่ก็จะพบในลักษณะเม็ดเดี่ยวๆ ได้เช่นกัน โปรตีนที่พบอยู่รวมกับเม็ดแป้งจะเกาะรวมกันเป็นรูปร่างกลม ซึ่งพบอยู่ในชั้นติดกับแอลิวโรนเป็นส่วนใหญ่ ภายในเมล็ดข้าวสารมีแป้งที่ประกอบด้วยโพลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) โดยโพลิเมอร์ทั้งสองส่วนนี้จะเกาะเกี่ยวกันและจัดเรียงตัวในลักษณะโครงสร้างผลึก (semi-crystalline structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึก (1) และส่วนอสัณฐาน (2)
ที่มา: Robin และคณะ (1974)

อะไมโลส (amylose)

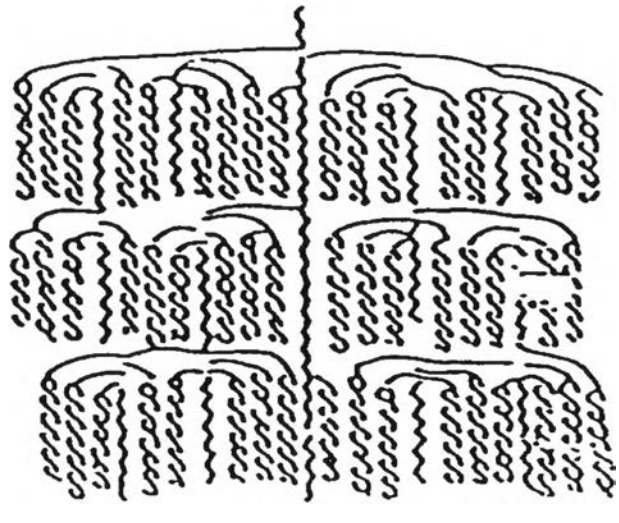
เป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นประกอบด้วยกลูโคสโมเลกุลประมาณ 200 – 2,000 หน่วย เชื่อมต่อด้วยพันธะ α-1,4 glucosidic linkage และมีบางส่วนของสายอะไมโลสที่เป็นกิ่งซึ่งตรงส่วนนี้จะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,6 glucosidic linkage ทำให้อะไมโลสมีกิ่งก้านด้วย แต่มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อะไมโลสมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่าอะไมโลเพคตินและทำปฏิกิริยากับไอโอดีนให้สีน้ำเงิน เม็ดแป้งที่มีอะไมโลสสูงจะมีความแข็งแรงและพองตัวได้ยาก ขณะที่เม็ดแป้งที่มีอะไมโลสต่ำจะมีพองตัวได้ง่าย (Sandhya Rani and Bhattacharya, 1985) เมื่อให้ความร้อนจนสุกแล้วทิ้งให้เย็นจะเกิดการคืนตัวของแป้งสุกจับตัวกันเป็นเจล ข้าวสุกที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวของแป้งสูงกว่าข้าวสุกที่ปริมาณอะไมโลสต่ำ เนื่องจากข้าวสุกที่มีปริมาณอะไมโลสสูงเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะไมโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนได้ดี ดังนั้นเมื่อหุงสุกและทิ้งไว้ให้เย็นจะได้ข้าวสุกที่มีลักษณะร่วนแข็ง ส่วนข้าวที่มีอะไมโลสต่ำเมื่อหุงสุกจะได้ข้าวสุกที่นุ่มและค่อนข้างเหนียวติดกัน (Juliano, 1972)

ดังนั้นสามารถใช้ปริมาณอะไมโลสเป็นเกณฑ์ในการจำแนกข้าวได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. ข้าวเหนียว มีอะไมโลสต่ำประมาณ 0-2%
2. ข้าวอะไมโลสต่ำ มีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า 19%
3. ข้าวอะไมโลสปานกลาง มีปริมาณอะไมโลส 20-24 %
4. ข้าวอะไมโลสสูง มีปริมาณอะไมโลส 25-33%

<u>อะไมโลเพคติน</u> (amylopectin)

เป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีกิ่งก้านสาขา ประกอบด้วยกลูโคสมากกว่า 10,000 หน่วย ส่วนที่เป็นกิ่งสาขาจะประกอบด้วยกลูโคส 10-60 หน่วย โมเลกุลมีขนาดใหญ่ บริเวณที่เป็นเส้นตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,4 glucosidic linkage โดยเฉลี่ยมีประมาณร้อยละ 96 Hizukuri (1986) รายงานว่าในส่วนที่เป็นสายตรงของอะไมโลเพคตินซึ่งอยู่บริเวณส่วนผลึก (crystalline region) ยังเกิดการจับคู่กันเป็นเกลียวคู่ (double helix) เกลียวคู่ของอะไมโลเพคตินเกิดจากพันธะไฮโดรเจนและแรงวันเดอร์วาล ทำให้บริเวณที่เป็นเกลียวคู่มีความแข็งแรงมาก ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาด้วยกรดและเอนไซม์ และบริเวณรอยต่อที่มีการแตกกิ่งก้านสาขาเชื่อมต่อด้วยพันธะ α -1,6 glucosidic linkage โดยเฉลี่ยมีประมาณร้อยละ 4 เรียกส่วนนี้ว่าส่วนอสัณฐาน (amorphous) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าอะไมโลสถึง 10,000 เท่า อะไมโลเพคตินละลายน้ำได้ดี เมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนจะให้สีแดงม่วง และอะไมโลเพคตินมีส่วนทำให้เกิดการคืนตัวของแป้งน้อยกว่าอะไมโลส



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างเกลียวคู่ของอะไมโลเพคติน

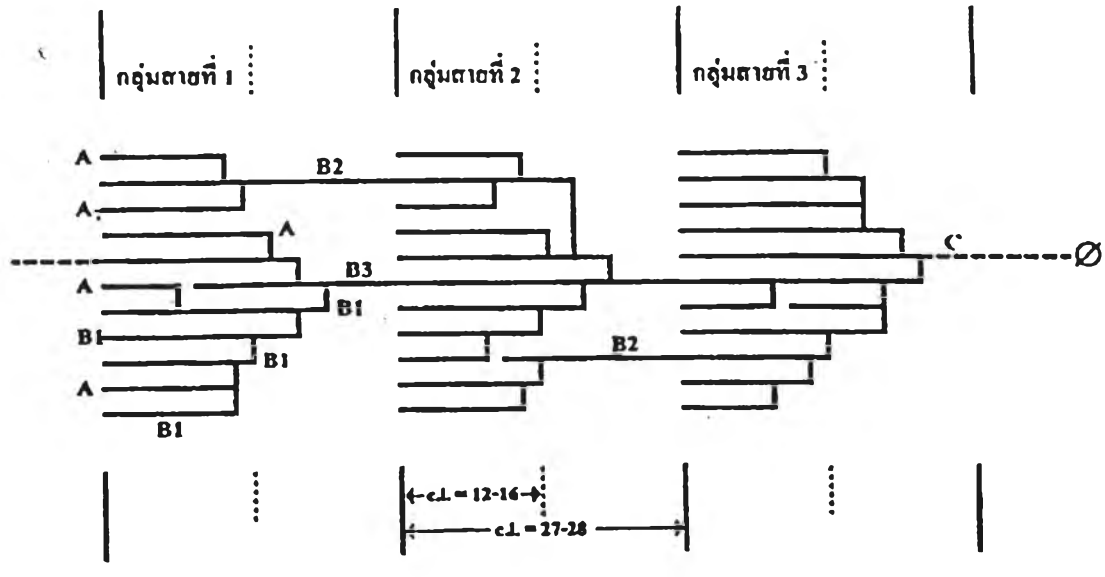
ที่มา: Hizukuri (1986)

โครงสร้างของอะไมโลเพคตินประกอบด้วยสาย 3 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 2.4 คือ

ก. สาย C (C-chain) เป็นสายกลูโคสแกนหลักที่มีความยาวมากที่สุดประกอบด้วยหมู่รีดิวซิ่ง 1 หมู่ และมีเพียง 1 สายในอะไมโลเพคตินแต่ละโมเลกุล

ข. สาย B (B-chain) เป็นสายกลูโคสสายกิ่งที่มาเชื่อมต่อจากสาย C หรือ สาย B ด้วยกันอีกทีหนึ่ง ตรงสาย B นี้จะถูกเชื่อมต่อกับสายกลูโคสอื่นอีก 2 สายหรือมากกว่านั้น

ค. สาย A (A-chain) เป็นกลูโคสสายสั้นที่ไม่มีกิ่งเชื่อมออกจากสายนี้



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C
ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ (2543)

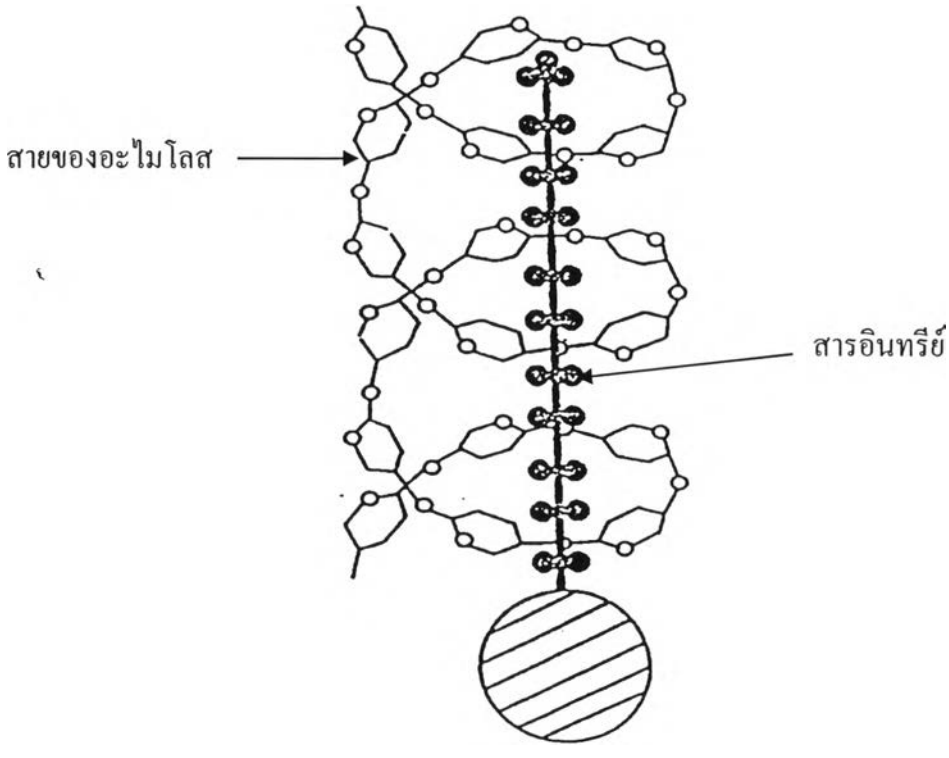
2.4.2 <u>โปรตีน</u> เป็นองค์ประกอบที่พบในข้าวมากเป็นอันดับ 2 รองจากคาร์โบไฮเดรต มีประมาณร้อยละ 6.5 – 12 โดยน้ำหนักแห้ง โปรตีนในเมล็ดข้าวจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มแทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ช (Juliano, 1972) พบมากในรำข้าวและบริเวณขอบของเม็ดสตาร์ชหรือฝังอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช โปรตีนที่พบในข้าวได้แก่โปรตีน glutelin ซึ่งเป็นโปรตีนที่พบมากที่สุดมีอยู่ประมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก สามารถละลายได้ในสารละลายด่าง (alkali soluble) โปรตีน albumin เป็นโปรตีนที่ละลายได้ในน้ำ มีประมาณร้อยละ 9-11 โดยน้ำหนัก ส่วนโปรตีน globulin ซึ่งเป็นโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายเกลือ (salt soluble) มีอยู่ประมาณร้อยละ 7-15 โดยน้ำหนัก และโปรตีน prolamin เป็นโปรตีนที่ละลายได้ในแอลกอฮอล์ (alcohol soluble) และมีอยู่ประมาณร้อยละ 2-4 โดยน้ำหนัก (Cagampang et al., 1966; Mitsuda et al., 1967; Del Rosario et al., 1968;

Juliano and Boulter, 1976) และจากผลการศึกษาของ Hamaker (1994) ที่รายงานว่าโปรตีนที่อยู่ในสตาร์ชก่อให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะเม็ดสตาร์ช กล่าวคือทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเม็ดสตาร์ช ซึ่งมีผลต่อการกระจายของเม็ดสตาร์ช ส่งผลต่อความหนืดของสตาร์ช ทำให้สตาร์ชมีการดูดซับน้ำ การพองตัวและระดับการเกิดเจลาติไนเซชั่นลดลง เนื่องจากโปรตีนสามารถเกาะเกี่ยวกับสตาร์ชได้อย่างแน่นหนาและส่งผลต่อค่า pasting property ของสตาร์ช ดังนั้นในทางอุตสาหกรรมจึงพยายามสกัดโปรตีนออกจากแป้ง โดยวิธีที่นิยมมากคือการสกัดโปรตีนโดยใช้ด่าง (alkali extraction) เพื่อสกัดโปรตีนกลูเตลิน ซึ่งเป็นโปรตีนที่ละลายในด่างและมีปริมาณมากถึงร้อยละ 80 ของน้ำหนักโปรตีนทั้งหมด (Heim and Burks, 1996) นอกจากนี้ในปัจจุบันได้นำเอนไซม์โปรติเอส (protease) มาใช้ในการย่อยโปรตีน เช่น ในงานวิจัยของ Arai และคณะ (1993) ซึ่งสกัดโปรตีนออกจากข้าวโดยใช้เอนไซม์ actinase ซึ่งพบว่าสามารถปรับปรุงการเกิดเจลาติไนเซชั่น โดยทำให้ค่า peak viscosity, breakdown viscosity, apparent viscosity, yield stress และ consistency index สูงขึ้น

2.4.3 <u>ไขมัน</u> (lipid) เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่เพียงเล็กน้อยมีประมาณร้อยละ 0.3-0.6 โดยน้ำหนักแห้ง (Juliano, 1972) พบมากบริเวณรำข้าวและจมูกข้าว (germ) ไขมันภายในเมล็ดข้าวจะมีลักษณะเป็นหยด และพบอยู่ใน 2 ลักษณะ คือ อยู่ร่วมกับโปรตีนโดยแทรกอยู่ในชั้นแอลิวโรน หรืออยู่บริเวณผิวเม็ดสตาร์ชหรือขอบเม็ดสตาร์ช ซึ่งเรียกไขมันพวกนี้ว่า “non-starch lipid surface” หรือ “lipid” นอกจากนี้ยังพบไขมันอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชโดยจะเกิดพันธะอยู่กับโมเลกุลของอะไมโลสและพบไขมันอยู่อย่างอิสระภายในโมเลกุลสตาร์ชซึ่งไขมันพวกนี้ถูกเรียกว่า “starch lipid” หรือ “internal lipid” (Morrison, 1981) การสกัดไขมันออกจากข้าวนั้นมีวิธีการสกัด 2 แบบคือ สกัดไขมันที่เป็น nonstarch lipid หรือ surface lipid โดยใช้ตัวทำละลายไม่มีขั้ว (nonpolar solvents) เช่น ไดเอทิลอีเทอร์ (diethyl ether) และปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) เป็นต้น ส่วนไขมันที่เป็นพวก starch lipid สกัดได้โดยใช้สารละลายของน้ำกับบิวทานอลที่อิ่มตัว (water-saturated butanol) (Juliano, 1985) ชนิดของกรดไขมันที่เป็น non-starch lipid คือ ไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระซึ่งเป็นกรดไขมันที่เป็นกลาง (neutral lipid) กรดไขมันที่พบในเม็ดสตาร์ช (starch lipid) จะมีฟอสโฟไลปิดในปริมาณสูงและกรดไขมันที่พบเป็นองค์ประกอบหลักคือ ลิโนเลอิก (linoleic acid) พัลมิติก (palmitic acid) และโอเลอิก (oleic acid) (Maningat and Juliano, 1980; Choudhury and Juliano, 1980; Morrison et al., 1984; Juliano, 1985; Champagne, 1996; Jane et al., 1996)

ไขมันในสตาร์ชเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณอะไมโลสและสตาร์ช ซึ่งไขมันสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่มีสายยาวได้ (Choudhury and Juliano, 1980; Morrison et al., 1984; Blanshard, 1987; South et al., 1991) สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสและไขมันที่เกิดขึ้นนี้มีความแข็งแรงและทนทานต่อการย่อยด้วยกรดและเอนไซม์น้ำแป้งสุกที่ได้จากสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวมีลักษณะทึบแสงหรือขุ่น (Senivegaten and Biliaderis,

1991; Morrison et al., 1993) Hoseney (1994) สันนิษฐานว่าลักษณะของไขมันที่เกิดพันธะกับอะไมโลสหรืออะไมโลเพคตินสายยาวน่าจะเป็นเช่นเดียวกับแบบจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



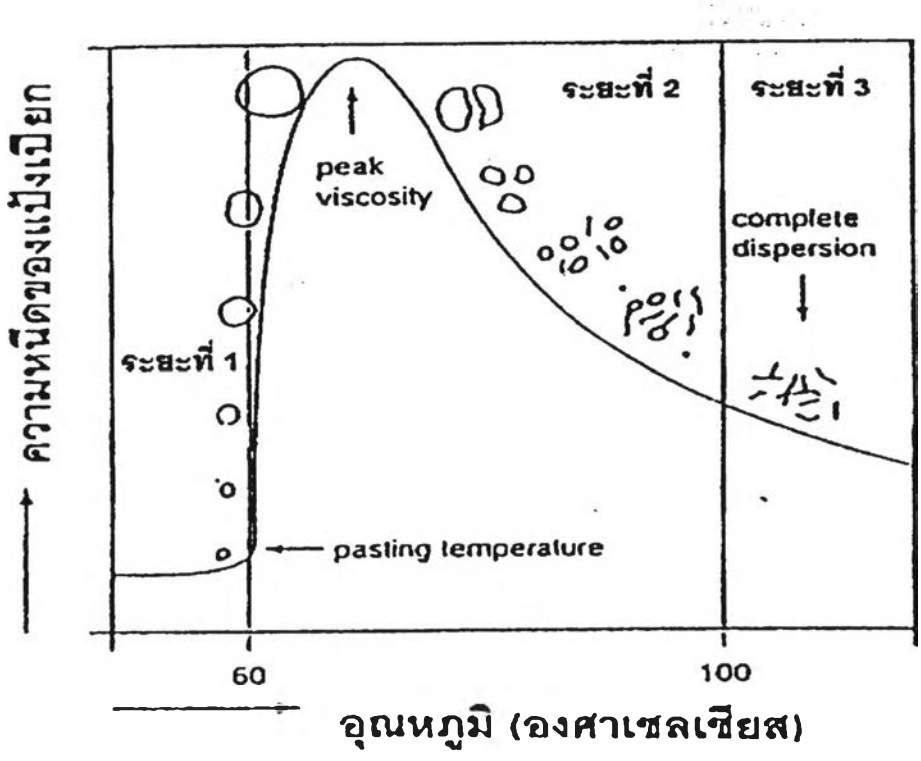
รูปที่ 2.5 แบบจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์
ที่มา: Hoseney (1994)

2.4.4 วิตามิน (vitamins) ที่พบโดยทั่วไปจะพบในข้าวกล้องมากกว่าในข้าวสาร วิตามินส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนคัพภะและเนื้อเยื่อแอลิวโรน

2.4.5 แร่ธาตุ (minerals) ที่พบในเมล็ดข้าวนั้นจะขึ้นกับแร่ธาตุในดินที่ต้นข้าวได้รับเพื่อการเจริญเติบโต โดยแร่ธาตุที่พบในข้าวสารจะมีปริมาณน้อยกว่าในข้าวกล้อง แร่ธาตุที่พบมากได้แก่ ฟอสฟอรัส โปตัสเซียม แมกนีเซียมและซิลิกอน (Juliano, 1985)

2.5 การเกิดเจาติไนเซชั่น (gelatinization)

การเกิดเจลาติไนเซชั่นอาจแบ่งได้เป็น 3 ระยะ ซึ่งอธิบายได้ตามรูปที่ 2.6 ดังนี้คือ



รูปที่ 2.6 ระยะในการเกิดเจลาติไนเซชั่นของเม็ดสตาร์ช

ที่มา: Sanders (1996)

ระยะที่ 1 เป็นระยะที่น้ำแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น เม็ดแป้งเกิดการดูดซึมน้ำเย็นและการพองตัวได้อย่างจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยไม่เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด เม็ดสตาร์ชคงรักษารูปร่างและโครงสร้าง birefringence ได้

ระยะที่ 2 เป็นระยะที่ให้ความร้อนกับน้ำแป้งจนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้พันธะไฮโดรเจนหรือ water bridge คลายตัวลง ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดสตาร์ชอ่อนแอลง เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำและพองตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำบริเวณเม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น จึงเกิดความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำแป้งมีความใสเพิ่มขึ้น สตาร์ชที่ละลายได้เริ่มละลายออกมา เม็ดสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้าง birefringence เริ่มหายไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "การเกิดเจลาติไนเซชั่น" (gelatinization) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสูญเสียโครงสร้าง birefringence หายไปว่า gelatinization temperature และถ้าตรวจวัดด้วยเครื่อง Brabender viscoamylograph จะเรียกอุณหภูมินี้ว่า "อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด" หรือ "pasting temperature" เมื่อเกิดเจลาติไนเซชั่น พบว่าความหนืด

ของแป้งสูงสุดที่อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวได้สูงสุด เรียกอุณหภูมิ ณ จุดนี้ว่า "peak temperature" และเรียกความหนืดสูงสุดที่เกิดขึ้นว่า "peak viscosity" เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีกจะทำให้โครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ส่งผลให้ความหนืดลดลง ถ้ามีการให้ความร้อนต่อไป ความหนืดจะค่อย ๆ ลดลง จนเข้าสู่ระยะที่ 3

ระยะที่ 3 เป็นระยะที่เม็ดสตาร์ชจะมีรูปร่างไม่แน่นอน พันธะภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลายและแตกออกอย่างสมบูรณ์ (Sanders, 1996) ความหนืดของ paste ขึ้นกับผลการแตกตัวของเม็ดแป้งในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชั่น โดยถ้าเม็ดแป้งแตกตัวได้มาก มีผลให้ความหนืดของ paste สูง แต่ถ้าเม็ดแป้งแตกตัวได้น้อย ทำให้ความหนืดต่ำลง (Schoch, 1964)

2.6 การเปลี่ยนแปลงของข้าวขณะสุก

ข้าวสุกเกิดจากการเจลาติไนเซชั่นของเม็ดแป้งซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักภายในเมล็ดข้าว ขณะหุงข้าวน้ำจะซึมเข้าไปในเม็ดแป้งข้าวบริเวณอสัณฐาน สายของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะคลายตัวออกและเกิดพันธะกับโมเลกุลของน้ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพันธะไฮโดรเจนจะอ่อนแอลง ทำให้น้ำสามารถซึมเข้าไปในเมล็ดข้าวเพิ่มมากขึ้น เม็ดแป้งพองตัวมากขึ้นและใสขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิแป้งสุกของแป้งข้าว พันธะต่างๆ ภายในเม็ดแป้งจะถูกทำลายและเปลี่ยนแปลงไปจนไม่สามารถผันกลับได้ ข้าวจะเริ่มสุกจากผิวรอบนอกของเมล็ด ความหนาของชั้นที่เกิดเจลาติไนเซชั่นหรือชั้นที่สุกจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน

Horigane และคณะ (1999) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของข้าวสารในระหว่างการหุงโดยใช้ Nuclear Magnetic Resonance (NMR) ผู้วิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ข้าวจะสามารถดูดน้ำไว้มากขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการหุงให้สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่น ข้าวจะเริ่มสุกโดยสุกจากบริเวณขอบนอกของเมล็ดก่อน และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการหุงข้าวจนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ชั้นของข้าวที่เกิดเจลาติไนเซชั่นจะหนาขึ้นตามระยะเวลาที่ให้ความร้อน

2.7 การเปลี่ยนแปลงของข้าวสารในระหว่างการเก็บที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก

ข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพ และการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของข้าว โดยขึ้นกับสภาวะการเก็บข้าว พันธุ์ข้าวและความต้องการของผู้บริโภค และปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของข้าวในระหว่างการเก็บ ได้แก่ ปริมาณความชื้น อุณหภูมิการเก็บและระยะเวลาในการเก็บ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวที่เกิดขึ้น ได้แก่ pasting properties สีและกลิ่นรสของข้าว และองค์ประกอบทางเคมี เช่น อะไมโลส โปรตีน และไขมัน เป็นต้น (Barber, 1972; Villareal et al., 1976; Indudhara Swamy et al., 1978; Charstil, 1990c; 1992; Pomeranz, 1992; Perdon, et al., 1997; 1999; Noomhorm et al., 1997; Suzuki et al., 1999)

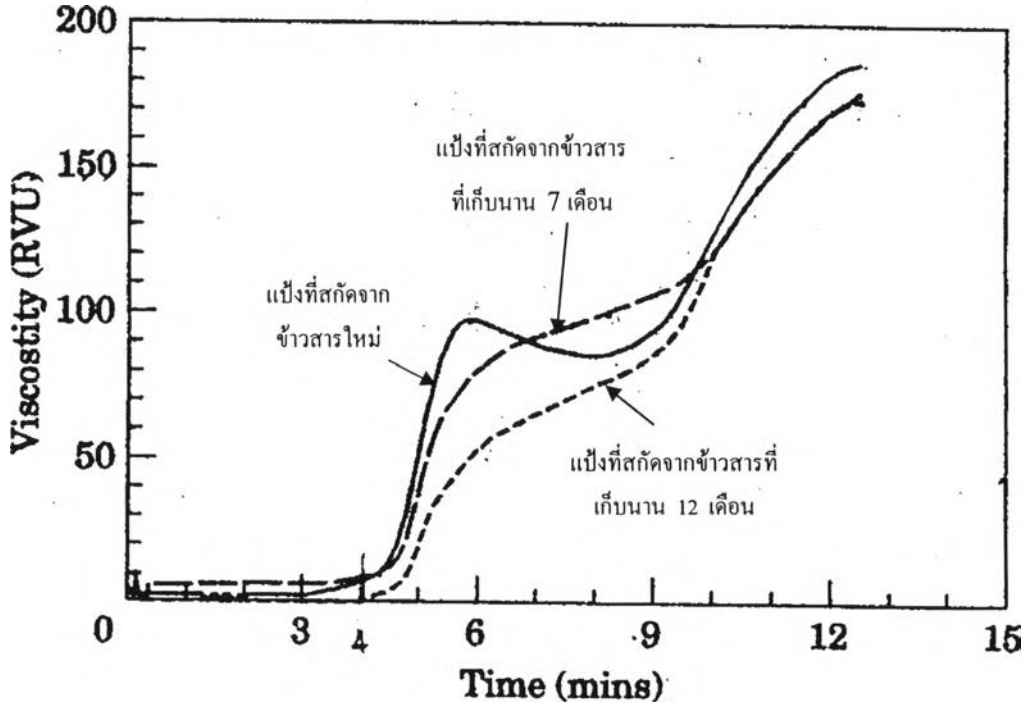
การดูดซับน้ำและการพองตัวของเม็ดสตาร์ชในข้าวสารใหม่เกิดขึ้นอย่างอิสระ ของแข็งที่ละลายน้ำได้มีปริมาณมากและเนื้อสัมผัสของข้าวสุกใหม่มีความเหนียวนุ่ม แต่หลังจากเก็บข้าวสารเป็นเวลานานขึ้น การพองตัวของเม็ดสตาร์ชจะเกิดได้อย่างช้า ๆ เมล็ดข้าวมีความยาวเพิ่มมากขึ้นและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำลดลง (Ramesh et al., 2000) เนื้อสัมผัสของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษามีความร่วนแข็งและเมล็ดข้าวไม่เหนียวติดกัน การเปลี่ยนแปลงของข้าวสารในระหว่างการเก็บจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิต่ำ และเกิดได้เร็วที่อุณหภูมิสูง การเปลี่ยนแปลงของข้าวสารในระหว่างการเก็บที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของ pasting property การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และเอนไซม์โปรติเอส

ก. การเปลี่ยนแปลงของ pasting property

Pasting property เป็นสมบัติหนึ่งที่นิยมใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของข้าวในระหว่างการเก็บ วัดโดยใช้ Amylograph ซึ่งสามารถประเมินค่าการพองตัวของเม็ดสตาร์ช การเกิดเจลาติไนเซชั่น และการเกิดการคืนตัวของแป้ง

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บ Villareal และคณะ (1976) พบว่าสตาร์ชที่สกัดจากข้าวเหนียวและข้าวเจ้าที่เก็บที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน ให้เจลที่มีความแข็งมากกว่าและมีความหนืดสูงกว่าเมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส ที่เวลาการเก็บเท่ากัน อย่างไรก็ตาม เพสต์ของสตาร์ชที่สกัดจากข้าวที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิทั้งสองระดับจะมีค่าความหนืดสูงกว่าเพสต์จากสตาร์ชที่สกัดจากข้าวสารใหม่ และในกรณีศึกษาเดียวกันของ Villareal และคณะ (1976) ที่พบว่าค่า peak viscosity และ set back ของสตาร์ชที่เตรียมจากข้าวที่เก็บในรูปของข้าวสารและข้าวเปลือก เป็นเวลานาน 6 เดือนมีค่าเพิ่มขึ้น และจะลดลงหลังจากเก็บนาน 3 ปี จากผลการศึกษาของ Juliano (1985) พบว่าความหนืดของเพสต์ที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิสูงมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาในการเก็บ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Perdon และคณะ (1997) ที่รายงานว่าค่า peak viscosity ของสตาร์ชซึ่งเตรียมจากข้าวสารเมล็ดกลางที่เก็บที่อุณหภูมิ 20 และ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 เดือน มีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีความแตกต่างจากผลการศึกษาของ Lin และคณะ (1979) ที่พบว่าค่า peak viscosity ของสตาร์ชที่เตรียมจากข้าวสารเก่า มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชที่สกัดจากข้าวสารใหม่ ซึ่งผลการวิจัยของ Lin และคณะ (1979) นี้สอดคล้องกับผลการศึกษาค่า pasting property ของสตาร์ชที่สกัดจากข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 เดือนและ 12 เดือน โดย Noomhorm และคณะ (1997) ซึ่งพบว่า peak viscosity และ final viscosity ของข้าวสารที่เก็บเป็นเวลา 7 เดือนและ 12 เดือน ดังรูปที่ 2.7 มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับความหนืดของสตาร์ชที่สกัดจากข้าวสารใหม่ เนื่องจากเม็ดสตาร์ชที่สกัดได้จากข้าวสารเก่ามีความสามารถในการต้านทานการ

พองตัวในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชั่นได้ดีกว่าเม็ดสตาร์ชที่สกัดได้จากข้าวสารใหม่ ส่วนการลดลงของค่า breakdown นั่นแสดงว่าเม็ดสตาร์ชแตกตัวได้น้อยลงในขณะเกิดเจลาติไนเซชั่น



รูปที่ 2.7 RVA curve ของแป้งที่สกัดจากข้าวสารใหม่ (——) และข้าวสารที่เก็บเป็นเวลา 7 (– – -) และ 12 เดือน (-----) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

ที่มา: Noomhorm และคณะ (1997)

อุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งข้าวใหม่เท่ากับ 73-86 องศาเซลเซียส และค่าเอนทาลปี (enthalpy) ของการเกิดเจลาติไนเซชั่น มีค่าเท่ากับ 8.3 – 9.7 $J.g^{-1}$ แต่เมื่อเก็บข้าวเป็นเวลานานขึ้น พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่นและค่าเอนทาลปีของการเกิดเจลาติไนเซชั่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยจากการศึกษาของ Fan และ Marks (1999) และ Fan และคณะ (1999) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าเอนทาลปีของการเกิดเจลาติไนเซชั่น ค่าเอนทาลปีของการคืนตัวของแป้ง อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่นและอุณหภูมิการคืนตัวของแป้งเป็นผลมาจากอุณหภูมิในการเก็บ ปริมาณความชื้นและระยะเวลาในการเก็บ โดยผู้วิจัยรายงานว่าข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส มีค่าเอนทาลปีและอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งมากกว่าข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 21 องศาเซลเซียส และค่าเอนทาลปีของการคืนตัวของแป้งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.0001$) แต่อุณหภูมิของการคืนตัวของแป้งไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ข. การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของข้าวได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของสตาร์ช โปรตีน ไขมัน การเกิดอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบทางเคมีในระหว่างการเก็บข้าว และการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของเอนไซม์ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพรวมทั้งคุณภาพของข้าว โดยการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของข้าวมีผลจากอุณหภูมิ ระยะเวลาและปริมาณความชื้นในระหว่างการเก็บ

ข.1 การเปลี่ยนแปลงของสตาร์ช

ปริมาณอะไมโลสเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและสามารถใช้ในการทำนายลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกได้ (Juliano, 1979; 1985; Webb, 1985; Lii et al., 1996) ปริมาณอะไมโลสมีผลโดยตรงต่อการดูดซับน้ำ ปริมาตรของข้าวสุกที่ขยายตัว ลักษณะเมล็ดเป็นปุยและการเกาะติดกันของเมล็ดข้าวสุก (Delwiche et al., 1996) นอกจากนี้ Tester และคณะ (1990) ยังรายงานว่าค่า cohesiveness tenderness และ glossiness ของข้าวสุกแปรตามปริมาณอะไมโลสในข้าวสาร

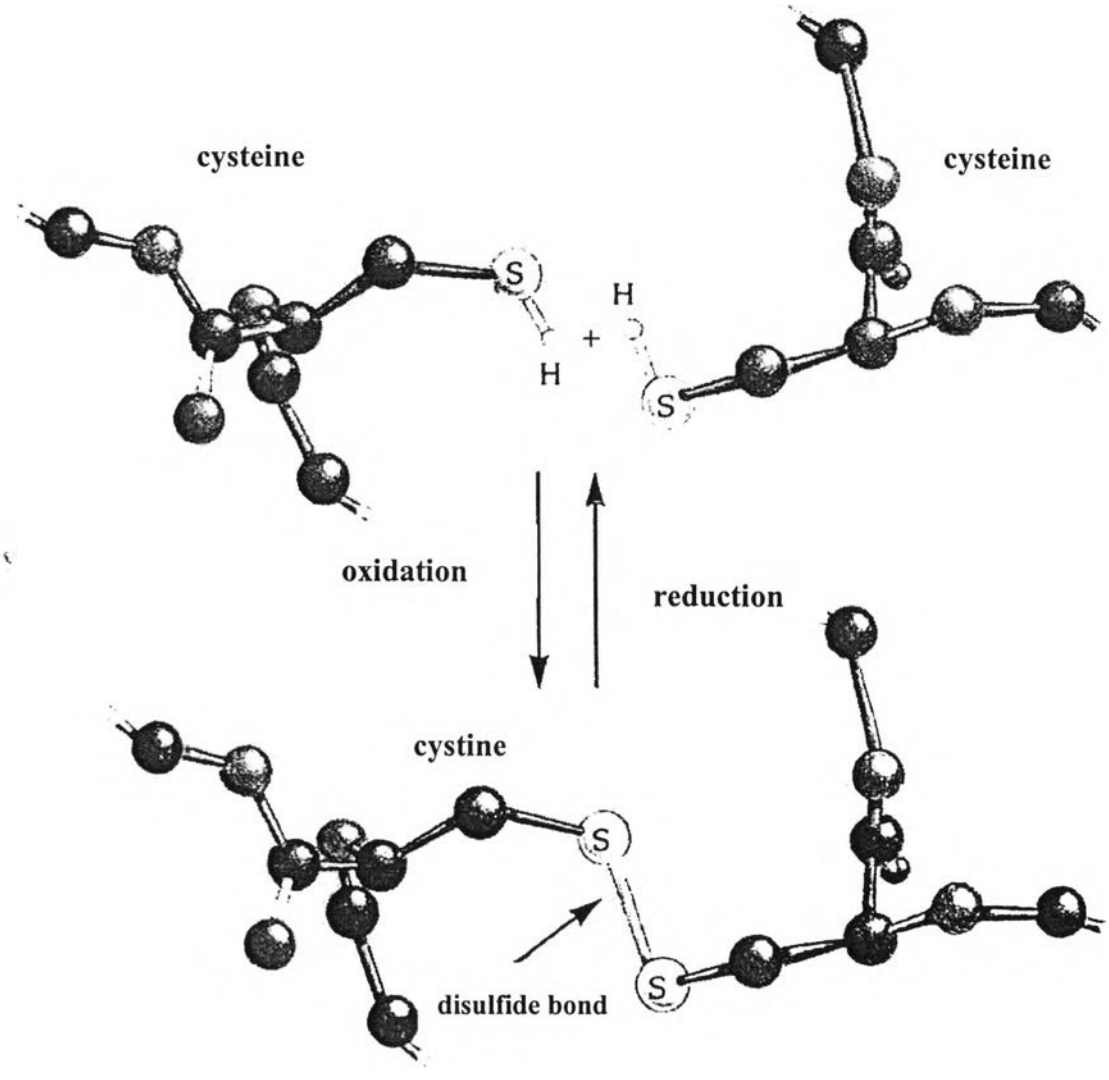
Juliano และคณะ (1965) รายงานว่าค่าการละลายของอะไมโลสสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการจัดจำแนกประเภทของข้าวได้ โดยข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสปานกลาง (medium amylose) และปริมาณอะไมโลสต่ำ (low amylose) จะมีปริมาณอะไมโลสที่ละลายน้ำได้ประมาณร้อยละ 55-65 โดยน้ำหนัก (Bhattacharya et al., 1972; 1982) ปริมาณอะไมโลสที่ละลายน้ำได้เป็นดัชนีในการประเมินความแตกต่างของคุณภาพการหุงต้มของข้าว และเป็นวิธีที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง ปริมาณอะไมโลสที่ถูกชะออกมาในระหว่างการหุงต้มจะขึ้นอยู่กับปริมาณอะไมโลสทั้งหมดในข้าว ซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 18.4-29.5 โดยน้ำหนัก (Ong and Blanshard, 1995a; 1995b) Bhattacharya และคณะ (1978) พบว่าปริมาณอะไมโลสที่ไม่ละลายน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อคุณภาพของข้าว โดยเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่ได้จากข้าวสารที่มีปริมาณอะไมโลสที่ไม่ละลายน้ำสูงจะมีความแข็งมากกว่าเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่ได้จากข้าวสารที่มีปริมาณอะไมโลสที่ไม่ละลายน้ำต่ำกว่า เนื่องจากโครงสร้างของอะไมโลสเป็นโมเลกุลสายตรง ซึ่งสามารถเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลได้ดี เมื่อเก็บข้าวเป็นเวลานานขึ้นทำให้อะไมโลสสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมัน (amylose-lipid complex) (Swinkels, 1985) และโปรตีนบริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชได้ (Sano, 1984; Villareal and Juliano, 1986) ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวทำให้การละลายของอะไมโลสต่ำลงและมีผลยับยั้งการพองตัวและการแตกตัวของเม็ดแป้งในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้ง (Tester et al., 1990) โดยปริมาณอะไมโลสที่ไม่ละลายน้ำคำนวณได้จากผลต่างระหว่างปริมาณอะไมโลสทั้งหมดและปริมาณอะไมโลสที่ละลายน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (Bhattacharya et al., 1978)

ข2. การเปลี่ยนแปลงของโปรตีน

โปรตีนเป็นองค์ประกอบที่พบน้อยในเมล็ดข้าวเมื่อเทียบกับสตาร์ช แต่เป็นองค์ประกอบที่มีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพของข้าว Barber (1972) พบว่า โปรตีนมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก ได้แก่ค่า tenderness และ cohesiveness และนอกจากนี้โปรตีนยังมีผลต่อค่า stickiness ของข้าวสุก (Juliano, 1985)

จากการศึกษาของ Primo และคณะ (1962) พบว่าบริเวณชั้นนอกของเมล็ดข้าวมีปริมาณโปรตีนมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ข้าวสุกที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งและร่วนมากกว่าข้าวสุกที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ Onate และคณะ (1964) และ Juliano และคณะ (1965) พบว่าข้าวสุกที่มีปริมาณโปรตีนต่ำจะมีค่า tenderness และ cohesiveness สูงกว่าข้าวสุกที่มีปริมาณโปรตีนสูง เนื่องจากโปรตีนจะรวมตัวเป็นชั้นหนาบริเวณผิวของเมล็ดข้าวและกันไม่ให้น้ำซึมผ่าน ทำให้ข้าวที่มีปริมาณโปรตีนสูงดูดซับน้ำน้อยกว่าข้าวที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ (Chakrabarthy et al., 1972) เม็ดสตาร์ชจึงเกิดเจลาติไนเซชั่นลดลงและส่งผลให้เนื้อสัมผัสของข้าวสุกมีความแข็งมากขึ้น

ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่ได้จากข้าวสารที่ผ่านการเก็บเป็นเวลา 1 เดือน มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (Juliano, 1985) ข้าวสุกที่หุงโดยใช้ข้าวสารใหม่จะมีเนื้อสัมผัสเหนียวนุ่ม แต่หลังจากเก็บข้าวสารเป็นเวลานานขึ้น เนื้อสัมผัสของข้าวสุกจะมีความเหนียวนุ่มลดลงและเมล็ดข้าวสุกมีลักษณะเป็นปุยมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของพันธะ sulfhydryl และ disulfide (Charstil, 1990b; Hamaker and Griffin , 1993) พันธะ sulfhydryl จะถูกออกซิไดส์ไปเป็นพันธะ disulfide ในระหว่างการเก็บข้าว การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นในการเปลี่ยนพันธะจาก sulfhydryl ไปเป็น disulfide แสดงในรูปที่ 2.8 มีผลให้ค่า firmness ของข้าวสุกเพิ่มขึ้น และค่า stickiness ลดลง จากการศึกษาของ Chrastil และ Zarin (1990) พบว่าปริมาณ sulfhydryl อิสระจะลดลง ในขณะที่การเกิดพันธะ disulfide เพิ่มขึ้น พันธะ disulfide เป็นพันธะที่มีความแข็งแรง ทำให้การละลายของโปรตีนลดลงและยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช แป้งจึงเกิดเจลาติไนเซชั่นลดลง และจากการศึกษาของ Moritaka และ Yasumatsu (1972) พบว่าความหนืดของแป้งข้าวเพิ่มขึ้น เมื่อเติม hydrogen sulfide ซึ่งเป็น oxidizing agent และเป็นสารตั้งต้นให้เกิด sulfhydryl อิสระ



รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นเปลี่ยนพันธะจาก sulfhydryl ในกรดอะมิโน cysteine เป็น disulfide ในกรดอะมิโน cystine

ที่มา : Branden and Tooze (1999)

Charatil (1990b) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่เกิดขึ้นในข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 เดือน ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 2 .4

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 40 องศาเซลเซียส เวลา 12 เดือน

	medium grain			long grain		
	control	4 °C	40 °C	control	4 °C	40 °C
moisture (%)	13.00	13.00	12.90	13.20	13.10	13.10
protein						
total, %	8.30	8.30	8.30	7.60	7.60	7.60
soluble, %	6.00	5.30	3.60	5.10	4.70	3.00
starch						
total, %	90.00	89.50	89.40	90 10	90.00	90.10
amylose, %	17.00	17.10	17.70	26.00	26.10	27.00
oryzenin						
S, % as –SH-	0.20	0.19	0.13	0.16	0.16	0.14
S, % as –SS-	0.13	0.14	0.20	0.16	0.16	0.18

ที่มา : Charatil (1990b)

จากตารางที่ 2.4 พบว่าปริมาณโปรตีนและสตาร์ชที่สกัดจากข้าวไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บ แต่การละลายของโปรตีนมีค่าลดลง โดยการละลายของโปรตีนในข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าลดลง ซึ่งการละลายของโปรตีนที่ลดลงนั้นเกิดจากการเพิ่มขึ้นของ disulfide bond (-SS-) ในกรดอะมิโน cystine

โปรตีนที่รวมตัวกันอยู่ในส่วน endosperm มีผลยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้ง (Little and Dawson, 1960) โปรตีนที่อยู่ถัดจากชั้นแอลิวโรนและอยู่ในชั้นแอลิวโรนจะรวมกันเป็นกลุ่มของโปรตีนและแทรกอยู่ใน endosperm (Juliano, 1985) นอกจากนี้โปรตีนยังอยู่ในรูปของ matrix protein ซึ่งเป็นโปรตีนที่สามารถอยู่รวมกับเม็ดสตาร์ช ทำให้มีผลต่อ viscoelastic properties ของน้ำแป้งเข้มข้น 10 % (Hamaker, 1994)

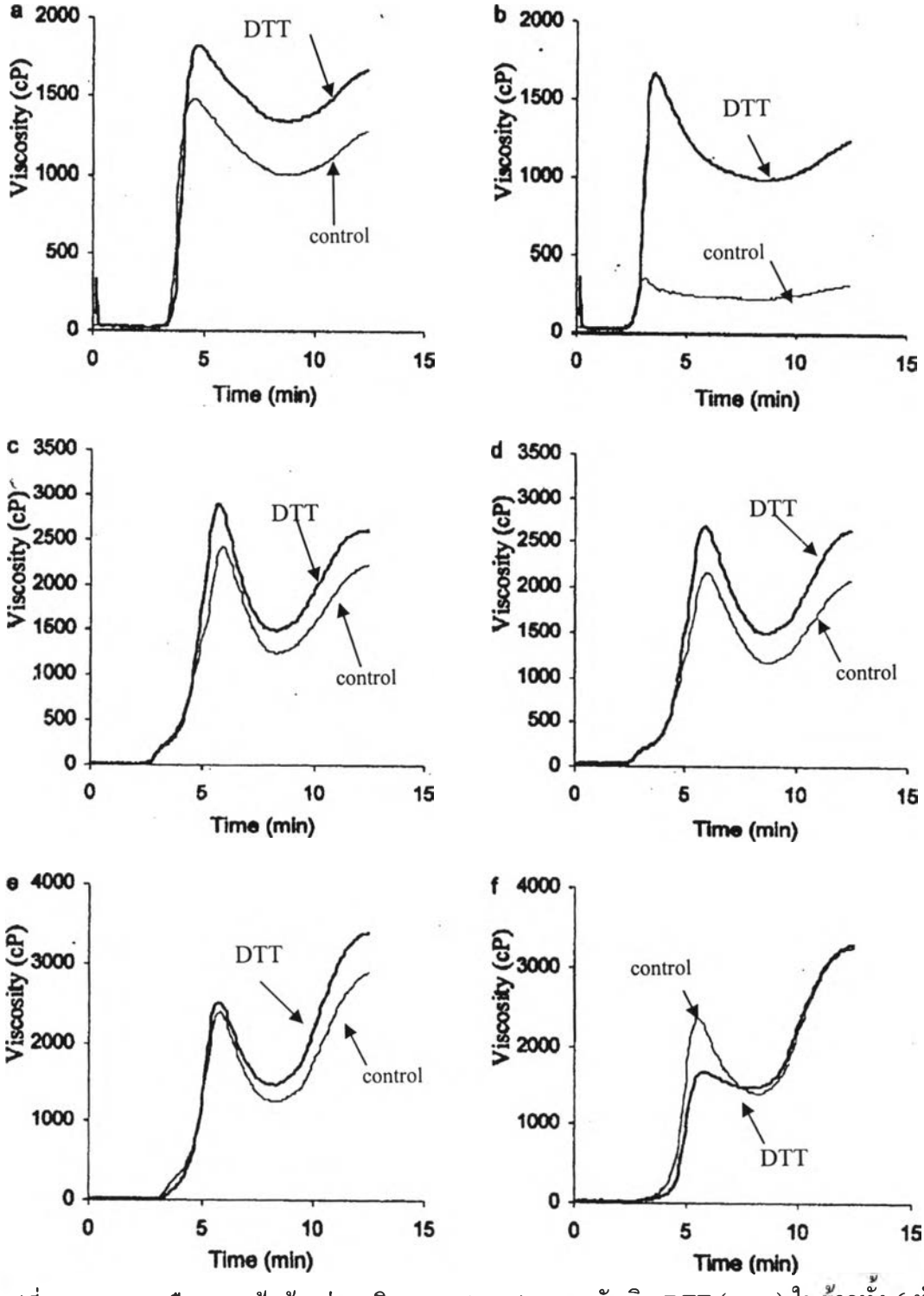
Marshall และคณะ (1990) ศึกษาผลของการสกัดโปรตีนที่มีผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งข้าว โดยใช้เอนไซม์ pronase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่จัดอยู่ในกลุ่มเอนไซม์ protease ที่ทำหน้าที่ตัดสายพันธะไดเปปไทด์ของโปรตีน โดยทดลองในแป้งข้าวที่เติมฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.03 M และเอนไซม์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวัดระดับการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งโดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า อุณหภูมิการเกิดเจลาติ-ไนเซชั่นของแป้งลดลงเมื่อเติมเอนไซม์ pronase ในแป้งข้าว เนื่องจากเอนไซม์ pronase เป็น

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอนไซม์ที่สามารถตัดสายพันธะเปปไทด์ของโปรตีน จึงกำจัดโปรตีนที่รวมอยู่กับสตาร์ชออกไป ดังนั้นเม็ดแป้งจึงมีการพองตัวได้มากขึ้นและเกิดการแตกตัวจากความร้อนและแรงเฉือนได้ง่ายขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งจึงมีค่าลดลง

ในกรณีศึกษาเดียวกันของ Marshall และคณะ (1990) ที่ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้าวพันธุ์ Lemont ที่เติมฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.03 M และเอนไซม์ pronase เข้มข้น 0.02 % และบ่มตัวอย่างข้าวที่เติมสารละลายบัฟเฟอร์และเอนไซม์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารละลายบัฟเฟอร์และเอนไซม์ วัดผลการเปลี่ยนแปลงของเมล็ดข้าวโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) จากผลการทดลองเมื่อเติมเอนไซม์ pronase เข้มข้น 0.02 % พบว่าเมล็ดข้าวเกิดรอยแตกของเมล็ดได้อย่างชัดเจนและมีความลึก โดยรอยแตกที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ pronase ซึ่งมีผลทำให้น้ำสามารถแทรกผ่านเข้าไปในเม็ดแป้งได้มากขึ้น เม็ดแป้งจึงเกิดการพองตัวและแตกตัวได้ดีในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชั่น ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งลดลง ดังนั้นแป้งจึงเกิดเจลาติไนเซชั่นได้ดีขึ้น

Martin และ Fitzgerald (2002) ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าว เมื่อทดลองเติม dithiothreitol (DTT) ในตัวอย่างข้าว 6 พันธุ์ที่ได้จากประเทศออสเตรเลีย ได้แก่ ข้าวเหนียวพันธุ์ Shumazi mochi และ Tarra 140 ข้าวพันธุ์ Koshihikari และ Amaroo ซึ่งเป็นข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก และข้าวพันธุ์ Doongara และ Basmati มีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และวัดค่าความหนืดของแป้งข้าวโดยใช้ Rapid visco analyser (RVA) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความหนืดของแป้งข้าวก่อนเติม DTT (——) และหลังเติม DTT (——) ในข้าวทั้ง 6 พันธุ์ ซึ่งวัดค่าความหนืดของแป้งโดยใช้เครื่อง RVA โดย รูป a : ข้าวพันธุ์ Tarra 140 รูป b : ข้าวพันธุ์ Shimazi mochi รูป c : ข้าวพันธุ์ Koshihikari รูป d : ข้าวพันธุ์ Amaroo รูป e : ข้าวพันธุ์ Doongara และ รูป f : ข้าวพันธุ์ Basmati

ที่มา : Martin และ Fitzgerald (2002)

รูปที่ 2.9 แสดงผลของความหนืดของแป้งข้าวก่อนและหลังเติม DTT ในข้าวทั้ง 6 พันธุ์ และวัดค่าความหนืดของแป้งโดยใช้ RVA จากรูปดังกล่าวพบว่า ความหนืดของข้าวทุกพันธุ์ที่มีการเติม DTT ยกเว้นข้าวพันธุ์ Basmati มีค่าลดลง เนื่องจาก DTT เป็น reagent ที่สามารถทำลายพันธะเปปไตด์ของโปรตีนในข้าวได้ ซึ่งมีผลทำให้โปรตีนถูกกำจัดออกไป เม็ดแป้งเกิดการแตกตัวในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชั่นได้ดีขึ้น ดังนั้นทำให้ peak viscosity ของแป้งข้าวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนในข้าวพันธุ์ Basmati จะมีค่า peak viscosity และ ค่า break down สูงขึ้น แต่ค่า final viscosity ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากในช่วงที่มีการเก็บข้าว จะเกิด disulfide bond ขึ้นในโครงสร้างของโปรตีน การละลายของโปรตีนลดลง และเมื่อเติม DTT ทำให้การละลายของโปรตีนเพิ่มขึ้น เม็ดแป้งมีการพองตัวได้มากขึ้น ดังนั้น peak viscosity ของแป้งมีค่าสูงขึ้น

ข.3 การเปลี่ยนแปลงของไขมัน

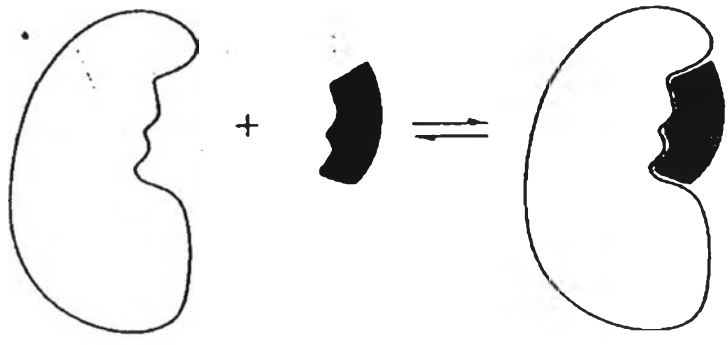
การเปลี่ยนแปลงของไขมันในระหว่างการเก็บข้าวเกิดจากปฏิกิริยาเคมี 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์หลักคือกรดไขมันอิสระ และปฏิกิริยาออกซิเดชั่นซึ่งได้ผลิตภัณฑ์คือสารประกอบคาร์บอนิลและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Sowbharya and Bhattacharya, 1976) ปฏิกิริยาทั้งสองจะเกิดได้ดีที่บริเวณส่วนชั้นนอกของเมล็ดข้าวซึ่งเป็นบริเวณที่พบไขมันที่เป็น free lipid เป็นส่วนใหญ่

ไขมันที่อยู่ในรูปสารประกอบคาร์บอนิล เป็นสารประกอบที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของโปรตีนในการเปลี่ยนพันธะ sulfhydryl ในกรดอะมิโน cysteine ไปเป็นพันธะ disulfide ในกรดอะมิโน cystine ซึ่งมีผลทำให้การละลายของโปรตีนลดลง และพันธะที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น การพองตัวของเม็ดแป้งจึงเกิดได้น้อย ส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกแข็งขึ้น

ค. เอนไซม์โปรติเอส

เอนไซม์คือโปรตีนกลุ่มหนึ่งที่มีหน้าที่แตกต่างจากโปรตีนและมหชีวโมเลกุลทั่วไป กล่าวคือ มีความสามารถเร่งปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเร่งสังเคราะห์หลายล้านเท่าด้วยปริมาณเอนไซม์เพียงระดับไมโครโมลาร์ (μM) นอกจากนี้เอนไซม์สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ภายใต้ภาวะไม่รุนแรงซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งกับภาวะภายในเซลล์และเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตทั่วไป เอนไซม์มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารที่ทำปฏิกิริยาซึ่งเรียกว่า ซับสเตรต (substrate) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และสามารถเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์โดยไม่เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ตลอดทั้งเอนไซม์จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาได้

โปรติเอส (protease) เป็นเอนไซม์ที่สำคัญชนิดหนึ่งในระบบการย่อยอาหารสู่ร่างกาย เช่น เปปซิน ทริปซิน โปรติเนส เปปไทด์ไฮโดรเลสและเอนไซม์โปรติโอไลติค ทำหน้าที่สลายพันธะเปปไทด์ –CO-NH-



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์และความจำเพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์และซับสเตรต (substrate)

ที่มา : Whitaker (1994)

Dhaliwal และคณะ (1991) พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ protease ในข้าวที่ผ่านการเก็บรักษามีค่าเพิ่มขึ้น แต่จากการศึกษาของ Rusell (1987); Slade และ Levin (1991); Lima และ Singh (1993); AMC (1995); Noomhorm และคณะ (1997); Fan และ Mark (1999); Chatakanonda และคณะ (2000) พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ protease ในข้าวมีค่าลดลงในระหว่างการเก็บ และจากการศึกษา Barber (1972) พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ในส่วน outer layer และ residual ในข้าวที่ระดับความชื้นร้อยละ 13 ,14.3 และ 15.7 และเก็บที่อุณหภูมิ 5 25 และ 35 องศาเซลเซียส มีค่าลดลง ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 กิจกรรมของเอนไซม์ protease ในข้าวสารที่เก็บที่ระดับความชื้นร้อยละ 13 14.3 และ 15.7 และเก็บที่อุณหภูมิ 5 25 และ 35 องศาเซลเซียส

Storage conditions		Proteolytic activity (units/mg protein, d.b.)	
Moistrue (%)	Temperature (° C)	Outer layer	Residual nucleus
13.0	+5	0.486	0.051
13.0	+25	0.451	0.048
13.0	+35	0.355	0.048
14.3	+5	-	-
14.3	+25	0.356	0.051
14.3	+35	0.328	0.037
15.7	+5	-	-
15.7	+25	-	-
15.7	+35	-	-
Original rice sample		0.508	0.053

ที่มา : ดัดแปลง Barber (1972)

จากผลการศึกษา Barber และคณะ (1974) ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.5 พบว่าการลดลงของกิจกรรมของเอนไซม์ protease มีผลทำให้ความสามารถในการตัดสายพันธะ disulfide ในกรดอะมิโน cystine ได้ลดลง ทำให้การละลายของโปรตีนลดลง มีผลให้การพองตัวของเม็ดแป้งและการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งต่ำลง เนื้อสัมผัสของของข้าวสุกจึงมีความแข็งเพิ่มขึ้น การลดลงของกิจกรรมของเอนไซม์ในการทดลองนี้เกิดเนื่องจากเอนไซม์มีความจำเพาะต่อสารที่ทำปฏิกิริยา (substrate) เมื่อเอนไซม์ไม่สามารถจับกับ substrate ได้ มีผลทำให้เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้ ทำให้ไม่เกิด enzyme-substrate complex ส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ในข้าวที่ผ่านการเก็บมีค่าลดลง (Chrastil, 1988; 1990a)

2.8 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก (Texture of cooked rice)

ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกสามารถวัดได้โดยตรงจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค และนอกจากนี้ยังสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือวัดโดยทดสอบการเลียนแบบการบดเคี้ยวของฟัน เช่น Texture Profile Analysis (TPA) ซึ่งค่าสำคัญที่วัดได้จาก TPA test ได้แก่

hardness, stickiness (adhesiveness), cohesiveness, springiness, gumminess, chewiness และ fracturability (Del Mundo et al., 1989; Champagne et al., 1996)

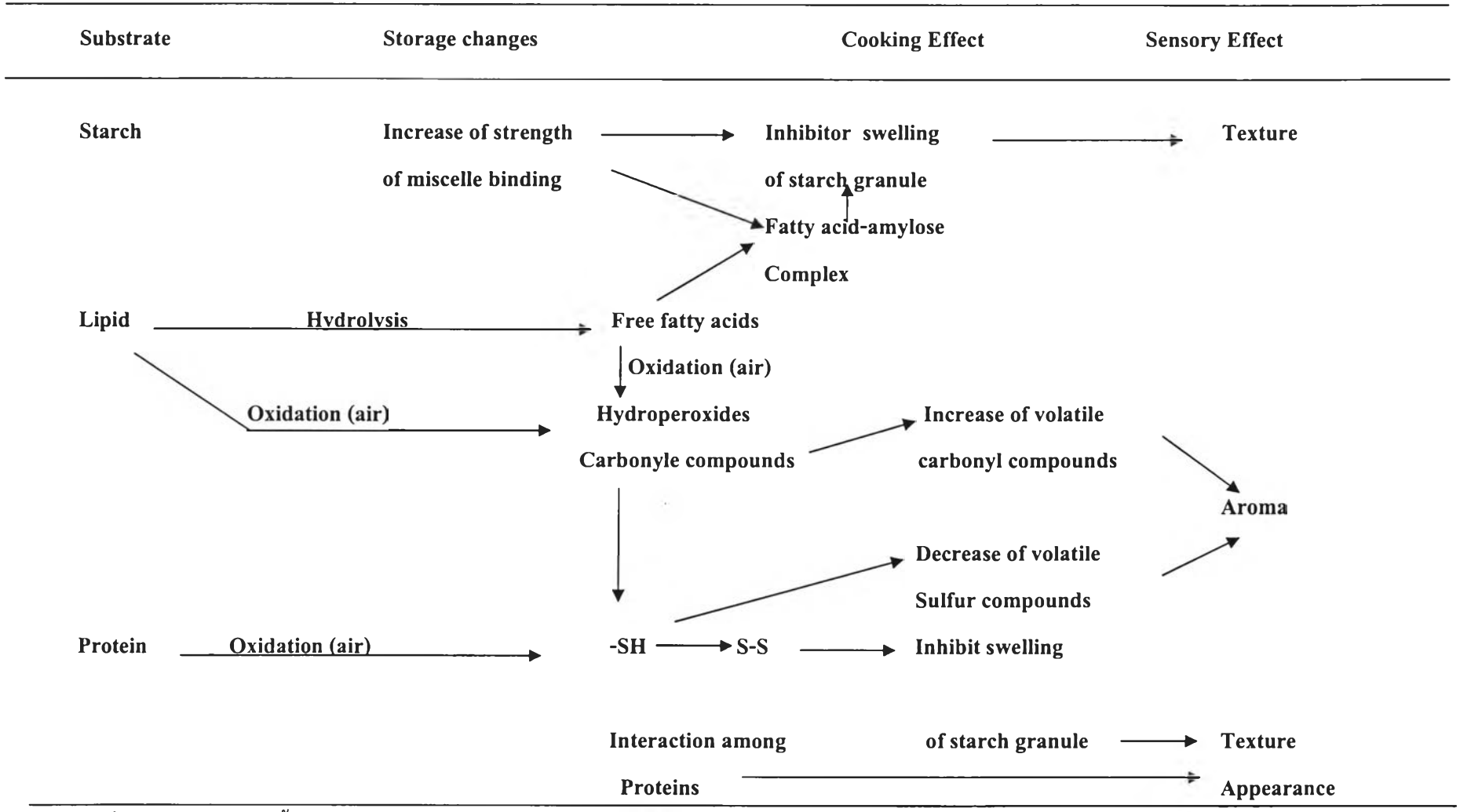
ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกเป็นผลมาจากหลายปัจจัยได้แก่ พันธุ์ข้าว ปริมาณอะไมโลส อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกระบวนการแปรรูปและวิธีการหุงต้ม โดยข้าวสารที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำจะให้ข้าวสุกที่มีเนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่ม ส่วนข้าวสารที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะให้ข้าวสุกที่มีเนื้อสัมผัสที่ร่วนแข็ง Lyon และคณะ (1999) รายงานว่าปริมาณอะไมโลสและปริมาณโปรตีนมีอิทธิผลโดยตรงกับค่า stickiness อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และปริมาณอะไมโลสมีผลเชิงบวกต่อค่า hardness แต่มีผลในเชิงลบต่อค่า stickiness (Juliano, 1985)

ระยะเวลาและอุณหภูมิในการเก็บข้าวมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก (Villareal et al., 1976; Lima and Singh, 1993; Perdon et al., 1999) เนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่ได้จากข้าวสารที่ผ่านการเก็บจะมีค่าความแข็งมากกว่าข้าวสุกจากข้าวสารใหม่ และมีค่า stickiness น้อยกว่า (Moritaka et al., 1971; Shibuya et al., 1974; Okabe, 1979) Mellent และคณะ (1999) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่ได้จากข้าวเปลือกที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 21 และ 38 องศาเซลเซียส โดยใช้ผลจากการทดสอบประสาทสัมผัส พบว่าข้าวสุกที่ได้จากข้าวเปลือกที่เก็บที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส มีความแข็งมากกว่าข้าวสุกที่ได้จากข้าวเปลือกที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และมีค่า stickiness น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Tsugita และคณะ (1983) พบว่าข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จะมีความแข็งของข้าวสุกมากกว่าข้าวสุกที่ได้จากข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และมีค่า stickiness น้อยกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเก็บข้าวที่อุณหภูมิสูงจะเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของโปรตีนและไขมัน โดยไขมันถูกออกซิไดส์ได้เป็นสารประกอบคาร์บอนิล ซึ่งสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของโปรตีนเกิดการเปลี่ยนพันธะ sulfhydryl ในกรดอะมิโน cysteine เป็นพันธะ disulfide ในกรดอะมิโน cystine ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นดังกล่าวนั้นทำให้การละลายของโปรตีนลดลง เม็ดแป้งมีความทนทานต่อแรงเฉือนและความร้อนในระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชั่นได้มากขึ้น ทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งและการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งลดลง เนื้อสัมผัสของข้าวสุกจึงมีความแข็งมากขึ้น

นอกจากอุณหภูมิการเก็บที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวสุกแล้ว ความชื้นในการเก็บข้าวก็มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกเช่นกัน Tamaki และคณะ (1993) พบว่าข้าวสุกที่ได้จากข้าวสารที่เก็บที่ความชื้นร้อยละ 12 จะมีค่า hardness สูงกว่าข้าวสารที่เก็บที่ความชื้นร้อยละ 15 และ 18 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mellenet และคณะ (1999) ที่พบว่าข้าวสุกที่ได้จากข้าวสารที่เก็บที่บรรยากาศที่มีความชื้นสูง จะมีค่า hardness ลดลง ส่วนค่า stickiness เป็นค่าที่วัดความใหม่ของข้าวสุกจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการเก็บข้าวเพิ่มขึ้น โดยจากการศึกษาของ Tamaki และคณะ (1993) พบว่า stickiness ของข้าวสุกที่ได้จากข้าวสารที่เก็บนาน 20 สัปดาห์มีค่าลดลง และมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหลังจากเก็บข้าวสารนาน 36 สัปดาห์

2.9 กลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บ (Mechanism of aging)

Moritaka และ Yasumatsu (1972) เสนอกลไกการเปลี่ยนแปลงของข้าวสารที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของอะไมโลส ไขมันและโปรตีน โดยไขมันเมื่ออยู่ในรูปของกรดไขมันอิสระสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะไมโลส (fatty acid-amylose complex) สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้มีผลยับยั้งการการพองตัวของเม็ดแป้ง จึงทำให้การเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งลดลง ส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวมีความแข็งมากขึ้น และเมื่ออยู่ในรูปของสารประกอบคาร์บอนิลและไฮโดรเปอร์ออกไซด์จะสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของโปรตีน ทำให้พันธะ sulfhydryl ถูกออกซิไดซ์เป็นพันธะ disulfide ทำให้การละลายของโปรตีนลดลง ซึ่งพันธะ disulfide ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถเพิ่มความแข็งแรงของเม็ดแป้งและทำให้เม็ดแป้งมีความทนทานต่อการพองตัวในระหว่างการเกิดเจลาติไน-เซชั่นได้ดีขึ้น แป้งจึงเกิดเจลาติไนเซชั่นได้ต่ำลงและมีผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแข็งขึ้น



รูปที่ 2.11 กลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บข้าวสาร (ที่มา : Morita และ Yasumatsu ,1972)