

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว ได้แก่ ข้าว ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 โครงสร้างและส่วนประกอบของเมล็ดข้าว องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าว การอบแห้ง พื้นฐานการอบแห้งวัสดุ พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน การเก็บในที่อับอากาศ การเป่าด้วยอากาศแวดล้อม การเกิดเจลาทิโนเซชันและการรีโทรกราเดชัน ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล คุณภาพของเมล็ดข้าวเหนียว แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 รูปแบบคือการวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าวเหนียว ได้แก่ ร้อยละต้นข้าว สมบัติด้านแสงสี โครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติด้านการหุงต้ม สมบัติด้านเนื้อสัมผัส สมบัติด้านการย่อยและดูดซึม และการทดสอบด้านประสาทสัมผัส สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพแป้งข้าวเหนียว ได้แก่ สมบัติด้านความหนืด สมบัติทางความร้อน สมบัติด้านสภาพเป็นผลึก และการกระจายสายโซ่อะมิโลเพกติน (Chain length distribution) รายละเอียดมีดังนี้

2.1 ข้าว

ข้าว (Rice) เป็นธัญชาติชนิดหนึ่งได้มาจากเมล็ดธัญพืชในตระกูลหญ้าวงศ์แกรมินีอี (Gramineae) สามารถเจริญเติบโตได้ในลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศแตกต่างกันทั้งในเขตร้อน (Tropical-zone) และเขตอบอุ่น (Temperate zone) ตั้งแต่พื้นที่น้ำท่วมสูงไปจนถึงพื้นที่สูงตามไหล่เขา ทำให้เกิดความหลากหลายของข้าวชนิดต่างๆ แพร่กระจายไปทั่วโลกอย่างน้อย 23 ชนิด และมีชนิดใหญ่ 2 ชนิด คือ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

ข้าวเจ้า และข้าวเหนียว โดยข้าวเหนียวมีองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเมล็ดเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทสตาร์ช (Starch) ที่ประกอบไปด้วยอะมิโลเพกติน (Amylopectin) มากกว่า 90% สำหรับข้าวเจ้ามีองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเมล็ดเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทสตาร์ช ประกอบด้วยอะมิโลเพกตินและอะมิโลส ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน สามารถจำแนกตามปริมาณอะมิโลสได้ดังนี้

ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำมาก ประมาณ $< 10\%$ เช่น กข 6 กข 10 เหนียวสันป่าตอง เป็นต้น

ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ โดยมีปริมาณอะมิโลสระหว่าง 10-20% เช่น ข้าวหอมมะลิ 105 กข 15 ปทุมธานี 1 เป็นต้น

ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลาง โดยมีปริมาณอะมิโลสระหว่าง 20-25% เช่น กข 7 ขาวตาแห้ง ข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวสุพรรณบุรี 60 เป็นต้น

ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง โดยมีปริมาณอะมิโลสระหว่าง 25-34% เช่น เสาไห้ ชัยนาท 1 ปทุมธานี 60 เหลืองประทีพ 123 เป็นต้น

2.1.1 ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6

ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 (กข ย่อมาจาก กรมการข้าว, ตัวเลข 6 เป็นเลขกลุ่มหมายถึงข้าวเหนียว) หรือภาษาอังกฤษเรียกว่า RD 6 (RD ย่อมาจาก Rice Department) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

2.1.1.1 ประวัติพันธุ์ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2545)

ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ได้จากการปรับปรุงพันธุ์โดยการชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกรรมพันธุ์โดยใช้รังสีแกมมา (Gamma) ขนาด 20 กิโลแรด (kRad) อาบเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ให้กลายเป็นพันธุ์ข้าวเหนียว แล้วนำมาปลูกคัดเลือกที่สถานีทดลองข้าวบางเขน กรุงเทพฯ และสถานีทดลองข้าวพิมาย จ.นครราชสีมา จากการคัดเลือกได้ข้าวเหนียวหลายสายพันธุ์ด้วยกันในต้นข้าวช่วงที่ 2 แต่สายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงที่สุดคือ ข้าวดอกมะลิ 105, 65-G₂ U-68-254 เป็นข้าวเหนียวหอมที่มีคุณภาพดีพันธุ์แรกที่ได้จากการอาบรังสี

2.1.1.2 การรับรองพันธุ์

คณะกรรมการพิจารณาพันธุ์ให้ใช้ขยายพันธุ์ได้เมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม 2520

2.1.1.3 ลักษณะประจำพันธุ์

เป็นข้าวเหนียวต้นสูง ความสูงของลำต้นประมาณ 154 cm มีทรงกอกระจ่ายเล็กน้อย ใบยาวสีเขียวเข้ม ใบตรงตั้ง ส่งเสริมให้ปลูกแบบข้าวนาสวนในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปลูกได้เฉพาะฤดูนาปี มีความไวต่อช่วงแสง ทนแล้ง ด้านทานโรคไหม้และใบจุดสีน้ำตาล ระยะพักตัวของเมล็ด 5 สัปดาห์ อายุเก็บเกี่ยวประมาณวันที่ 21 พฤศจิกายน เมล็ดยาวเรียวยาว เปลือกมีสีน้ำตาล เมล็ดข้าวกล้องมีความยาว 7.23 mm กว้าง 2.28 mm และหนา 1.77 mm คุณภาพข้าวสุกมีความนุ่มเหนียว หอม ผลผลิตต่อไร่ประมาณ 670 kg



(ก) ต้นข้าว



(ข) ข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว

รูปที่ 2.1 ลักษณะของข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 (วิทยาลัยข้าวไทย, ไม่ระบุปี)

2.1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของเมล็ดข้าว

โครงสร้างหลักของเมล็ดข้าวแสดงดังรูปที่ 2.2 ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว เรียกว่าเปลือกนอก หรือ แกลบ (Hull หรือ Husk) และ ส่วนบริโภคได้หรือข้าวกล้อง (Caryopsis หรือ Brown rice)

2.1.2.1 เปลือกนอก หรือ แกลบ

เป็นส่วนปกคลุมอยู่ภายนอก มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 20% ของน้ำหนักเมล็ดข้าวทั้งหมด มีความสำคัญในการป้องกันเมล็ดจากเชื้อราและแมลงในระหว่างการเก็บรักษาและช่วยป้องกันการลดลงของความชื้นภายในเมล็ดข้าวจากการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของความชื้นในสิ่งแวดล้อม (Marshall and Wadsworth, 1994) แกลบมีส่วนประกอบของโปรตีน ไขมันและสตาร์ชต่ำ แต่มีเส้นใยหยาบ (Crude fiber) เถ้า (Crude ash) และ ไฟเบอร์อาหาร (Dietary fiber) สูง ดังนั้นส่วนนี้จึงมีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ

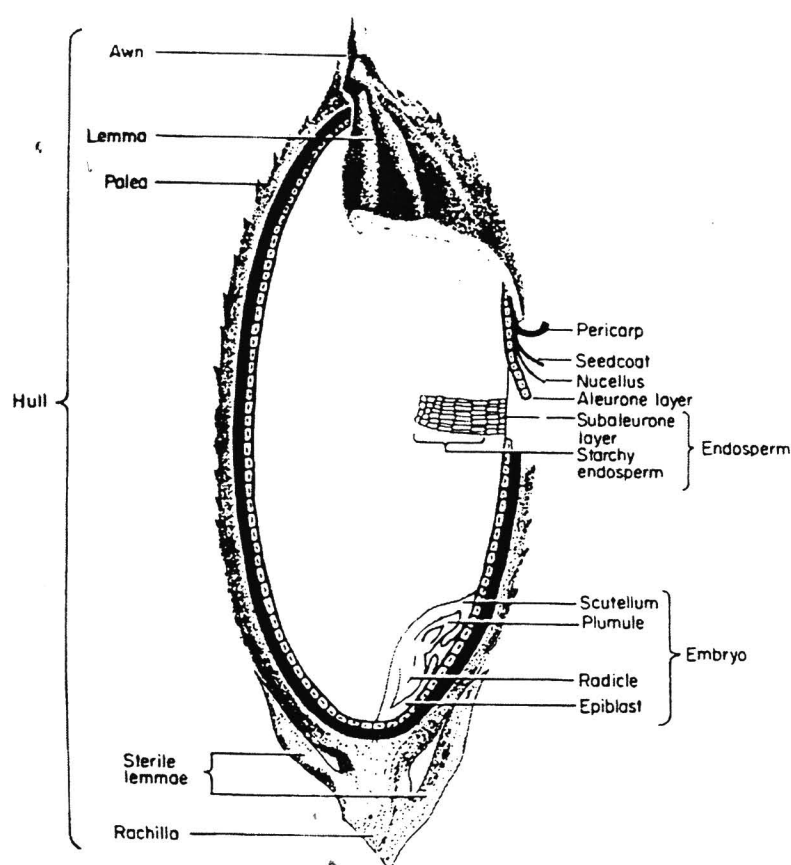
2.1.2.2 ข้าวกล้อง ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วน ดังนี้

1. เยื่อหุ้มผล (Pericarp) เป็นส่วนผิวนอกของข้าวกล้อง
2. เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat หรือ Tegmen) เป็นเซลล์ชั้นเดียว หนาประมาณ 0.5 μm มีไขมันอยู่มาก
3. ชั้นออโรน (Aleurone layer) เป็นชั้นที่มีคุณค่าทางอาหารสูง ภายในชั้นออโรนประกอบด้วย โปรตีน ไขมัน วิตามิน และมีแป้งเล็กน้อย ผันเซลล์ประกอบด้วยโปรตีน เซลลูโลส และเฮมิ

เซตูลอส ดังนั้นเมื่อบริโภควัสดุหุงสุกซึ่งไม่ได้ขัดสีเอาชั้นนี้ออกจึงรู้สึกกระด้างกว่าการบริโภคข้าวสารหุงสุก

4. เอนโดสเปิร์ม (Endosperm) เป็นส่วนเนื้อของเมล็ดข้าวมีอยู่ประมาณ 82% ส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตประเภทสตาร์ช ได้แก่อะมิโลส และอะมิโลเพกติน

5. จมูกข้าวหรือคัพพะ (Embryo) เป็นส่วนเล็กๆ อยู่ที่มุมล่างของเมล็ด ส่วนนี้จะเจริญเป็นต้นอ่อนต่อไป ภายในมีสารอาหารหลายชนิดยกเว้นแป้ง วิตามิน B₁, B₂ และไนอาซิน ซึ่งวิตามินเหล่านี้จะถูกขัดออกไปเมื่อผ่านกระบวนการขัดสี และมีเหลืออยู่น้อยมากในข้าวสาร



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว (Marshall and Wadsworth, 1994)

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือกและส่วนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเปลือกและส่วนต่างๆ (Marshall and Wadsworth, 1994)

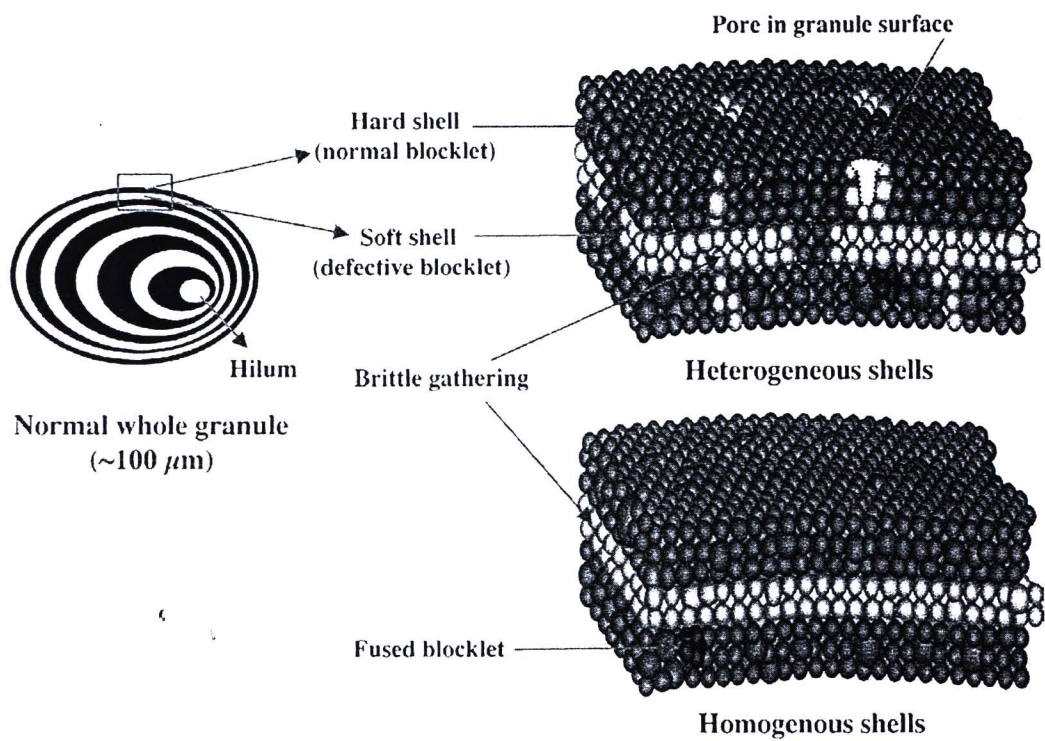
Constituent	Rough	Brown	Milled	Hulls	Bran	Embryo	Polish
Protein							
(N×5.95)	6.7-8.3	8.3-9.6	7.3-8.3	2.3-3.2	13.2-17.3	17.7-23.9	13.0-14.4
Crude fat	2.1-2.7	2.1-3.3	0.4-0.6	0.4-0.7	17.0-22.9	19.3-23.8	11.7-14.4
Crude fiber	8.4-12.1	0.7-1.2	0.3-0.6	40.1-53.4	9.5-13.2	2.8-4.1	2.7-14.4
Crude ash	3.4-6.0	1.2-1.8	0.4-0.9	15.3-24.4	9.2-11.5	6.8-10.1	6.1-8.5
Starch	62.1	77.2	90.2	1.8	16.1	2.4	48.3-55.4
Dietary fiber	19.1	4.5	2.7	77.3	27.6-33.3	-	-

2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าว

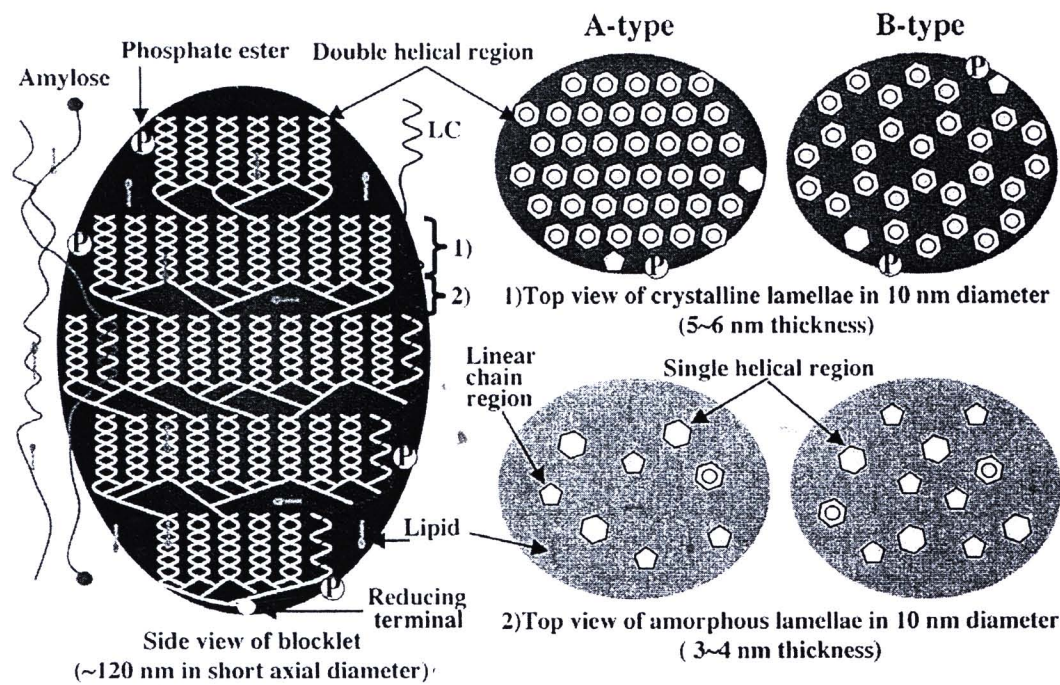
องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าวคือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน

2.1.3.1 คาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรตในเมล็ดข้าวเป็นประเภทสตาร์ช (Starch) พบมากที่สุด ในเนื้อเมล็ดข้าวประมาณ 90% มีลักษณะเป็นเม็ดห้ำเหลี่ยมขนาด 3-9 μm รวมกันอยู่เป็นกลุ่มภายในอะมิโลพลาสต์ (Amiloplast) ที่มีลักษณะกลมหรือรี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7-39 μm โดยภายในแต่ละอะมิโลพลาสต์มีเม็ดสตาร์ชรวมกันอยู่ประมาณ 20-60 เม็ดและระหว่างเม็ดสตาร์ชมีกลุ่มของโปรตีนแทรกอยู่ โครงสร้างของอะมิโลพลาสต์และโครงสร้างของสตาร์ชในอะมิโลพลาสต์แสดงดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 ตามลำดับ

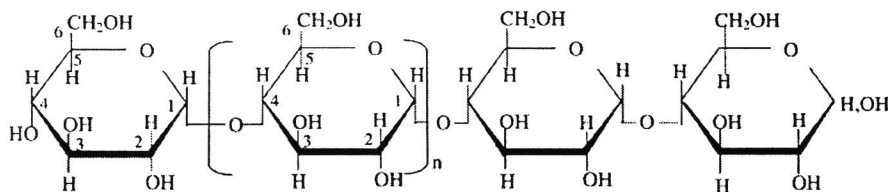


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะมิโลพลาสต์ (Tang et al., 2006)

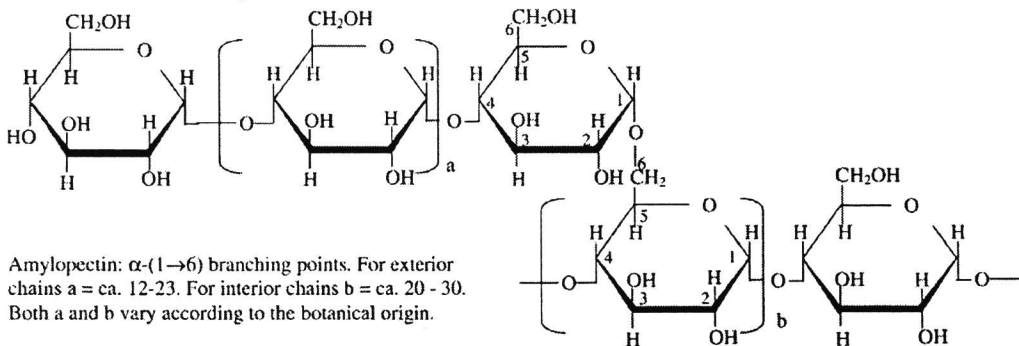


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเม็ดสตาร์ภายในอะมิโลพลาสต์ (Tang et al., 2006)

สตาร์ชประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 ($C_6H_{10}O_5$)_n เป็นพอลิเมอร์ของหน่วยกลูโคสที่เชื่อมเข้าด้วยกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ระหว่างอะตอมออกซิเจนที่ติดกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสหน่วยหนึ่งกับอะตอมคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสหน่วยถัดไป พันธะโคเวเลนต์ที่เชื่อมกลูโคสนี้เรียกว่า กลูโคไซด์หรือพันธะกลูโคซิดิก (Glucoside หรือ Glucosidic bond) สตาร์ชจึงจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตที่เป็นพอลิเมอร์ของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน



Amylose: α -(1 $\rightarrow$ 4)-glucan; average n = ca. 1000. The linear molecule may carry a few occasional moderately long chains linked α -(1 $\rightarrow$ 6).



Amylopectin: α -(1 $\rightarrow$ 6) branching points. For exterior chains a = ca. 12-23. For interior chains b = ca. 20 - 30. Both a and b vary according to the botanical origin.

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินในสตาร์ช (Tester et al., 2004)

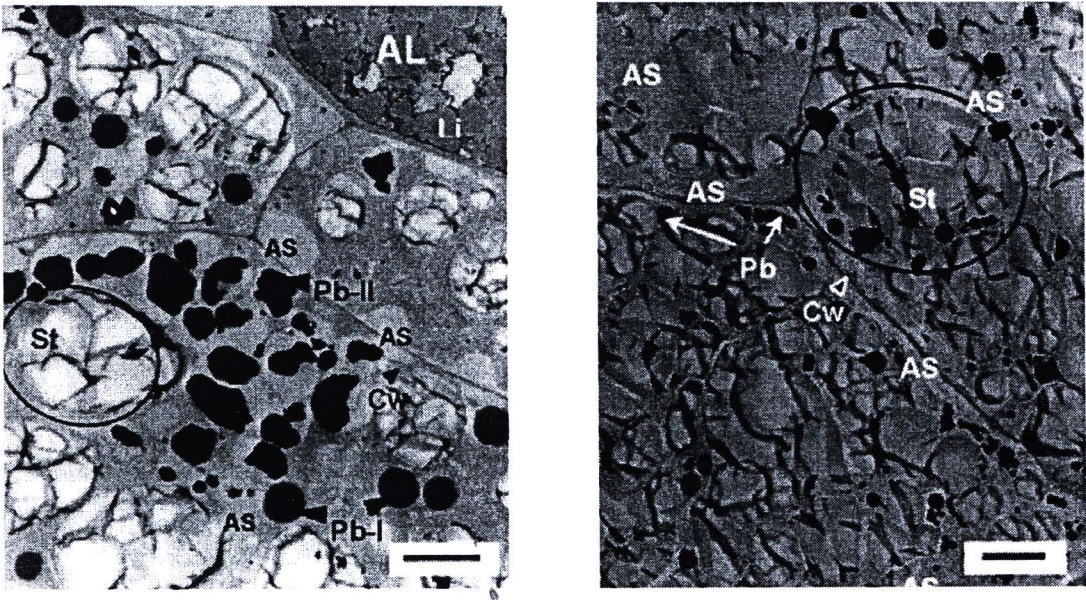
อะมิโลสเกิดจากการเรียงต่อกันของกลูโคสที่มีโครงสร้างเป็นสายตรงของหน่วยกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α D(1 $\rightarrow$ 4)-glucosidic มีหน่วยกลูโคส (Anhydroglucose unit : AGU) ประมาณ 200-2000 หน่วย (Wurzburg, 1972) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ดี เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ชจนเม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่ โมเลกุลอะมิโลสละลายออกมาจากเม็ดสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชมีความหนืดต่ำ เมื่อเย็นตัวลงเกิดการกั้นตัวมาก โมเลกุลของอะมิโลสรวมตัวกัน เมื่อขย้อมสีด้วยน้ำยาไอโอดีน สีของสตาร์ชเป็นสีน้ำเงิน (Blue)

อะมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์ที่มีกิ่งสาขามาก หน่วยกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α D(1 $\rightarrow$ 4)-glucosidic และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาเชื่อมด้วยพันธะ α D(1 $\rightarrow$ 6)-glucosidic แต่ละสาขาประกอบด้วย AUG ประมาณ 15-25 หน่วย (Wurzburg, 1972) เนื่องจากอะมิโลเพกตินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และมีสาขามาก ดังนั้นโอกาสที่โมเลกุลจับกันเองจึงน้อยลง เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลเพกตินสูง สตาร์ชเปียกที่ได้ไม่มีสี และมีความหนืดสูง เมื่อลดอุณหภูมิลงโมเลกุลอยู่ใน

แบบระกระระกะจึงรวมตัวกันยากและคืนตัวน้อย (Donald, 2004) เมื่อขย้อมสีด้วยน้ำยาไอโอไดน สีของสตาร์ชเป็นสีน้ำตาลแดง (Red brown)

2.1.3.2 โปรตีน

โปรตีนเป็นองค์ประกอบที่มีมากเป็นอันดับสองในเมล็ดข้าว ประมาณ 6-9% ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ข้าวกล้องมีปริมาณโปรตีนมากกว่าข้าวขาวเล็กน้อย เนื่องจากโปรตีนอยู่หนาแน่นบริเวณผิวนอกของเมล็ด โปรตีนอยู่ในรูปเม็ดโปรตีน (Protein body) และอยู่รวมกันเป็นกลุ่มแทรกตัวอยู่ระหว่างองค์ประกอบของแป้ง (Kang et al., 2006) โปรตีนในข้าวประกอบด้วยอัลบูมิน (Albumin) โกลบูลิน (Globulin) โปรลามิน (Prolamin) และ กลูทีลิน (Glutelin) ข้าวมีโปรตีนกลูทีลินอยู่ประมาณ 80% ของโปรตีนทั้งหมด โกลบูลินประมาณ 10% อัลบูมินประมาณ 5% และโปรลามินไม่เกิน 5% (Hoseney, 1998) โปรตีนช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเมล็ดข้าวโดยการยึดเหนี่ยวองค์ประกอบภายในสตาร์ช



(a) Low-magnification TEM

(b) High-magnification TEM

TEM = Transmission Electron Microscopy, AL = aleurone cells, AS = air space, Cw = cell wall, Li = lipid bodies, Pb = protein bodies, Pb-I = prolamin, Pb-II = glutelin, St = starch granules

รูปที่ 2.6 ชั้นอดูโรน ชั้นเอนโดสเปิร์ม และองค์ประกอบของโปรตีนและไขมันในเมล็ดข้าวเหนียว (Kang et al., 2006)



2.1.3.3 ไขมัน

ไขมันเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวเพียงเล็กน้อย ประมาณ 3% ส่วนใหญ่อยู่ในชั้นอดูโรนจึงพบในข้าวกล้องมากกว่าข้าวขาว ไขมันที่พบส่วนมากเป็นไขมันเกาะเกี่ยว (Bound lipid) กับสารอื่น ไขมันมีความสัมพันธ์กับเม็คสตาร์ช 3 ลักษณะคือ ไขมันอยู่ชิดกันกับโปรตีน ซึ่งอยู่ที่ผิวเม็คสตาร์ช ภายนอกหรืออาจรวมอยู่กับโครงสร้างของอะมิโลเพกตินสายนอก ลักษณะที่สองคือไขมันอยู่ภายใน เม็คสตาร์ช โดยเกาะเกี่ยวกับสตาร์ช และลักษณะที่สามคือไขมันที่อยู่ภายในสตาร์ชแต่ไม่เกาะเกี่ยวกับ สตาร์ช (รูปที่ 2.6)

2.2 การอบแห้ง

การอบแห้งคือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายโอนความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่ เช่น ข้าว มีความชื้นค่อนข้างสูงขณะทำการเก็บเกี่ยว ทำให้เก็บรักษาไม่ได้นาน การอบแห้งช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลิตผลได้เป็นระยะเวลายาวนานขึ้น (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

นอกจากนี้การอบแห้งยังช่วยให้เกษตรกรสามารถเก็บเกี่ยวเมื่อเมล็ดยังมีความชื้นสูงอยู่ ทำให้ลดการสูญเสียของเมล็ดพืชอันเนื่องจากการร่วงหล่นก่อน ระหว่างและหลังเก็บเกี่ยว การเก็บเกี่ยวที่เร็วขึ้นอาจช่วยให้เกษตรกรสามารถปลูกพืชครั้งที่สองอย่างได้ผล การอบแห้งที่ถูกหลักยังสามารถช่วยให้เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดสูง ทำให้สามารถนำไปเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมล็ดพืชที่อบแห้งแล้วมีคุณภาพสูงและ สามารถเก็บรักษาได้นาน ทำให้เกษตรกรสามารถรอเวลาขายในขณะที่ผลิตผลมีราคาดี (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

2.2.1 พื้นฐานการอบแห้งวัสดุ

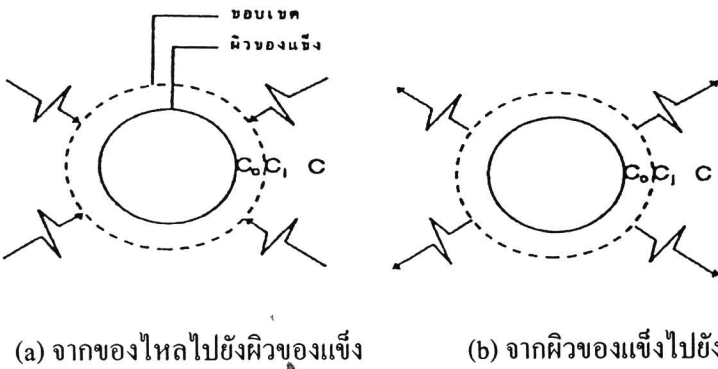
ในการอบแห้งวัสดุทั่ว ๆ ไปนั้น มักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทจากกระแสน้ำอากาศไปยังผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำ โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิวโดย Capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงผิว (Surface force) ในขณะเดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิววัสดุมายังกระแสน้ำอากาศโดยการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor diffusion) และความดันไอ (Partial pressure of vapor)

ที่แตกต่างระหว่างไอน้ำในวัสดุกับลมร้อน ถ้าผิวของวัสดุมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความชื้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ถ้าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็ว ของลมร้อนมีค่าคงที่ และเมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมาก อุณหภูมิและความชื้นของไอน้ำที่บริเวณผิวของวัสดุย่อมเปลี่ยนไป โดยที่อุณหภูมิจะสูงขึ้นและความชื้นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่อยู่ระหว่างการอบแห้งด้วยอัตราคงที่ และอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤติ อัตราการอบแห้งจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งไม่เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำ จะเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับความชื้นสมดุล (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

หลักการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปมีทฤษฎีการถ่ายโอนมวลและทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นดังนี้

2.2.1.1 ทฤษฎีการถ่ายโอนมวล (Mass Transfer)

สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ (2540) อธิบายทฤษฎีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างผิวของแข็งและของไหล สรุปได้ว่าปริมาณการถ่ายเทขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ของความเข้มข้นของสาร ซึ่งที่ใดมีมวลมากกว่าก็สามารถกระจายหรือเดินทางไปยังที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การแพร่ของมวลระหว่างผิวของแข็งและของไหล (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

รูปที่ 2.7a แสดงลักษณะของมวลของไหลไปเกาะติดอยู่บนผิวของเม็ดของแข็งขณะที่ของไหลไหลผ่านเม็ดของแข็ง ที่ความเร็วขนาดหนึ่ง ของไหลมีการไหลอย่างเป็นระเบียบบริเวณใกล้เคียงกับเม็ดของแข็ง บริเวณนี้มีชั้นขอบเขตซึ่งหนาน้อยเท่าไรขึ้นอยู่กับขนาดความเร็วของไหลที่ไหลผ่านเข้ามาภายในอาณาบริเวณขอบเขตนี้ การถ่ายโอนมวลสารเป็นไปอย่างช้าๆ และมีขนาดเท่ากับการฟุ้งกระจายของโมเลกุล

นอกเหนือจากชั้นขอบเขตแล้ว การถ่ายโอนมวลสารมีลักษณะการพามวลแบบกำลังบังคับ (Forced convection mass transfer) ความเข้มข้นของสารในกระแสของไหล (C) ต้องสูงกว่าความเข้มข้นที่ขอบเขต (C_i) และความเข้มข้นที่ขอบเขตต้องสูงกว่าความเข้มข้นที่ผิวของเม็ดของแข็ง (C_0) ในทางตรงกันข้าม ถ้ามวลจากของแข็งละลายหรือแพร่กระจายในกระแสของไหล (ดังรูปที่ 2.7b) ค่า C_0 ย่อมสูงกว่าค่า C_i และค่า C_i ย่อมสูงกว่าค่า C

การถ่ายเทของมวลสารที่ผิวของเม็ดของแข็งที่เป็นแบบการฟุ้งกระจายของโมเลกุล สามารถคำนวณได้จากสมการของ Fick คือ

$$N_A = -D_{AB}A \frac{dC_A}{dx} \tag{2.1}$$

- เมื่อ N_A = ปริมาณของมวลสารที่เกิดจากการถ่ายเท
- D_{AB} = สัมประสิทธิ์ของการฟุ้งกระจาย
- A = พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งและของไหล
- C_A = ความเข้มข้นของมวลสาร A
- x = ระยะที่มวลสารเคลื่อนที่ไป

การถ่ายโอนมวลสารแบบใช้กำลังบังคับระหว่างขอบเขตจำกัดกับกระแสของการไหล ของระบบที่มวลจากของแข็งละลายหรือแพร่กระจายไปในกระแสของไหล เขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$N_A = h_m A (C_{AS} - C_A) \tag{2.2}$$

- เมื่อ h_m = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล
- C_{AS} = ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิ่มตัว

เมื่อระบบอยู่ในสมดุล ปริมาณมวลสารในสมการที่ (2.1) เท่ากับปริมาณมวลสารในสมการที่ (2.2) จะได้ว่า

$$h_m A (C_{AS} - C_A) = -D_{AB}A \frac{dC_A}{dx}$$

เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง D_p และจัดเทอมใหม่ได้ดังนี้

$$h_m \frac{D_p}{D_{AB}} = - \left(\frac{dC_A}{dx} \right) / \left(\frac{(C_{AS} - C_A)}{D_p} \right) \tag{2.3}$$

เทอม $h_m \frac{D_p}{D_{AB}}$ เรียกว่า ตัวเลขเชอร์วูด (Sherwood number) สำหรับความเข้มข้นของสาร A ใน กระแสของไหลนั้นขึ้นอยู่กับขนาดการไหลของของไหลและสมบัติทางกายภาพของระบบทั้งหมด เมื่อกระจายออกไปสามารถแสดงในเทอมของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) และตัวเลขชมิค (Schmid number) จากการศึกษาดูการวิเคราะห์เทอมที่ไม่มีหน่วย มักได้รูปแบบความสัมพันธ์ของ ตัวเลขต่างๆ ดังนี้

$$Sh = Sh_o + a Re^m Sc^n \tag{2.4}$$

เมื่อ Sh_o = ค่าของตัวเลขเชอร์วูดที่เกิดจากการถ่ายเทแบบการฟุ้งกระจายของโมเลกุล อย่างเดียว

2.2.1.2 ทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer)

ในขณะที่มีการถ่ายโอนมวลสาร การถ่ายโอนความร้อนอาจเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งทฤษฎีการถ่ายเท ความร้อนสรุปได้ว่า ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิ จากรูปที่ 2.7a ถ้าของไหลที่บริเวณขอบเขตมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณผิวของเม็คของแข็ง ความร้อนจะถ่ายเทจาก บริเวณขอบเขตสู่บริเวณผิวของเม็คของแข็ง การถ่ายโอนความร้อนบริเวณผิวของของแข็งเป็นแบบ การนำความร้อน ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Fourier คือ

$$q = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \tag{2.5}$$

เมื่อ q = อัตราการถ่ายโอนความร้อน
 k = สภาพการนำความร้อนของของไหล
 T = อุณหภูมิของของไหล

การถ่ายโอนความร้อนแบบใช้กำลังบังคับระหว่างขอบเขตจำกัดกับกระแสของไหลของระบบที่ ความร้อนจากของแข็งถูกพาไปในกระแสของไหล เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$q = h_c A (T_\infty - T_s) \tag{2.6}$$

เมื่อ h_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
 T_s = อุณหภูมิที่ผิวของเม็คของแข็ง
 T_∞ = อุณหภูมิของกระแสของไหล

เมื่อระบบอยู่ในสมดุล และสมมติว่ามีการแผ่รังสีน้อยมาก อัตราการถ่ายโอนความร้อนในสมการที่ (2.5) และ สมการที่ (2.6) มีค่าเท่ากัน ได้ว่า

$$h_c A(T_\infty - T_s) = -kA\left(\frac{dT}{dx}\right) \tag{2.7}$$

เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง และจัดเทอมใหม่ ได้ดังนี้

$$h_c \frac{D_p}{k} = -\left(\frac{dT}{dx}\right) \left(\frac{(T_\infty - T_s)}{D_p}\right) \tag{2.8}$$

เทอม $h_c \frac{D_p}{k}$ เรียกว่า ตัวเลขนัสเซิล (Nusselt number) สำหรับอุณหภูมิในกระแสน้ำไหลขึ้นอยู่กับขนาดการไหลของของไหลและสมบัติทางกายภาพของระบบทั้งหมด เมื่อกระจายออกไปสามารถแสดงในเทอมของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) และตัวเลขเพรอนเทิล (Prandtl number) จากการศึกษาโดยการวิเคราะห์เทอมไม่มีหน่วย มักได้รูปแบบความสัมพันธ์ของตัวเลขต่างๆ ดังนี้

$$Nu = Nu_o + a Re^m Pr^n \tag{2.9}$$

เมื่อ Nu_o = ค่าของตัวเลขนัสเซิลที่เกิดจากการถ่ายเทแบบการนำเพียงอย่างเดียว

2.2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกและอากาศที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

2.2.2.1 ความหนาแน่นของข้าวเปลือก (Density)

ความหนาแน่นของข้าวเปลือกมี 2 ชนิด คือ ความหนาแน่นจริง (True density) และความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) ความหนาแน่นจริงหมายถึงอัตราส่วนของมวลวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุ ส่วนความหนาแน่นปรากฏ หมายถึง อัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรทั้งหมดซึ่งรวมปริมาตรของเมล็ดวัสดุและปริมาตรอากาศที่แทรกตัวอยู่ตามช่องว่าง นิยมใช้กับวัสดุที่กองรวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก สัดส่วนช่องว่างอากาศ ความหนาแน่นจริง และความหนาแน่นปรากฏมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_b}{\rho_t}\right) \tag{2.10}$$

เมื่อ ε = สัดส่วนช่องว่างอากาศ, เศษส่วน
 ρ_b = ความหนาแน่นปรากฏ, kg/m³

ρ = ความหนาแน่นจริง, kg/m³

โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจริงและความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นวัสดุ อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$\rho = a + bM_d \tag{2.11}$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่น, kg/m³
 M_d = ความชื้นวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 a, b = ค่าคงที่

ค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศขึ้นอยู่กับความชื้นเมล็ดพืชในลักษณะเชิงเส้นเช่นเดียวกับความหนาแน่น ดังสมการ

$$\varepsilon = a + bM_d \tag{2.12}$$

ชอบ ลายทอง (2530) ได้ทำการทดลองหาค่าคงที่ (a และ b) เพื่อหาความหนาแน่นปรากฏและสัดส่วนช่องว่างอากาศ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ a และ b สำหรับคำนวณหาความหนาแน่นปรากฏและสัดส่วนช่องว่างอากาศ (ชอบ ลายทอง, 2530)

เมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือก	ความหนาแน่นปรากฏ		ค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศ	
	a	b	a	b
ข้าวเปลือกพันธุ์ กข7	552	282	62.3	-25.0
ไม่คิดอิทธิพลของพันธุ์ข้าว	551.6	311	62.1	-25.0

2.2.2.2 ความร้อนจำเพาะของข้าวเปลือก (Specific Heat)

ความร้อนจำเพาะหมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศา ที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ ค่าความร้อนจำเพาะในผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับความชื้นในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งความร้อนจำเพาะของข้าวเปลือกเสนอโดย Brooker et al. (1992) ดังสมการต่อไปนี้

$$c_p = 1110 + 44.8M_w \tag{2.13}$$

เมื่อ c_p = ความร้อนจำเพาะของข้าวเปลือก, J/kg K

M_w = ความชื้นวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานเปียก

2.2.2.3 ค่าการนำความร้อนของข้าวเปลือก (Thermal Conductivity)

สมการในการหาค่าการนำความร้อนของข้าวเปลือก นำเสนอ โดย Brooker et al. (1992) ดังนี้

$$k_p = 0.0863 + 0.00134M_w$$
 (2.14)

เมื่อ k_p = ค่าการนำความร้อนของข้าวเปลือก, W/m K

2.2.2.4 เส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดข้าวเปลือก (Equivalent Diameter)

Varnamkhasti et al. (2008) นำเสนอการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดข้าวเปลือก ดังสมการ

$$D_p = \left(L \left(\frac{W + T}{4} \right)^2 \right)^{1/3}$$
 (2.15)

เมื่อ D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดข้าวเปลือก, m
 L = ความยาวของเมล็ดข้าวเปลือก, m
 W = ความกว้างของเมล็ดข้าวเปลือก, m
 T = ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก, m

2.2.2.5 ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent Heat of Vaporization)

ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของข้าวเปลือก นำเสนอ โดย Mujumdar (1995) ดังสมการ

$$h_{fg} = (2502 - 2.386T_p)(1 + 2.496\exp(-21.733M_p)) \times 10^3$$
 (2.16)

เมื่อ h_{fg} = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของเมล็ดข้าวเปลือก, J/kg
 T_p = อุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดข้าวเปลือก, °C
 M_p = ความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดข้าวเปลือก, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

2.2.2.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Diffusion Coefficient)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT_p}\right)$$
 (2.17)

เมื่อ D_{eff} = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่เวลาใดๆ, m²/s

D_0	=	ค่าคงที่, m^2/s
E_a	=	พลังงานกระตุ้น, $kJ/kmol$
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 kJ/kmol
T_p	=	อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก, K

2.2.2.7 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและมวล (Heat and Mass Transfer Coefficient)

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer coefficient) ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคฟลูอิดเซชัน เป่าอากาศร้อนให้แก่เมล็ดข้าว ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาขึ้นที่ผิวเมล็ด หาได้จาก สมการของ Kunii and Levenspiel (1991) ดังนี้

$$h_c = \frac{Nu k_a}{D_p} \tag{2.18}$$

เมื่อ	h_c	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2\text{ K}$
	Nu	=	ตัวเลขนัสเซิล, ไร้หน่วย
	k_a	=	การนำความร้อนของอากาศอบแห้ง, $W/m\text{ K}$
	D_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดข้าวเปลือก, mm

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Mass transfer coefficient) ดังนี้

$$h_m = \frac{Sh D_w}{D_p} \tag{2.19}$$

เมื่อ	h_m	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล, m/s
	Sh	=	ตัวเลขเชอร์วูด, ไร้หน่วย
	D_w	=	Binary diffusion coefficient, m^2/s
	D_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดข้าวเปลือก, m

2.2.2.8 ตัวเลขไร้หน่วย (Dimensionless)

ตัวเลขไร้หน่วยที่ใช้ในสมการคำนวณ มีดังนี้

$$Re = \frac{\rho_a v_a D_p}{\mu_a} \tag{2.20}$$

เมื่อ	Re	=	ตัวเลขเรย์โนลด์, ไร้หน่วย
-------	------	---	---------------------------

- ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศอบแห้ง, kg/m^3
- v_a = ความเร็วของอากาศอบแห้ง, m/s
- D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดข้าวเปลือก, m
- μ_a = ความหนืดของอากาศอบแห้ง,

$$\text{Pr} = \frac{c_a \mu_a}{k_a}$$

(2.21)

- เมื่อ
- Pr = ตัวเลขพริ้นเทิล, ไร้หน่วย
 - c_a = ความร้อนจำเพาะของอากาศอบแห้ง, kJ/kg K
 - μ_a = ความหนืดของอากาศอบแห้ง, kg/m s
 - k_a = ค่าการนำความร้อนของอากาศอบแห้ง, W/m K

$$\text{Sc} = \frac{\mu_a}{\rho_a D_w}$$

(2.22)

- เมื่อ
- Sc = ตัวเลขชมิค, ไร้หน่วย
 - μ_a = ความหนืดของอากาศ, kg/m s
 - ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศอบแห้ง, kg/m^3
 - D_w = Binary diffusion coefficient, m^2/s

2.2.2.9 สมบัติของอากาศที่ใช้ออบแห้ง (Properties of Air)

ค่าสมบัติของอากาศหาได้จากสมการต่อไปนี้ (Mujumdar, 1995; Pakowski et al., 1991)

$$k_a = 2.425 \times 10^{-2} + 7.889 \times 10^{-5} T - 1.790 \times 10^{-8} T^2 - 8.570 \times 10^{-12} T^3$$

(2.23)

$$c_a = 1.00926 \times 10^3 - 4.0403 \times 10^{-2} T + 6.1759 \times 10^{-4} T^2 - 4.097 \times 10^{-7} T^3$$

(2.24)

$$\mu_a = 1.691 \times 10^{-5} + 4.984 \times 10^{-8} T - 3.187 \times 10^{-11} T^2 + 1.319 \times 10^{-14} T^3$$

(2.25)

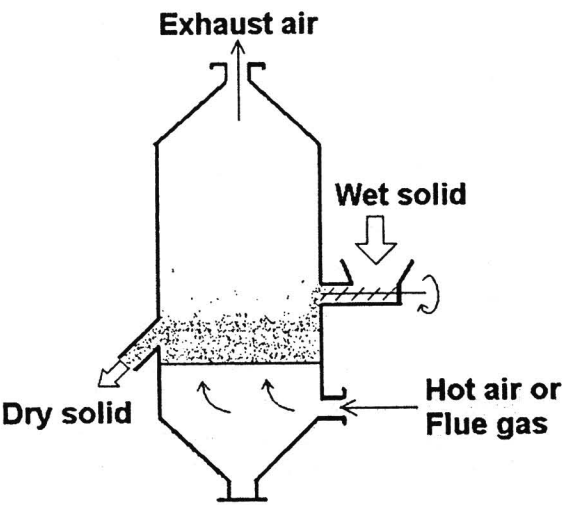
$$\rho_a = 101.325 / (0.287 T_{\text{abs}})$$

(2.26)

- เมื่อ
- k_a = ค่าการนำความร้อนของอากาศที่ใช้ออบแห้ง, W/m K
 - c_a = ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ใช้ออบแห้ง, kJ/kg K
 - μ_a = ความหนืดของอากาศที่ใช้ออบแห้ง, kg/m s
 - T = อุณหภูมิอากาศที่ใช้ออบแห้ง, $^{\circ}\text{C}$
 - T_{abs} = อุณหภูมิอากาศที่ใช้ออบแห้งสัมบูรณ์, K

2.2.3 การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดิเซชัน (Fluidization Technique)

ฟลูอิดิเซชันเป็นกระบวนการที่ของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นชิ้นสัมผัสกับของไหลแล้ว เม็ดของแข็งนั้นมีสมบัติคล้ายของไหล เริ่มต้นจากการวางเม็ดของแข็งไว้บนตะแกรงหรือตัวกระจายในหอทดลอง แล้วให้ของไหลที่เป็นก๊าซหรือของเหลวไหลผ่านขึ้นไปทางด้านล่างของตะแกรงหรือตัวกระจายที่รองรับและไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็งออกทางส่วนบนของหอทดลอง ความเร็วของไหลมากขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวลอยไปพร้อมกับของไหล และแยกตัวเป็นอิสระไม่เกาะติดกันพฤติกรรมของเม็ดของแข็งในลักษณะนี้มีสมบัติคล้ายของไหล จึงเรียกของแข็งในสภาวะนี้ว่า ฟลูอิดิเซชัน ของไหลที่ใช้ถ้าเป็นของเหลวเรียกว่า ฟลูอิดิเซชันของเหลว และถ้าเป็นก๊าซเรียกว่า ฟลูอิดิเซชันก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดิเซชันเบด (Law and Mujumdar, 2004)

2.2.3.1 ประเภทของฟลูอิดิเซชัน

ฟลูอิดิเซชันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ฟลูอิดิเซชันสองสถานะ (Two-phase fluidization) หมายความว่า ในหอทดลองหรือเบดที่ใช้งานประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้น ฟลูอิดิเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ฟลูอิดิเซชันก๊าซ (Gas fluidization) และฟลูอิดิเซชันของเหลว (Liquid fluidization)
2. ฟลูอิดิเซชันสามสถานะ (Three-phase fluidization) หมายความว่า ภายในหอทดลองหรือเบดประกอบด้วยของสามสถานะอยู่ร่วมกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ สำหรับฟลูอิดิเซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นจากฟลูอิดิเซชันสองสถานะ

2.2.3.2 ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด

1. เนื่องจากวัสดุถูกทำให้ลอยตัวทำให้วัสดุภายในเบดมีโอกาสสัมผัสกับของไหลมากกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ผลที่ได้คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่ามาก ทำให้การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการอบแห้งจึงสูงกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ
2. การเคลื่อนที่ของวัสดุมีการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล จึงสามารถนำมาใช้ทำงานแบบต่อเนื่องได้
3. อุณหภูมิภายในเบดมีค่าคงที่ เนื่องจากการผสมผสานของวัสดุภายในเบดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
4. อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งชนิดอื่นๆ ทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นกว่าชนิดอื่นและสามารถเพิ่มอุณหภูมิของของไหลที่ใช้ออบได้สูงกว่าโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุ
5. วัสดุมีการผสมผสานกันระหว่างการอบแห้งทำให้คุณภาพของวัสดุหลังการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน

2.2.3.3 ข้อเสียของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด

1. มีฟองก๊าซเกิดขึ้นภายในเบดทำให้มีประสิทธิภาพในการสัมผัสระหว่างวัสดุกับอากาศไม่ดี
2. การทำงานมีข้อจำกัดในด้านความเร็วของอากาศที่ใช้ไม่สามารถเพิ่มหรือลดได้เนื่องจากอาจทำให้วัสดุหลุดลอยออกจากห้องอบแห้ง หรือไม่เกิดลักษณะของฟลูอิดไชน์ชัน
3. สามารถใช้งานได้ดีเฉพาะกรณีของวัสดุที่นำมาอบแห้งมีขนาดเล็กและไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากขนาดของวัสดุมีผลต่อความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไชน์ชัน
4. ใช้กับวัสดุที่เปราะหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะจะเกิดการเกาะกันเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

ในปัจจุบันนิยมอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด เนื่องจากเครื่องอบแห้งมีขนาดเล็กแต่สามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว โดยข้าวสัมผัสกับตัวกลางที่เป็นของไหลด้วยความเร็วสูง จนทำให้ข้าวขยับตัวได้อย่างอิสระมีสมบัติคล้ายของไหล ซึ่งของไหลที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้งมีทั้งไอน้ำร้อนขดบังและอากาศร้อน การศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบันดังนี้ Sutherland and Gholy (1990) ศึกษาความเป็นไปได้ของเทคนิคฟลูอิดไชน์ชันในการอบแห้งเพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกในช่วงความชื้นสูงให้ลดลงเหลือ 18% (w.b.) ด้วยอากาศร้อนโดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 40-90 °C อัตราการไหลของอากาศ 0.03 kg/s จากการทดลอง พบว่า สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 24% (w.b.) ลงเหลือ 18% (w.b.) ได้โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของข้าวในด้านร้อยละคั่วข้าว แต่ถ้าความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 18% (w.b.) มีผลทำให้ร้อยละคั่วข้าวลดลง ควรใช้การอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดในการอบแห้งข้าวเปลือกในช่วงแรกที่ข้าวเปลือกมีความชื้นสูง Soponronnarit and Prachayawarakorn (1994) พบว่า การอบแห้ง

ข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้อากาศร้อนนั้น ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไชน์ (U_{mf}) เท่ากับ 1.5 m/s ต่อมาได้มีการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดอุณหภูมิ 140-150 °C โดย Taweerattanapanish et al. (1999) พบว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นระหว่าง 30 ถึง 42.8% (d.b.) เมื่อผ่านการอบแห้งแล้ว ร้อยละต้นข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีการเป่าด้วยลมธรรมชาติ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากบางส่วนของแป้งเกิดเจลาทิไนเซชัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Inprasit and Noomhorm (2001) พบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด มีแป้งบางส่วนภายในเมล็ดที่เกิดเจลาทิไนเซชัน และข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีลักษณะคล้ายข้าวหนึ่ง

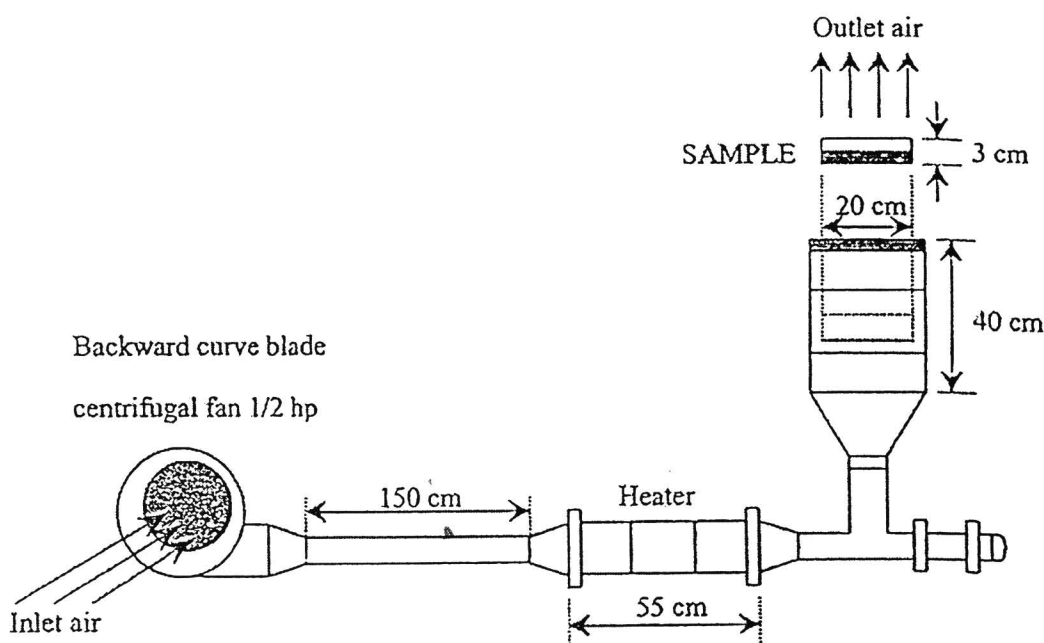
2.2.4 การเก็บในที่อับอากาศ (Tempering)

การเก็บในที่อับอากาศ (Tempering) เป็นการนำเมล็ดที่ผ่านการอบแห้งหรือแช่น้ำไปได้ช่วงหนึ่งนำมาพักไว้ในที่อับอากาศเพื่อให้ความชื้นกระจายสม่ำเสมอทั่วเมล็ด สำหรับการอบแห้งเป็นการแพร่ความชื้นจากภายในมายังผิวของเมล็ด ส่วนการแช่น้ำเป็นการแพร่ความชื้นจากภายนอกที่ผิวเมล็ดเข้ามายังใจกลางของเมล็ด เป็นการลดเกรเดียนต์ความชื้น (Moisture gradient) ภายในเมล็ด หลักการของการเก็บในที่อับอากาศ คือต้องการให้ความชื้นกระจายตัวออกมาที่ผิวของเมล็ดเพื่อให้สามารถเป่าลมลดความชื้นได้ง่าย (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และคณะ, 2541)

สำหรับการอบแห้งด้วยฟลูอิดไชน์เบดรวมกับการเก็บในที่อับอากาศนั้น มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาผ่านมาดังนี้ ความสูงของเบดในเครื่องฟลูอิดไชน์เบดที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกคือ 9.5 cm ห้องอบรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm ปริมาณข้าวที่ใช้แต่ละครั้งในห้องอบประมาณ 2 kg (ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2540) เหตุผลของการเก็บในที่อับอากาศคือการลดความชื้นในช่วงการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งน้อยเพราะต้องการลดความชื้นลงจาก 22% (w.b.) เป็น 19% (w.b.) ดังนั้นเมล็ดข้าวที่ผ่านการอบแห้งจึงมีความแตกต่างของความชื้นระหว่างใจกลางกับผิวนอกของเมล็ดค่อนข้างมาก จึงจำเป็นต้องมีการเก็บในที่อับอากาศเพื่อลดความแตกต่างของความชื้นดังกล่าวโดยให้ความชื้นในเมล็ดข้าวที่อยู่ภายในกระจายออกมา เช่นเดียวกับงานวิจัยของ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และคณะ (2541) กล่าวว่า การเก็บในที่อับอากาศเป็นการยืดเวลาให้ข้าวอยู่ในสภาพอุณหภูมิสูงเป็นผลให้มีเกรเดียนต์ความชื้นภายในเมล็ดข้าวน้อยกว่าข้าวเปลือกที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความเครียด (Stress) ภายในเมล็ดข้าวน้อยกว่าวิธีที่ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การแตกหักของเมล็ดข้าวมีย่าน้อยกว่า และเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อร้อยละต้นข้าว นอกเหนือจากความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก

2.2.5 การเป่าด้วยอากาศแวดล้อม

การเป่าด้วยอากาศแวดล้อมเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการอบแห้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกหลังจากการเก็บในที่อับอากาศลงเหลือประมาณ 16% (d.b.) เพื่อรักษาคุณภาพของข้าวเปลือกก่อนนำไปขัดสี ซึ่ง Soponronnarit (1987) แนะนำว่าการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมควรใช้อุณหภูมิประมาณ 30 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศระหว่าง 55-60% ด้วยเครื่องอบแห้งแบบชั้นบางเบดหนาประมาณ 3.5 cm ที่ความเร็วอากาศ 0.15 m/s จนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือประมาณ 16% (d.b.) เวลาที่ใช้ในการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมประมาณ 30-40 min สำหรับเครื่องเป่าอากาศแวดล้อมมีลักษณะดังรูปที่ 2.9 ประกอบด้วย พัดลมแบบใบพัดแรงเหวี่ยง โค้งหลังมีมอเตอร์ขนาด 0.75 kW เป็นตัวขับเคลื่อน มีวาล์วปีกผีเสื้อที่ตำแหน่งท่อทางออกหลังพัดลม และ ตรงท่อก่อนถึง Heater เพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศ ท่อทางเข้าห้องอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ห้องอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สูง 40 cm ข้าวเปลือกที่ผ่านการเก็บในที่อับอากาศแล้วนำมาใส่ในตระแกรงมุ้งลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm ขอบสูง 3 cm ก่อนทำการอบแห้งต่อไป



รูปที่ 2.9 เครื่องเป่าอากาศแวดล้อม (ฉัฐพล ภูมิสะอาด, 2540)

2.3 การเกิดเจลาคีโนเซชันและรีโทรกราเดชัน

การเกิดเจลาคีโนเซชัน (Gelatinization) ของแป้งเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียความเป็นระเบียบของโมเลกุลแป้ง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการอย่างไม่ผันกลับ เช่น การพองตัวของเม็ดแป้ง

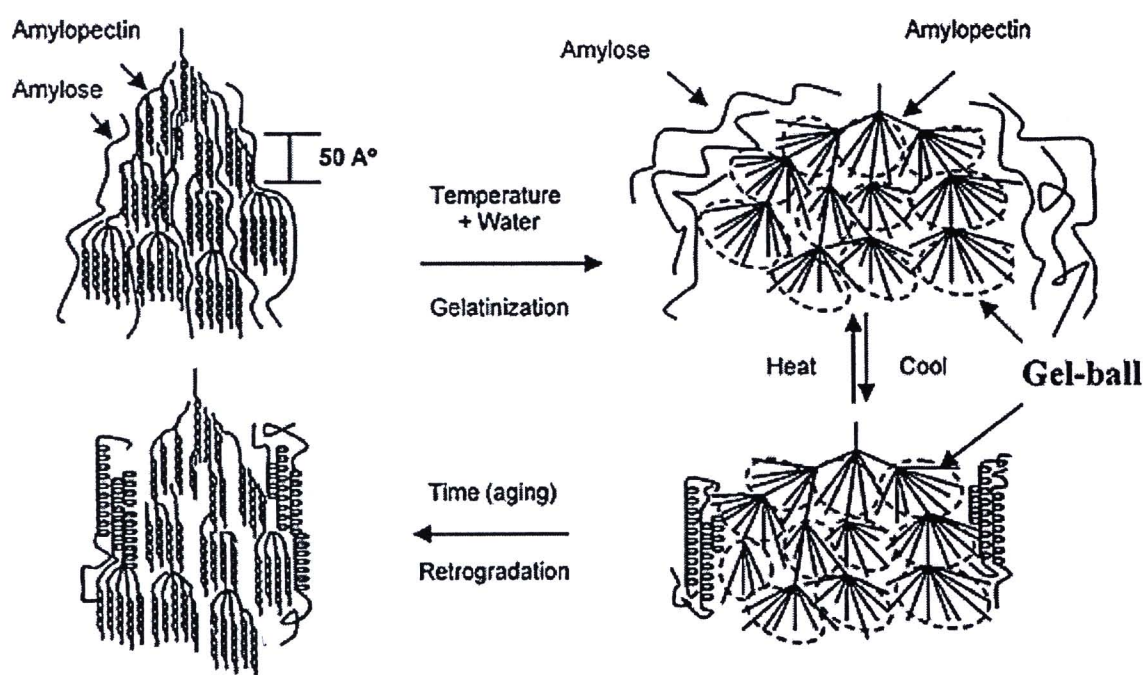
การหลอมเหลวของโครงสร้างผลึก (Native crystalline melting) การสูญเสียไบฟรินเจนซ์ (Birefringence) และความสามารถในการละลายของแป้ง (Atwell et al., 1988)

รูปที่ 2.10 เม็ดแป้ง (Starch granule) ดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อยเมื่อนำมาแช่น้ำเย็น แต่เมื่อให้ความร้อนกับเม็ดแป้งพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ภายในเม็ดแป้งจะค่อยๆ ถูกทำลาย เม็ดแป้งดูดน้ำได้มากขึ้นเรื่อยๆ เกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เม็ดแป้งพองตัวสูงสุดจนกระทั่งเม็ดแป้งแตก อะมิโลสที่อยู่ภายในสตาร์ชจะถูกชะออกมา เกิดโครงสร้างที่เป็นเจล (Gelling) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน (Liu et al., 2009; Donald, 2004) อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเรียกว่า อุณหภูมิเจลาติไนเซชันหรืออุณหภูมิแป้งสุก อุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวทั่วโลกรวมอยู่ระหว่าง 55-79 °C (Bello et al., 2006)

การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation) ของแป้งเกิดขึ้นหลังจากโมเลกุลของแป้งเกิดเจลาติไนเซชันแล้ว มารวมตัวกันอีกครั้งในลักษณะโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นผลมาจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ในระหว่างโมเลกุลหรือภายในโมเลกุลเอง เกิดโครงสร้างเป็นเกลียวในสถานะที่เหมาะสม มีผลทำให้เกิดผลึก

กลไกการเกิดรีโทรกราเดชันเป็นกระบวนการเกิดผลึกของแป้งที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้ว เมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะมิโลสและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของโมเลกุลอะมิโลสในน้ำแป้งจากเดิมที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ไปเป็นผลึก (Crystalline) (Eliasson and Gudmundsson, 1996) จากนั้น โมเลกุลของอะมิโลเพคตินจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงและจับกันเป็นผลึก การจับกันนี้มีผลทำให้น้ำที่เคยจับกันอยู่ก่อนตอนที่มีการสร้างร่างแหต้องถูกกำจัดออกไป ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างเจลมีการแยกน้ำ (Syneresis)

การเกิดรีโทรกราเดชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากการเกิดเจลาติไนเซชัน เมื่ออุณหภูมิลดลง ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงมีการเกิดรีโทรกราเดชันสูงกว่าข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ และการเกิดรีโทรกราเดชันมีผลทำให้น้ำในข้าวสุกมีความแข็งเพิ่มขึ้นและความเหนียวลดลง (Fan and Marks, 1998)



รูปที่ 2.10 การเกิดเจลลาตินในเซชันและการรีโทรกราเดชันของเม็ดแป้ง (Liu et al., 2009)

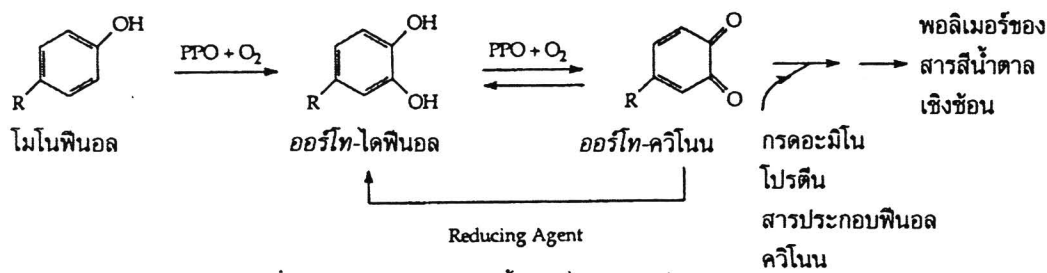


2.4 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning Reactions)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลมักเกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งวัสดุ ส่วนใหญ่แล้วไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค เพราะจะทำให้รสชาติไม่ดี และลักษณะภายนอกไม่น่าดู การเกิดสีน้ำตาลในอาหารมี 2 แบบ คือ เกิดจากปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้องเรียกว่า ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง (Enzymic browning reaction) และเกิดจากปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง เรียกว่า ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง (Nonenzymic browning reaction) (รัชณี ตันตะพานิชกุล, 2535)

2.4.1 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง

เมื่อผลไม้และผักมีรอยดำหนิหรือเสียหายซึ่งเกิดจากรอยชำ รอยปอก หั่น แฉ่แข็ง หรือเป็นโรค ส่วนของเนื้อเยื่อที่มีดำหนิ ทำให้เกิดปฏิกิริยาของสารประกอบโมโนฟีนอลที่อยู่ในเซลล์พืชสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศและมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันได้เป็นออร์โท-ไดฟีนอล (O-diphenol) สารนี้จะถูกออกซิไดส์ต่อไปเป็นออร์โท-ควิโนน (O-quinone) ควิโนนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO นี้จะรวมตัวกันและเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดกับสารประกอบฟีนอลอื่น ๆ หรือกับกรดอะมิโนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล ดังรูปที่ 2.11

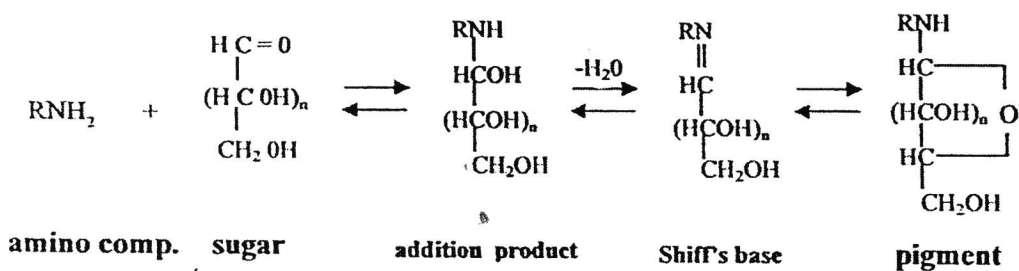


รูปที่ 2.11 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO (นิธิยา รัตนูปนันท, 2545)

2.4.2 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง

การเกิดปฏิกริยาสีน้ำตาลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ปฏิกริยาคาราเมลไลเซชัน (Caramelization) เป็นการให้ความร้อนสลายโมเลกุลของน้ำตาลให้แยกออก (Thermolysis) และเกิดพอลิเมอร์ไลเซชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาล ปฏิกริยานี้มีสารเริ่มต้นเป็นน้ำตาลเท่านั้น เช่นการเผาน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิ 200 °C น้ำจะถูกกำจัดออกไปจากโมเลกุลของน้ำตาลซูโครสโดยปฏิกริยาดีไฮเดรชัน สารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่จะมีพันธะคู่ และเป็นวงแหวน (Anhydro ring) มีความขุ่นหนืด มีรสขม และมีสีเข้มขึ้น ซึ่งจะผันแปรตามระยะเวลาและระดับอุณหภูมิที่ใช้
2. ปฏิกริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เป็นปฏิกริยาที่เกิดจาก Carbonyl group ของน้ำตาลทำปฏิกริยากับ Amino compound ดังนี้



รูปที่ 2.12 การเกิด Pigment สีน้ำตาลในปฏิกริยาเมลลาร์ด (นิธิยา รัตนูปนันท, 2545)

สารสี (Pigment) ที่เกิดขึ้นคือ N-substituted glycosylamine หรือ เมลาโนดินิน (Melanodinin) ซึ่งเป็นสารสีน้ำตาลที่เกิดในอาหาร โดยอัตราการเกิดสีน้ำตาลเมลาโนดินิน (Melanodinin) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ Carbonyl group ที่รวมกับ Amino compound ถ้า Carbonyl group ของน้ำตาลถูกขัดขวางจะไม่ทำปฏิกริยากับ Amino compound สารสีน้ำตาลก็ไม่เกิดขึ้น

2.5 คุณภาพของข้าวเหนียว

คุณภาพของข้าวเหนียวทำการวิเคราะห์ 2 รูปแบบคือ ส่วนที่ 1 ในรูปของเมล็ด ได้แก่ ร้อยละต้นข้าว สมบัติด้านแสงสี โครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติด้านการหุงต้ม สมบัติด้านเนื้อสัมผัส สมบัติด้านการย่อยและดูดซึม และ การทดสอบด้านประสาทสัมผัส ในส่วนที่ 2 วิเคราะห์ในรูปของแป้ง ได้แก่ สมบัติด้านความหนืด สมบัติทางความร้อน สมบัติด้านสภาพเป็นผลึก และ Chain length distribution

2.5.1 การวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าวเหนียว

การวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าวเหนียว ได้แก่ ร้อยละต้นข้าว สมบัติด้านแสงสี โครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติด้านการหุงต้ม สมบัติด้านเนื้อสัมผัส สมบัติด้านการย่อยและดูดซึม และ การทดสอบด้านประสาทสัมผัส รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

2.5.1.1 ร้อยละต้นข้าว

ร้อยละต้นข้าวเป็นตัวบ่งบอกคุณภาพการสี (Milling quality) ซึ่งเป็นคุณภาพทางกายภาพที่สำคัญในการกำหนดราคาข้าว โดยดูจากปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (Whole grain) และต้นข้าว (Head rice) โดยข้าวที่มีคุณภาพการสีดีเป็นข้าวที่เมื่อผ่านการขัดสีแล้วได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวสูง มีปริมาณข้าวหัก (Broken rice) น้อย ในการสีข้าวเป็นการทำให้เปลือก รำ และคัพพะออกจากเมล็ดข้าว โดยเริ่มจากการกะเทาะ (Hulling) ทำให้เปลือกข้าวหลุดออกจากเมล็ดได้เกลบและข้าวกลิ้ง จึงนำไปทำการขัดขาว (Whitening) เพื่อให้รำหลุดจากเมล็ดข้าวกลิ้งจนกลายเป็นข้าวสาร โดยทั่วไปการสีข้าวจะได้เกลบ 20-30% รำ 8-11% และส่วนที่เหลือคือข้าวสารประมาณ 66-72% ของข้าวเปลือก (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) จากนั้นข้าวสารที่ได้จากการขัดขาวจะถูกนำไปคัดแยก (Grading) เพื่อแยกข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหักขนาดต่างๆ ออกจากกัน ปริมาณของแต่ละส่วนมีมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับคุณภาพข้าวเปลือกก่อนนำมาสี

วิธีการคำนวณหาร้อยละต้นข้าวมีดังนี้

ร้อยละต้นข้าว

=

น้ำหนักต้นข้าว × 100

น้ำหนักของข้าวเปลือก

(2.27)

$$\text{ร้อยละข้าวหัก} = \frac{(\text{น้ำหนักของข้าวสาร} - \text{น้ำหนักต้นข้าว}) \times 100}{\text{น้ำหนักของข้าวเปลือก}} \tag{2.28}$$

$$\text{ร้อยละรำ} = \frac{(\text{น้ำหนักของข้าวกล้อง} - \text{น้ำหนักข้าวสาร}) \times 100}{\text{น้ำหนักของข้าวเปลือก}} \tag{2.29}$$

$$\text{ร้อยละแกลบ} = \frac{(\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง}) \times 100}{\text{น้ำหนักของข้าวเปลือก}} \tag{2.30}$$

2.5.1.2 สมบัติด้านแสงสี (Optical Property)

สี แสดงถึงคุณภาพของอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรโดยตรง เป็นปัจจัยที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อคุณภาพการยอมรับหรือไม่ยอมรับของผู้บริโภค ถ้าสีของอาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรผิดปกติ ผู้บริโภคส่วนใหญ่จะไม่ยอมรับ และอาจจะไม่คำนึงถึงคุณภาพด้านอื่นต่อไป เช่น กลิ่น รสชาติ หรือ เนื้อสัมผัส

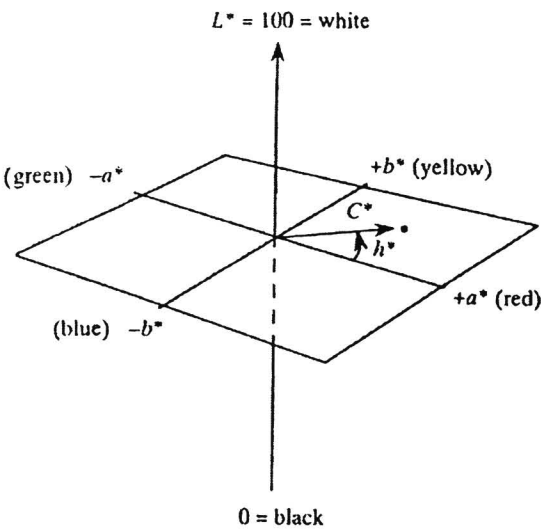
สีเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนออกมาจากวัตถุ และต้องอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 380-770 nm มนุษย์จึงสามารถมองเห็นได้ โดยทั่วไปการวัดสีทำได้โดยใช้ตาของมนุษย์ (Subjective measurement) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดค่าสีที่มีความไวสูงสุด สามารถแยกแยะสีได้มากที่สุด แต่มนุษย์ไม่สามารถจดจำและอธิบายค่าสีที่เห็นให้เข้าใจตรงกันได้จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดค่าสี (Objective measurement) ออกมาในเชิงปริมาณ เพื่อให้เข้าใจตรงกันอย่างถูกต้องและเที่ยงตรง

ระบบการวัดสีที่นิยม มี 3 ระบบ ได้แก่ ระบบ Munsell ระบบ CIE และระบบ Hunter สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ระบบ Hunter ในการทดสอบ โดยบอกค่าสีเป็น L , a และ b (รูปที่ 2.13)

โดย L ใช้กำหนดค่าความสว่าง, $L = 0$ แสดงว่ามีมืดที่สุด, $L = 100$ แสดงว่าสว่างที่สุด

a ใช้กำหนดสีแดง หรือสีเขียว, a เป็น + แสดงความเป็นสีแดง, a เป็น - แสดงความเป็นสีเขียว

b ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน, b เป็น + แสดงความเป็นสีเหลือง, b เป็น - แสดงความเป็นสีน้ำเงิน



รูปที่ 2.13 แผนภาพสีระบบ Hunter (MacDougall, 2002)

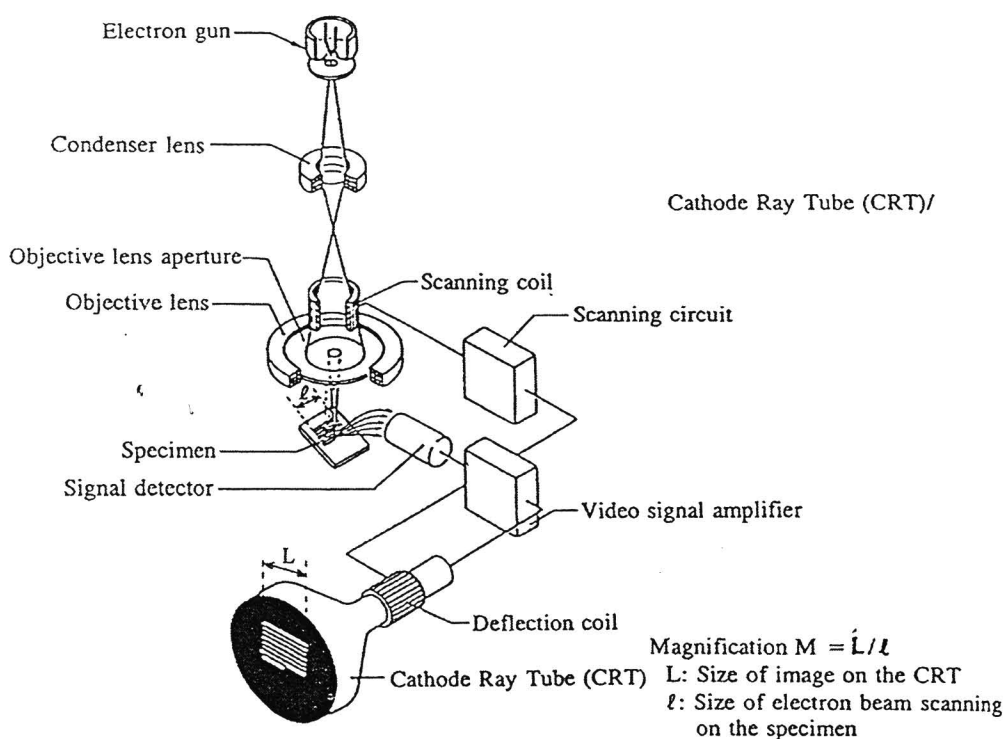
สำหรับการหาดัชนีความขาวซึ่งส่วนใหญ่ใช้เป็นมาตรฐานการกำหนดคุณภาพของเมล็ดข้าว (Whiteness Index: WI) จากความสัมพันธ์ของ L , a และ b แสดงดังสมการที่ 2.31 (Chen et al., 1999)

$$WI = 100 - [(100-L)^2 + a^2 + b^2]^{0.5} \tag{2.31}$$

2.5.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเครื่อง SEM

การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดข้าวเหนียวด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) มีหลักการทำงานดังนี้ แหล่งกำเนิดแสงเป็นอิเล็กตรอน (Electron gun) ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในสภาพสุญญากาศ เพื่อให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงและมีพฤติกรรมคล้ายคลื่นแสง สามารถบังคับให้คลื่นอิเล็กตรอนมีขนาดความยาวคลื่นที่สั้นมากๆ ได้ เช่น ถ้าใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอน 20 kV จะได้ลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นประมาณ 0.08 °A เป็นต้น เลนส์รวมแสง (Condenser lens) และเลนส์ใกล้วัตถุเป็นระบบเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้าทำหน้าที่ในการบีบลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวย (Electron probe) ที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ให้โฟกัสลงบนตัวอย่าง จากนั้นลำแสงรูปกรวยจะถูกบังคับด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชุดควบคุมการสแกน (Scanning coil) ให้เคลื่อนไปบนผิวตัวอย่าง ในแนวแกนนอนและแกนตั้งเป็นพื้นที่ที่สเลียมผืนผ้าคล้ายระบบสแกนของโทรทัศน์ ในขณะที่ขั้วกันสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น เมื่อลำแสงรูปกรวยเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างจะถูกรวบรวมโดยอุปกรณ์วัดสัญญาณ (Collector & scintillator) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วผ่านท่อนำแสง (Light pipe) ไปยังเครื่องขยายแสง (Photomultiplier tube) ถูก

ส่งต่อไปยังหลอดภาพปรากฏเป็นสัญญาณภาพขึ้นบนจอรับภาพ (Cathode Ray Tube, CRT) ลำแสงที่กราดเป็นเส้นบนจอรับภาพจะเคลื่อนไปในทิศทางและเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอนที่ส่องกราดไปบนผิวตัวอย่างซึ่งถูกควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า (รุจิพร ประทีปเสน, 2538)



รูปที่ 2.14 การคำนวณกำลังขยายของ SEM (รุจิพร ประทีปเสน, 2538)

กำลังขยายของ SEM (Magnification, M) คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดความกว้างของเส้นสแกนบนจอรับภาพ (L) กับขนาดความกว้างของเส้นสแกนบนพื้นผิวตัวอย่าง (l) ดังรูปที่ 2.14 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M = \frac{L}{l} \quad (2.32)$$

2.5.1.4 สมบัติด้านการหุงต้ม (Cooking Property)

สมบัติด้านการหุงต้มข้าวเหนียวได้แก่ ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water uptake) และ ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ (Solid loss) เป็นปัจจัยที่สำคัญทำให้ลักษณะของข้าวเหนียวสุกมีความแตกต่างกัน Bean et al. (1984) ศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวเหนียว 3 พันธุ์ ได้แก่ Ampec, Calmochi-202 และ Mochigome โดยแช่เมล็ดข้าวเหนียวที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลาการแช่ 0.25, 0.5, 1, 2, 3, และ 16 h พบว่า ที่ระยะเวลาการแช่น้ำเท่ากัน ปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเหนียวทั้งสามพันธุ์มีค่า

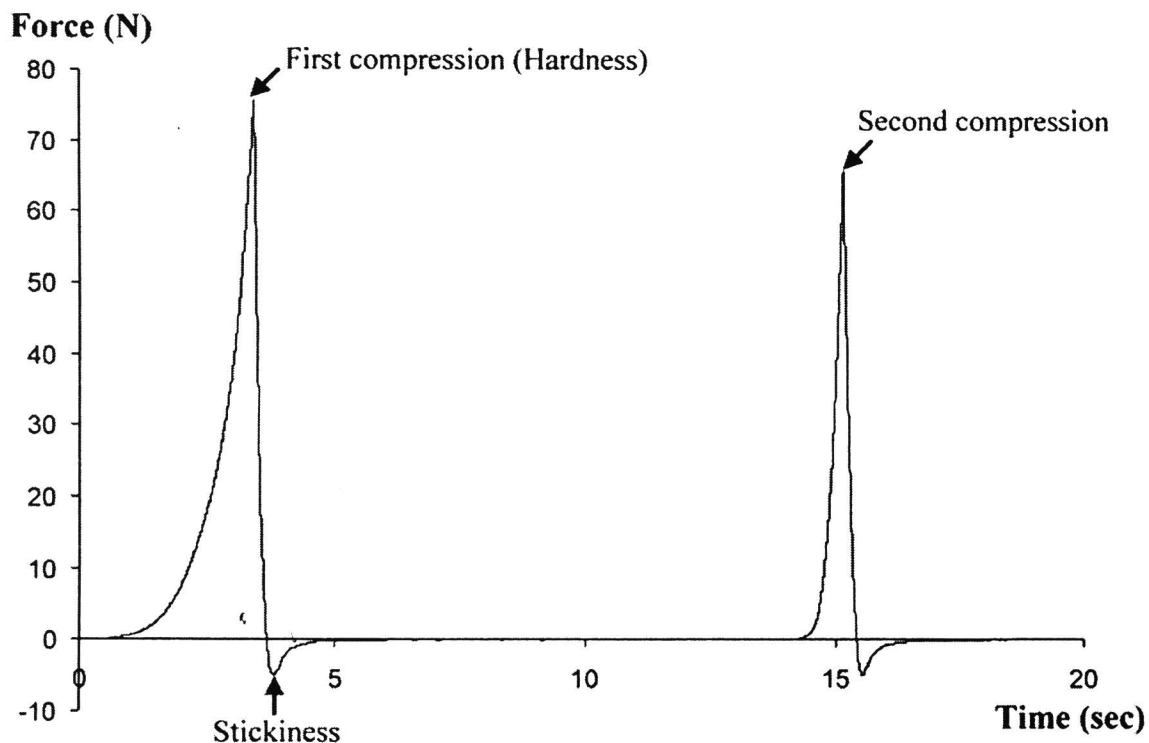
ใกล้เคียงกับปริมาณการดูดซับน้ำในเมล็ดข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการแช่ข้าวนานขึ้น และระยะเวลาของการแช่สำหรับการดูดซับน้ำจนเมล็ดข้าวเหนียวอิ่มตัวคือระยะเวลาการแช่ตั้งแต่ 3 h ขึ้นไป จากงานวิจัยของ Chiang and Yeh (2002) พบว่า เมล็ดข้าวดูดซึมน้ำเข้าไปจนอิ่มตัวที่ระดับความชื้นประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเปียก เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิ 105 ด้วยเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดอุณหภูมิสูง (130-150 °C) ทำให้ข้าวหอมมะลิ 105 มีปริมาณการดูดซับน้ำในขณะหุงต้มมากขึ้นแต่ปริมาณของแข็งละลายในน้ำลดลง (Soponronnarit et al., 2008)

2.5.1.5 สมบัติด้านเนื้อสัมผัส (Textural Properties)

สมบัติด้านเนื้อสัมผัสเป็นสิ่งที่สำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกประกอบด้วยสมบัติ 2 ประการคือ ความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Stickiness) โดยที่ความแข็งหมายถึงสมบัติในการต้านทานแรงที่มากระทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ส่วนความเหนียวหมายถึงสมบัติในการเกาะกันระหว่างเมล็ดข้าว ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวสุกมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวเหนียว ได้แก่ ปริมาณอะมิโลส ปริมาณโปรตีน อุณหภูมิแป้งสุกและความชื้นในเมล็ดข้าว (Ong and Blanshard, 1995; Martin and Fitzgerald, 2002) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ฤดูกาล อายุการเก็บเกี่ยว บรรพบุรุษและอุณหภูมิการเก็บรักษา

วิธีการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกมี 2 แบบ คือ วิธีวัดโดยตรง (Objective measurement) และวิธีวัดโดยอ้อม (Subjective measurement) วิธีการวัดโดยตรงเป็นการวัดโดยอาศัยเครื่องมือวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร เช่น เครื่อง Texture analyzer ส่วนการวัดโดยอ้อมเป็นการทดสอบคุณภาพด้านประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) โดยอาศัยมนุษย์เป็นเครื่องมือในการวัด

การทดสอบสมบัติด้านเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture analyzer โดยใช้ Texture profile analysis ให้กราฟที่มีลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.15 กราฟความแข็งแรงและความเหนียวของข้าวสุกโดยใช้เครื่อง Texture analyzer

ค่าความแข็งแรงของข้าวสุกคือค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการกดเมล็ดข้าวในครั้งแรก ส่วนความเหนียวของข้าวสุกคือแรงสูงสุดจากการดึงหัวกดขึ้นในครั้งแรก ดูรูปที่ 2.15

2.5.1.6 สมบัติด้านการย่อยและดูดซึม (Starch Digestibility)

ตัวชี้วัดที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์สมบัติด้านการย่อยและดูดซึมของอาหารคือ ค่าไกลซีมิก (Glycemic Index: GI) หรือ ดัชนีน้ำตาลเป็นตัวบ่งบอกความสามารถในการย่อยสลายแป้งและจัดลำดับชั้นของอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ โดยค่า GI แปรผันตามระดับน้ำตาลในเลือดหลังจากบริโภคอาหารแต่ละชนิด อาหารที่มีผลทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นหลังจากบริโภค จะมีค่า GI สูง กล่าวคือเมื่อรับประทานอาหารที่มีดัชนีน้ำตาลสูง ระดับน้ำตาลในกระแสเลือดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอินซูลินที่ร่างกายผลิตออกมาเพื่อนำน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือด แต่ถ้ารับประทานอาหารที่มีดัชนีน้ำตาลระดับกลาง-ต่ำ ปริมาณอินซูลินจะเพิ่มในปริมาณที่น้อยและสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาลกลูโคส ค่า GI แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูงกว่า 70 จัดเป็นประเภทค่าดัชนีน้ำตาลสูง 50-69 จัดเป็นประเภทค่าดัชนีน้ำตาลปานกลาง และน้อยกว่า 50 เป็นประเภทค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ (Foster-Powell et al., 2002) สำหรับกรณีข้าวเหนียวจัดเป็นอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีดัชนีน้ำตาลสูง (ค่า GI มากกว่า 70) โดย Frei et al.

(2003) และ Hu et al. (2004) รายงานว่าข้าวเหนียวพันธุ์ Karaya และ ข้าวเหนียวพันธุ์ Yunuo No. 1 มีค่า GI เท่ากับ 109.2 และ 106.3 ตามลำดับ

2.5.1.7 การทดสอบด้านประสาทสัมผัส (Sensory Evaluation)

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสเป็นวิธีการทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้วัดค่าทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณเป็นการวิเคราะห์และแปลความรู้สึกลงทางประสาทสัมผัส ได้แก่ การมองเห็น การดมกลิ่น การรับรส การสัมผัส และการได้ยินของผู้ทดสอบ เพื่อนำมาประเมินการยอมรับในคุณลักษณะต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ สี ขนาด รูปร่าง ลักษณะปรากฏ ตาหืน กลิ่น รส และเนื้อสัมผัส การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสนี้ใช้ผลการประเมินจากมนุษย์ร่วมกับการใช้เทคนิคทางสถิติ โดยมีคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ เพื่อให้ได้ผลการประเมินที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น (เพ็ญขวัญ ชมปรีดา, 2550)

องค์ประกอบของการวิเคราะห์ลักษณะทางประสาทสัมผัสมี 4 ส่วนสำคัญคือ (เพ็ญขวัญ ชมปรีดา, 2550)

1. ข้อมูลเชิงคุณภาพของลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ หมายถึงลักษณะที่รับรู้ได้ด้วยประสาทสัมผัส เช่น ตา จมูก ลิ้น หู และผิวหนัง ซึ่งลักษณะเหล่านี้ประกอบด้วย
 - 1.1 ลักษณะที่เห็น (Appearance) ได้แก่ สีต่างๆ ซึ่งมีหลายมิติ เช่น ลักษณะสี ความสว่าง ความเข้ม ความสม่ำเสมอหรือผิวสัมผัส ซึ่งอาจจะมันวาว เรียบหรือขรุขระ หรือขนาดรูปร่างและการจับตัวของอนุภาค เป็นต้น
 - 1.2 กลิ่น (Aroma) เป็นลักษณะกลิ่นเฉพาะ เช่น กลิ่นหอมของดอกไม้ กลิ่นผลไม้ กลิ่นน้ำหอม และเป็นลักษณะที่ให้ความรู้สึกสัมผัสจมูก เช่น เย็น ชวน หรือแสบ เป็นต้น
 - 1.3 กลิ่นรส (Flavor) เป็นความรู้สึกละเอียดในปากในด้านรสทั้ง 4 ได้แก่ หวาน เปรี้ยว และขมหรือเผ็ด ความรู้สึกกลิ่นเฉพาะที่ได้รับจากปากเข้าสู่โพรงจมูก เช่น กลิ่นหอมต่างๆ กลิ่นหืน กลิ่นเหม็น และความรู้สึกละเอียดในปาก เช่น ร้อน เย็น เผ็ด และฉุน เป็นต้น
 - 1.4 เนื้อสัมผัส (Texture) เป็นความรู้สึกที่ผิวสัมผัสในปากในลักษณะทางกลของผลิตภัณฑ์เช่น แข็ง ชุ่มชื้น-หนืด ลักษณะทางเรขาคณิตของผลิตภัณฑ์ เช่น ขนาด รูปร่าง และการเกาะตัวของอนุภาคในผลิตภัณฑ์ เช่น เป็นทรายละเอียด เป็นชิ้น แผ่นและเกล็ด และลักษณะความเปียกหรือความเป็นมันของผลิตภัณฑ์ เช่น มัน เลี่ยน นุ่ม และแห้ง เป็นต้น
2. ปริมาณหรือความเข้ม (Intensity) ของผลิตภัณฑ์มีค่าเชิงปริมาณตามสเกลมาตรฐานของข้อกำหนดในแต่ละวิธี ซึ่งสเกลที่นิยมใช้ได้แก่ สเกลแบ่งชั้น (Category scaling) สเกลความชอบ (Hedonic scale) สเกลเชิงเส้นตรง (Linear scaling) เป็นต้น

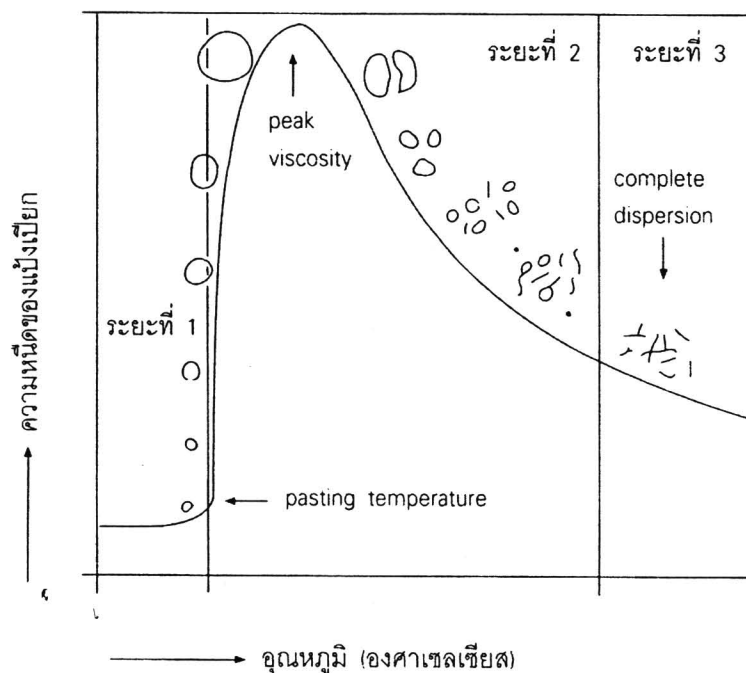
3. ลำดับการรับรู้ (Order of perception) เป็นลำดับก่อนหลังที่ผู้ประเมินรับรู้ ก่อน ขณะ และหลังการชิมตัวอย่าง ซึ่งเป็นความรู้สึกที่หลงเหลือหลังการชิม เช่น ขมติดคอ หรือ หวานติดปาก เป็นต้น
4. ความรู้สึกรวม (Overall impression) เป็นความรู้สึกของผู้ประเมินหลังการทดสอบ แบ่งเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้
 - 4.1 ความเข้มของกลิ่นหรือกลิ่นรสรวม หมายถึงกลิ่นหรือกลิ่นรวมที่แสดงออกมาในผลิตภัณฑ์ ส่วนนี้เป็นส่วนที่ผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้โดยตรง
 - 4.2 ความสมดุลหรือการผสมเป็นเนื้อเดียว หมายถึงความสมดุลของคุณลักษณะต่างๆ ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งบางครั้งผลิตภัณฑ์อาจมีกลิ่นหรือกลิ่นรสบางอย่างที่เป็นลักษณะเด่นออกมา

2.5.2 การวิเคราะห์คุณภาพแป้งข้าวเหนียว

การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวเหนียวในรูปของแป้ง ได้แก่ สมบัติด้านความหนืด สมบัติทางความร้อน และสมบัติด้านสภาพเป็นผลึก และ Chain length distribution

2.5.2.1 การวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

เครื่อง RVA เป็นเครื่องวิเคราะห์ความหนืดของตัวอย่างที่มีเม็ดแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีหลักการวัดค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเครื่องทำให้ส่วนผสมของตัวอย่างกับน้ำได้รับความร้อนจนเกิดความหนืด ในขณะที่ร้อนขึ้นด้วยอัตราการระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสม่ำเสมอจนถึงอุณหภูมิสูงสุด (ประมาณ 95 °C) จากนั้นคงอุณหภูมิที่สูงสุดนี้ไว้ระยะเวลาหนึ่ง เพื่อวัดความคงทนของความหนืดต่อแรงเฉือนของเครื่อง และต่อมาจึงตรวจสอบค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเครื่องทำให้ส่วนผสมเย็นลงในอัตราการระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่ลดลง (ประมาณ 50 °C) ความเปลี่ยนแปลงของความหนืดทั้ง 3 ระยะ เป็นผลของลักษณะทางเคมีกายภาพของตัวอย่างที่ปรากฏเป็นความหนืดนั่นเอง สมบัติทางด้านความหนืดของแป้งซึ่งแสดงด้วยกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA แสดงดังรูปที่ 2.16

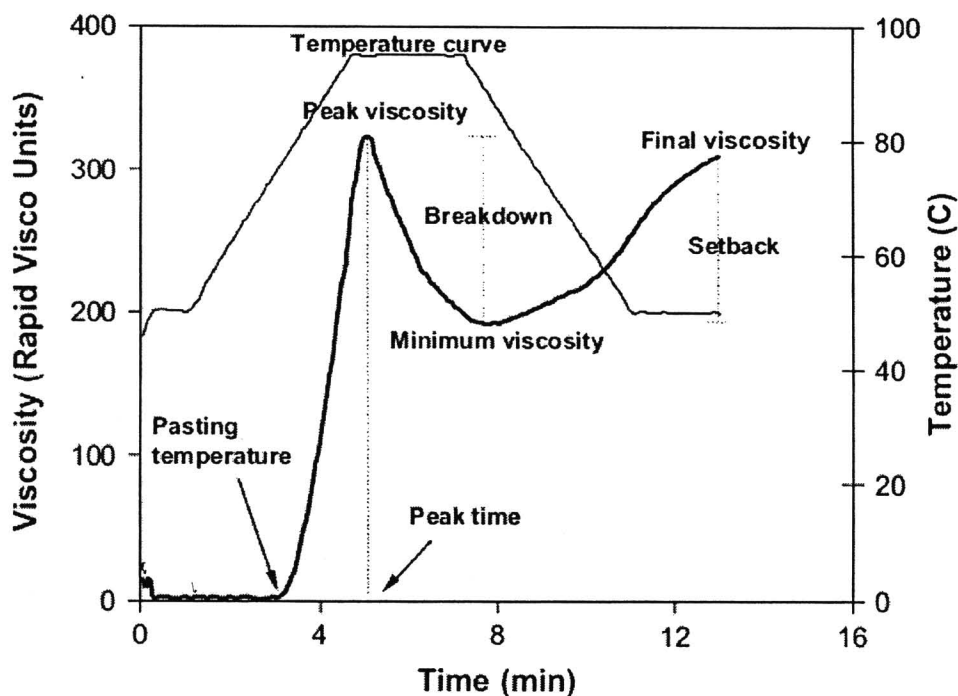


รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้ง

(กล้านรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

ผลที่อ่านได้จากการวิเคราะห์เส้นกราฟมีดังนี้

1. Peak Time = เวลาที่เกิด Peak ของความหนืด มีหน่วยเป็น min
2. Peak Viscosity = ความสามารถในการพองตัวของแป้งเมื่อสุก (ความหนืดทำให้เกิดค่า Peak มีหน่วยเป็น RVU (Rapid Visco Unit))
3. Pasting temperature = อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดหรืออุณหภูมิที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVA ใน 20 s มีหน่วยเป็น °C
4. Peak Temperature = อุณหภูมิที่เกิด Peak มีหน่วยเป็น °C
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



รูปที่ 2.17 กราฟความหนืดของแป้งข้าวโดยใช้เครื่อง RVA (Copeland et al., 2009)

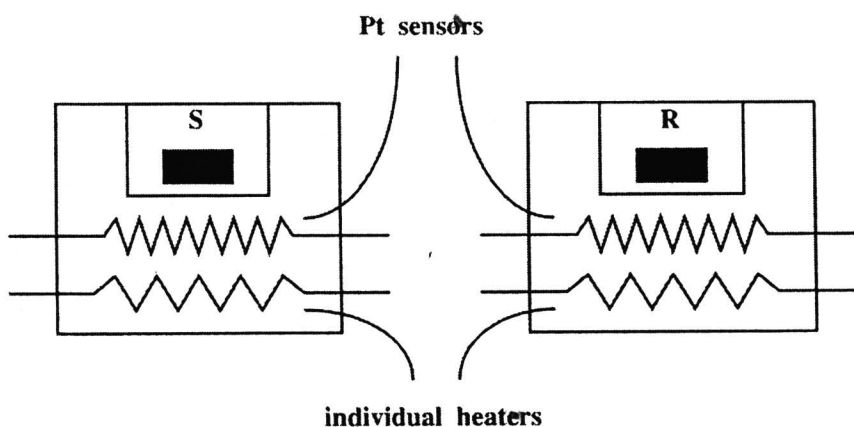
งานวิจัยที่ทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อสมบัติด้านความหนืดมีดังนี้

Wu et al. (2002) ทำการศึกษาผลของการใช้รังสีแกมมา (Gamma irradiation) ที่ระดับ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 kGy ต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวพันธุ์ Yunuo No. 1 (ปริมาณอะมิโลส 1.4%) และข้าวพันธุ์อื่นๆที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน (ปริมาณอะมิโลสระหว่าง 13.1-26%) จากผลการทดลอง พบว่าเส้นกราฟของความหนืด (Pasting curve) ของแป้งข้าวทุกพันธุ์ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีแกมมามีค่าต่ำกว่าเส้นกราฟความหนืดของข้าวอ้างอิง (ไม่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีแกมมา) และเส้นกราฟความหนืดของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีแกมมามีค่าลดลงเมื่อระดับรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น โดยระดับการให้ความร้อนด้วยรังสีแกมมาขนาด 1.0 kGy มีเส้นกราฟความหนืดต่ำที่สุด การศึกษาผลของการให้ความร้อนโดยใช้รังสีแกมมาต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวพันธุ์ Taichung waxy 70 (TCW 70) ได้ทำการทดสอบโดย Sung et al. (2008) ใช้ระดับรังสีแกมมาตั้งแต่ 0.1-2 kGy พบว่าการใช้รังสีแกมมาในการให้ความร้อนแก่แป้งข้าวเหนียวตั้งแต่ระดับ 0.5 kGy ขึ้นไปทำให้ความหนืดสูงสุด และ Setback ของแป้งข้าวเหนียวมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ความหนืดสุดท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิเริ่มเกิดการหนืดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแป้งข้าวเหนียวอ้างอิง เมื่อเปรียบเทียบระดับการใช้รังสีแกมมาตั้งแต่ 0.5-2 kGy ที่มีต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียว พบว่าการใช้ระดับรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวเหนียวมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ Setback, ความหนืดสุดท้าย

ละอุณหภูมิเริ่มเกิดการหนืดไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับตัวอย่างแป้งข้าวเหนียวที่ให้ความร้อนที่ระดับรังสีแกมมาต่ำกว่า การที่ความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวเหนียวมีค่าลดลงหลังจากผ่าน รให้ความร้อนโดยใช้รังสีแกมมา เป็นเพราะเม็ดแป้งเกิดเจลาทิไนเซชันบางส่วนทำให้ความสามารถ ในการพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อสุกลดลง นอกจากการให้ความร้อนด้วยรังสีแกมมาที่มีผลต่อสมบัติด้าน ความหนืดของข้าวแล้ว ยังมีการให้ความร้อนวิธีอื่นได้แก่ การใช้ไมโครเวฟซึ่ง Anderson and Guraya (2006) ได้ทำการทดสอบสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ไมโครเวฟ (Microwave) ในการให้ความร้อนเป็นเวลา 60 min พบว่าความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการให้ความร้อน ด้วยไมโครเวฟลดลงจาก 255.3 RVU (ข้าวเหนียวอ้างอิง) เป็น 81.8 RVU และมีความแตกต่างอย่างมี ัยสำคัญ สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซชันอุณหภูมิสูง (130-150 °C) ได้มี การศึกษาโดย Taechapairoj et al. (2004) และ Jaisut et al. (2008) พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำ ให้ความหนืดสูงสุดลดลงแต่ setback เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง การเพิ่มขึ้นของ Setback เป็นตัว บ่งบอกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงมีความแข็งของข้าวสุกเพิ่มขึ้น

5.2.2 การวิเคราะห์การเกิดเจลาทิไนเซชันของข้าวโดยใช้เครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimeter)

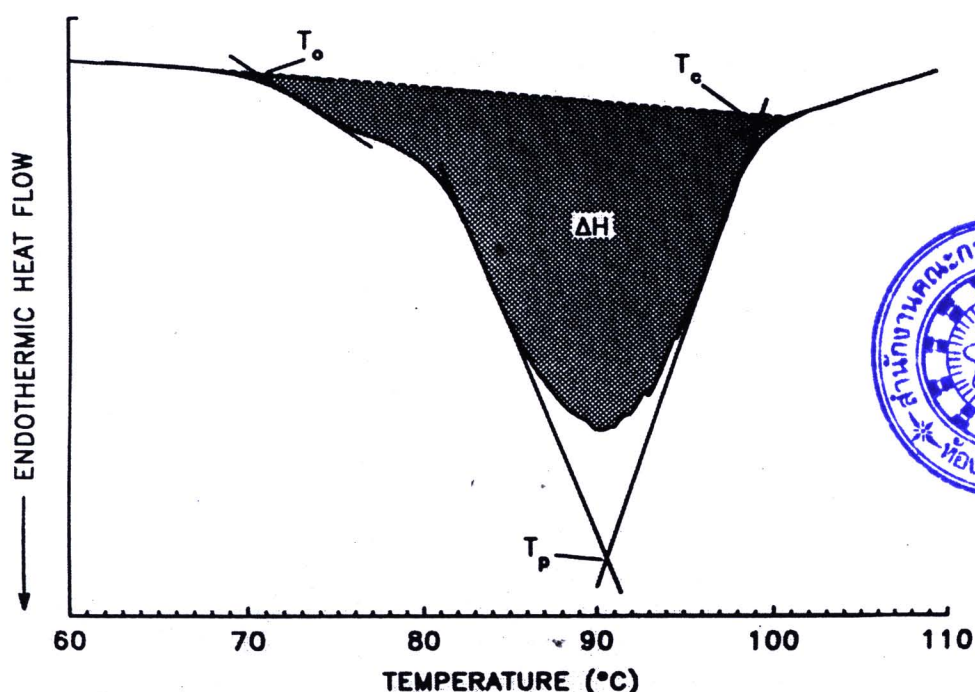
การตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลาทิไนเซชันนอกจากการสังเกตการเปลี่ยนโครงสร้าง Birefringence ภายใต้อกล้องจุลทรรศน์ เช่น Kofler gelatinization temperature range แล้วสามารถตรวจสอบโดย เครื่องมือวัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) อาศัยหลักการที่ว่า ทั้งตัวอย่างและสารอ้างอิงต้องคงอยู่ที่ อุณหภูมิเดียวกับกระบวนการให้ความร้อนหรือทำให้เย็นลงในอัตราที่กำหนดไว้ค่าหนึ่ง ดังแสดงใน รูปที่ 2.16



รูปที่ 2.18 หลักการวัดด้วยเครื่อง DSC (กล้านรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

ปริมาณความร้อนจะไหลเข้าสู่ระบบไปยังตัวอย่าง (Sample) หรือสารอ้างอิง (Reference) เพื่อพยายามรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิของตัวอย่างและสารอ้างอิงให้เป็นศูนย์ ($T_s - T_R = 0$) ปริมาณความร้อนดังกล่าวถูกบันทึกเป็นฟังก์ชันกับเวลาหรืออุณหภูมิ ใช้ขดลวดความร้อน (Heater) เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างและสารอ้างอิง (ระหว่างวงจรการให้ความร้อน) เพื่อรักษาความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างตัวอย่างและสารอ้างอิงให้เป็นศูนย์ สัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของกำลัง (Power) ซึ่งป้อนให้กับขดลวดความร้อนทั้งสองจะบันทึกเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิเพื่อที่อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องสามารถทำการวัดได้ (กล้านรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

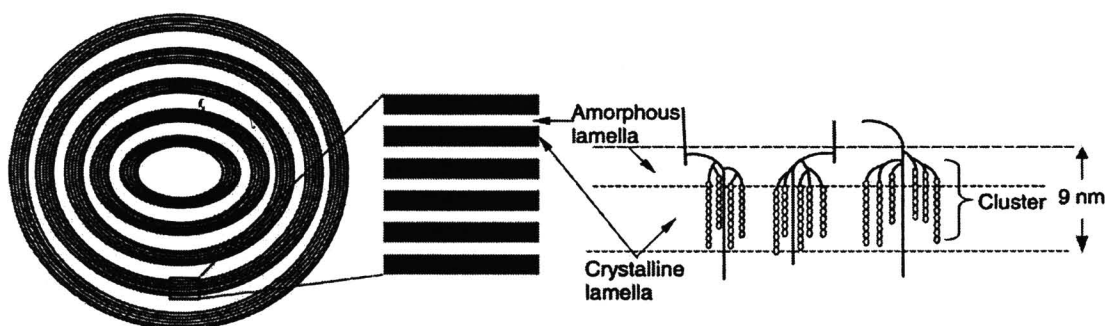
ปกติเครื่อง DSC จะวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุ พอลิเมอร์ต่างๆ ในรูปผลึก (Crystalline) และอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน แบ่งก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) ที่สูงมากประมาณ 160-200 °C แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปประมาณ 70 ส่วนหรือมากกว่า อุณหภูมิของการหลอมละลายของแป้งจะลดลง การเกิดเจลาทิไนเซชันแบ่งเป็น 3 ช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงลักษณะ (Onset temperature) อุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Peak temperature) และอุณหภูมิสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลง (Conclusion temperature) จะได้ Thermogram ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง Heat flow และ อุณหภูมิ สำหรับพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (ΔH , J/g) คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้งตัวอย่าง ตัวอย่างกราฟที่ได้จากเครื่อง DSC แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของแป้ง (Marshall and Wadsworth, 1994)

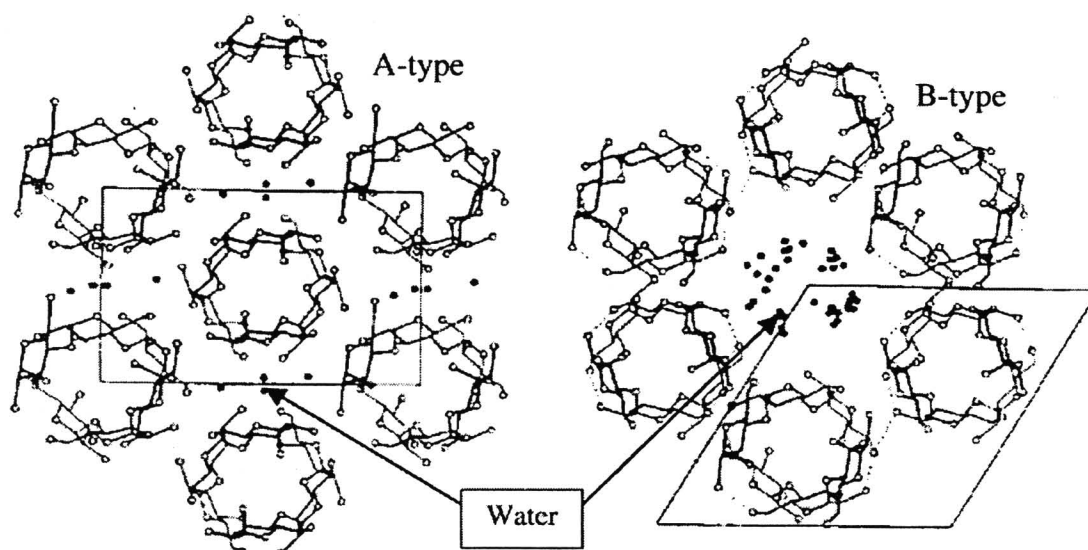
2.5.2.3 สมบัติด้านสภาพเป็นผลึกของเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi crystalline) โดยลักษณะความเป็นผลึกเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่ใน โมเลกุลของอะมิโลเพกตินในแนวรัศมีเป็นชั้นๆ ในรูปของคลัสเตอร์ (Cluster) ในแต่ละคลัสเตอร์ ประกอบด้วยบริเวณที่เป็นส่วนรวมของจุดที่แตกกิ่งมีลักษณะการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเรียกว่า Amorphous lamellar และบริเวณที่มีสายโซ่กิ่งของอะมิโลเพกตินที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ การจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ เรียกส่วนนี้ว่า Crystalline lamellar หนึ่งคลัสเตอร์มีขนาด 9 nm (Tester et al., 2004) ดังรูปที่ 2.20



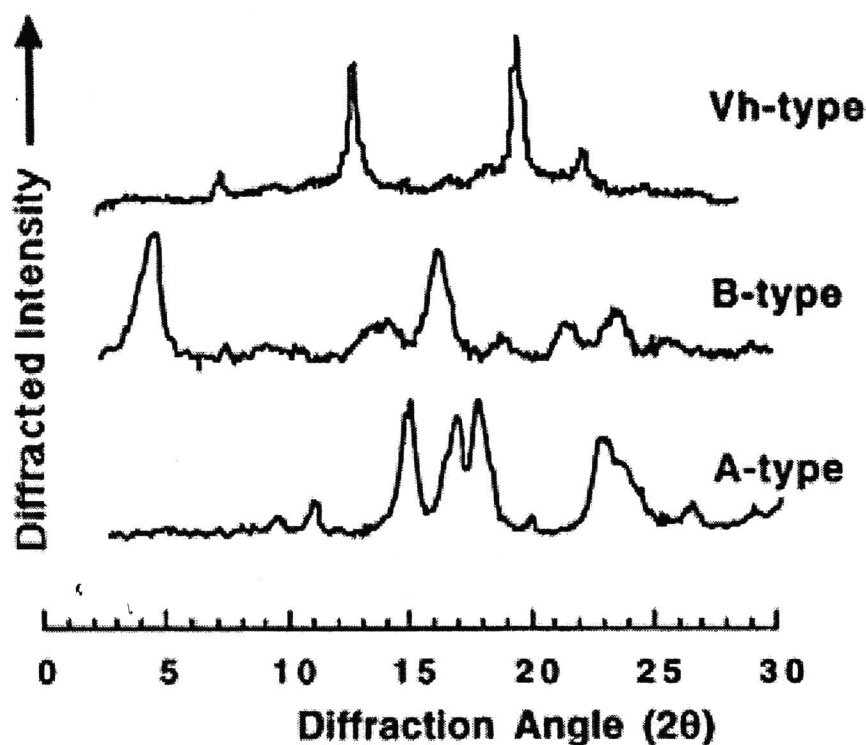
รูปที่ 2.20 โครงสร้างของเม็ดแป้ง (Tester et al., 2004)

เม็ดแป้งมีลักษณะ โครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่างๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ดังรูปที่ 2.21 ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) สารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วเช่น ไขมัน มีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V



รูปที่ 2.21 ผลึกของสตาร์ชแบบ A และ B (Tester et al., 2004)

โครงสร้างของผลึกที่ต่างกันทำให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแป้งได้โดยเทคนิค Wild angle X-ray diffraction (WAXS) แป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันให้รูปแบบของ X-ray diffraction ต่างกันดังรูปที่ 2.22 แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ให้พีคที่ 17° และ 18° และพีคเดี่ยวที่ 15° และ 23° แต่ไม่มีพีคที่ 5.6° แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวเจ้า มีลักษณะผลึกแบบ A แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B ให้พีคที่ 5.6° และ 17° แต่ไม่มีพีคที่ 18° และมีพีคคู่ (Double) ที่ 22° และ 24° ซึ่งได้แก่ แป้งจากพืชหัวและแป้งที่มีอะไมโลสสูง เช่น มันฝรั่ง เป็นต้น แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือ มีพีคที่ 5.6° และ 17.9° ตัวอย่างเช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว ราก ลำต้นและแป้งผลไม้บางชนิด แป้งบางชนิดอาจให้ลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลังซึ่งสามารถตรวจพบลักษณะผลึกทั้งแบบ A และ C

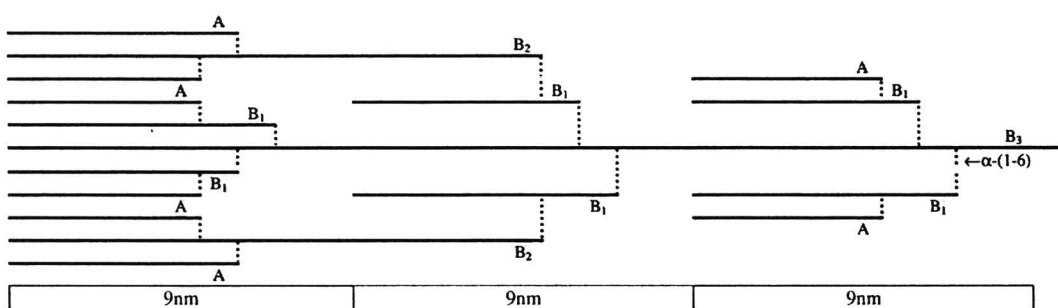


รูปที่ 2.22 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน (Buleon et al., 1998)

2.5.2.4 การกระจายสายโซ่ของอะมิโลเพกติน (Chain Length Distribution)

โครงสร้างแบบกิ่งของโมเลกุลอะมิโลเพกตินประกอบด้วยการจัดเรียงตัวกันเป็นความยาวสายโซ่ (Chain) ของกลูโคส แสดงดังรูปที่ 2.23 แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

1. สาย A (A-chain) มีจำนวนกลูโคส หรือ Degree of polymerization: $DP = 6-12$ โมเลกุล เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched structure)
2. สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ อีก 2 สายหรือมากกว่า มี 3 ชนิดคือ สาย B_1 ($DP = 13-24$), สาย B_2 ($DP = 25-36$) และ สาย B_3 chains ($DP \geq 37$)
3. สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ โดยโมเลกุลอะมิโลเพกตินแต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น



รูปที่ 2.23 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A และ B (Tester, 2004)