

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว (Rice)

ข้าวเป็นพืชตระกูลหญ้าที่สามารถปลูกได้ในหลายสภาพภูมิอากาศทั้งในเขตร้อน (tropical) และเขตอบอุ่น (sub-tropical) ของโลก ทั้ง *Oryza sativa* ที่ปลูกทั่วไปและ *Oryza glaberrima* ที่เจริญได้ในบางพื้นที่ของทวีปแอฟริกา เป็นพืชที่ใช้เป็นอาหารหลักของมนุษย์มาเป็นระยะเวลานาน ตามหลักฐานประวัติศาสตร์พบว่าได้มีการเพาะปลูกในแถบเอเชียใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มากกว่าสี่พันปีและได้มีการแพร่กระจายไปทั่วทวีปเอเชียและยุโรปทางเส้นทางสายไหม และในช่วง 200 ปีหลังได้แพร่ไปสู่ทวีปอเมริกาและอเมริกาใต้ (Chang, 1976)

1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าว

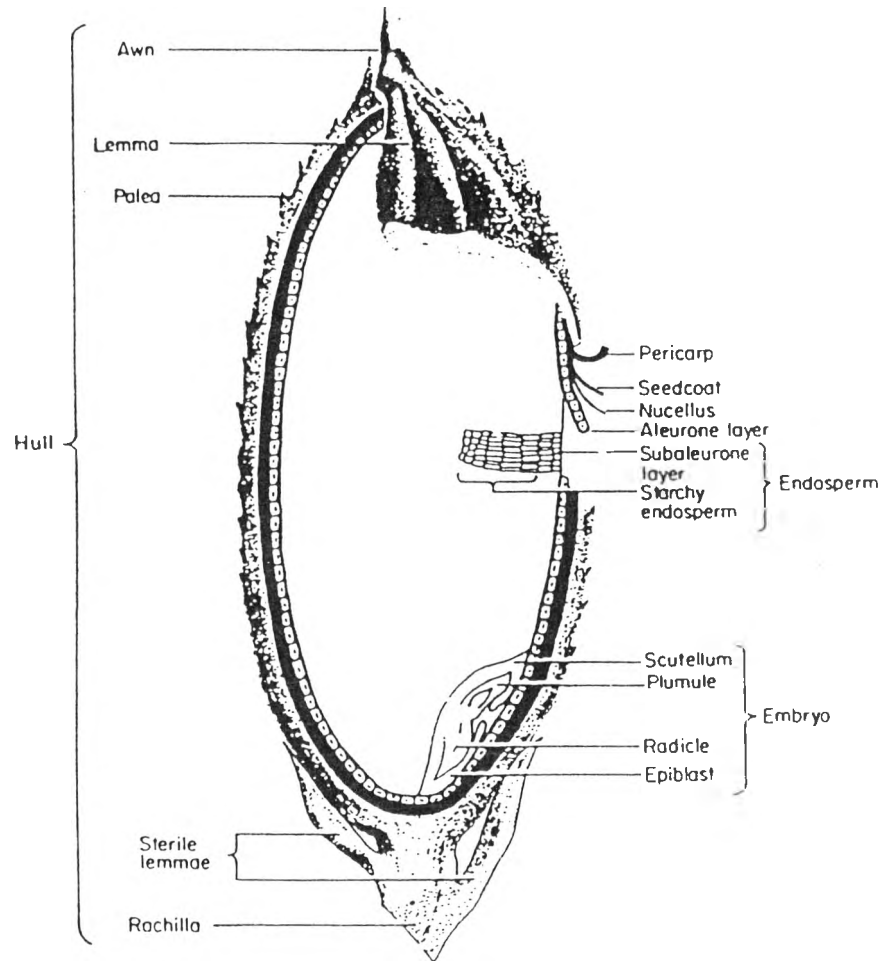
ข้าวเป็นพืชตระกูลหญ้าอยู่ใน	Family	-Gramineae
	Sub-tribe	-Oryzinae
	Genus	-Oryza

ข้าวใน genus *Oryza* มีหลาย species แต่ที่ปลูกอย่างแพร่หลายคือ *Oryza sativa* สามารถแบ่งออกเป็น 3 sub-species คือ

- *indica* เป็นข้าวที่ปลูกทั่วไปในแถบเอเชียใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น ประมาณ 80-120 วัน เมล็ดเรียวยาว ใบสีเขียวเข้ม
- *japonica* มีปลูกในเขตอบอุ่น พบในจีน เกาหลี ญี่ปุ่น มีเมล็ดป้อม สั้นรวงแน่น ใบเขียวเข้ม
- *javanica* พบมีการปลูกในแถบหมู่เกาะของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะหมู่เกาะชวา ข้าวชนิดนี้จะมีลำต้นแข็ง รวงยาว เมล็ดมีหาง

1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของเมล็ดข้าว

โครงสร้างพื้นฐานของเมล็ดข้าวประกอบด้วย ส่วนเปลือก (hull) รำ (bran) และเม็ดข้าว (endosperm) ดังที่แสดงในรูปที่ 1 โดยในแต่ละส่วนจะมีหน้าที่และองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเมล็ดข้าว

ที่มา: Marshall และ Wadsworth, 1994

ตามที่แสดงในรูปที่ 2.1 สามารถแบ่งโครงสร้างเมล็ดข้าวจากด้านนอกเข้าสู่ด้านในได้ดังนี้คือ

1.2.1 เปลือก (hull) เป็นส่วนนอกสุดมีหน้าที่ป้องกันจากสภาพแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลง ในส่วนเปลือกนี้ มีความชื้นประมาณร้อยละ 18-20 โดยน้ำหนัก ส่วนนี้จะหุ้มส่วนที่เป็นข้าวกล้อง (brown rice) ไว้ ประกอบไปด้วย non-flowering glume และ flowering glume

1.2.2 ข้าวกล้อง (brown rice ,caryopsis) เป็นส่วนที่ได้จากการสีเปลือกออกประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่

- รำข้าว (bran) ในส่วนนี้จะประกอบด้วย เยื่อหุ้มผล (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat ;tegmen) และ aleurone layer ในส่วนนี้มีประมาณร้อยละ 5-8 โดยน้ำหนัก

- จมูกข้าว (germ ,embryo) เป็นส่วนต้นอ่อนของข้าวมักจะถูกแยกออกป็นอยู่ในส่วนของรำข้าวเวลาขัดสี
- เอนโดสเปิร์ม (endosperm) เป็นส่วนประกอบหลักของเมล็ดข้าว ซึ่งมีประมาณร้อยละ 82 โดยน้ำหนักของข้าว ประกอบด้วยสองส่วนคือ subaleurone และ starchy endosperm ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นหลักโดย subaleurone มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก (งามชื่น คงเสรี, 2533)

1.3 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

ส่วนต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2.1) ซึ่งเมื่อนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของส่วนต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวเป็นร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง

องค์ประกอบ	ข้าวเปลือก	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร	เปลือก	รำข้าว	จมูกข้าว
โปรตีน(NX5.95)	6.7-8.3	8.3-9.6	7.3-8.3	2.3-3.2	13.2-17.3	17.7-23.9
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
ใยหยาบ	8.4-12.1	0.7-1.2	0.3-0.6	40.1-53.4	9.5-13.2	2.8-4.1
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
สตาร์ช	62.1	77.2	90.2	1.8	16.1	2.4
ใยอาหาร	19.1	4.5	2.7	77.3	27.6-33.3	-

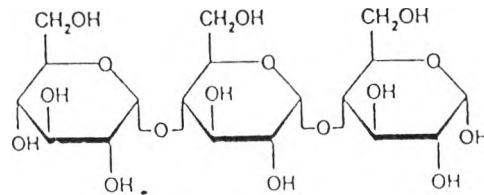
ที่มา: MarshallและWadsworth,1994

แสดงให้เห็นว่าในส่วนของเมล็ดข้าวที่ใช้บริโภคคือ ข้าวกล้องและข้าวสาร นั้นองค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณมากมี 3 องค์ประกอบด้วยกันคือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.3.1 คาร์โบไฮเดรต ในเมล็ดข้าวจะอยู่ในรูปของสตาร์ช (starch) ใยหยาบ และใยอาหาร ซึ่งคาร์โบไฮเดรตที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของข้าวคือสตาร์ช (starch)

- สตาร์ช (Starch) ในเมล็ดข้าวจะสะสมอยู่ในส่วนของเอนโดสเปิร์มในรูปเม็ดแป้ง โดยพืชใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานในการงอกและเจริญของต้นอ่อน ประกอบด้วยโมเลกุล โพลีแซคคาไรด์ 2 ชนิด คือ อะไมโลส และอะไมโลเพคติน (Hoseney, 1996)

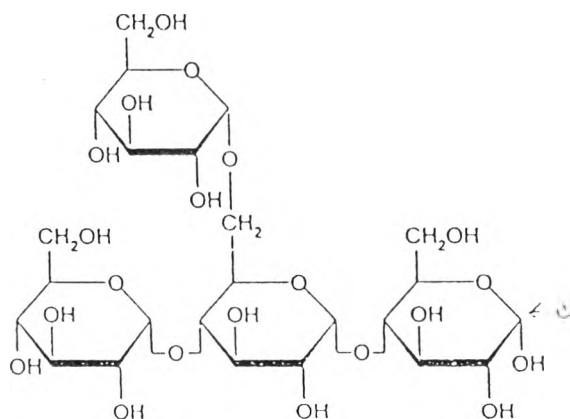
- อะไมโลส เป็นโพลีเมอร์ของกลูโคสประมาณ 2000 หน่วยมาต่อกันเป็นสายตรงด้วยพันธะ α -1,4 glycosidic (รูปที่ 2.2) โดยปกติจะมีโครงสร้างเป็นเกลียวม้วน (helix) สามารถเกิดสารประกอบสีน้ำเงินกับไอโอดีน (Hoseney, 1996)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลอะไมโลส

ที่มา: Hoseney, 1996

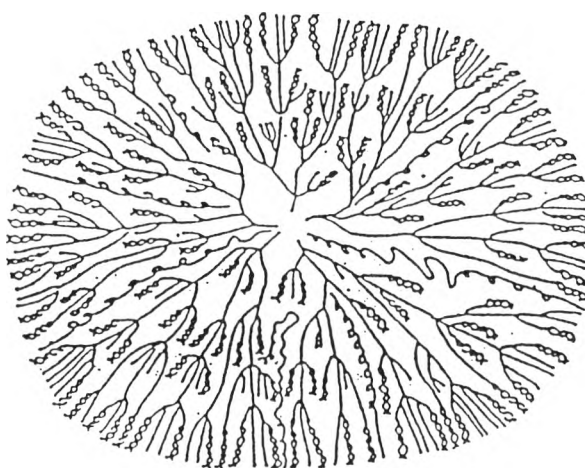
- อะไมโลเพคติน เป็นโพลีเมอร์ของกลูโคสมาต่อกันเป็นกิ่งด้วยพันธะ α -1,4 glycosidic ที่สายตรงและ α -1,6 glycosidic ที่กิ่ง (รูปที่ 2.3) สามารถเกิดสีม่วงแดงกับไอโอดีน (Hoseney, 1996)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลอะไมโลเพคติน

ที่มา: Hoseney, 1996

ในเมล็ดแป้ง โมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวกันในสองลักษณะคือ ส่วนที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบเหมือนผลึก เป็นส่วนที่โมเลกุลอะไมโลสจับตัวกันกับส่วนที่เป็นสายตรงของโมเลกุลอะไมโลเพคติน เรียก crystalline region อีกส่วนเป็นส่วนที่ไม่มีการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบในส่วนนี้จะเป็นบริเวณจุดเชื่อมของโมเลกุลอะไมโลเพคตินเป็นส่วนใหญ่ เรียก amorphous region โดยการจัดเรียงตัวจะขยายเป็นวงออกจากใจกลางเมล็ดแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2542) (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 แบบจำลองโครงสร้างเมล็ดแป้ง

ที่มา: Lineback, 1984

1.3.2 โปรตีน เป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากในส่วนของ subaleurone โปรตีนที่พบสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิดตามสมบัติการละลายดังนี้

1. กลูเตลิน (glutalin) เป็นโปรตีนที่ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่เป็นด่าง มีประมาณร้อยละ 80-85 ของโปรตีนในเมล็ดข้าว มีชื่อเรียกว่า โอโรซินิน (orysinine)
2. อัลบูมิน (albumin) เป็นโปรตีนที่ละลายได้ดีในน้ำ มีกรดอะมิโนไลซีนอยู่สูง
3. โกลบูลิน (globulin) เป็นโปรตีนที่ละลายได้ดีในสารละลายเกลือแอมโมเนียมซัลเฟต
4. โปรลามิน (prolamin) เป็นโปรตีนที่ละลายได้ดีในตัวทำละลายแอลกอฮอล์

(Chavan และ Duggal, 1978)

1.3.3 ไขมัน เป็นองค์ประกอบที่พบในส่วนของจมูกข้าวและรำเป็นส่วนใหญ่ ในส่วนที่เป็นข้าวสารมีปริมาณไขมันต่ำมาก ซึ่งโดยมากจะกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของเมล็ดแป้ง ประกอบด้วย triglycerides free fatty acids glycolipids phospholipids กระจายอยู่ทั่วในเมล็ดแป้ง โดยจะจับตัวอย่างหลวม ๆ กับคาร์โบไฮเดรต (Fugino, 1978)

2. การจำแนกชนิดข้าว

- 2.1 เมื่อจำแนกตามสมบัติทางเคมี โดยจำแนกตามอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในสตาร์ชข้าวเจ้า (rice starch) จะจำแนกข้าวได้เป็น 2 ประเภทคือ
- ข้าวเจ้า (non-glutinous rice)
 - ข้าวเหนียว (glutinous rice)
- 2.2 เมื่อจำแนกตามสภาพพื้นที่เพาะปลูก จะจำแนกข้าวได้เป็น 3 ประเภทคือ
- ข้าวไร่ (upland rice) คือข้าวที่ปลูกได้ทั้งบนที่ราบและที่ลาดชัน ไม่ชอบน้ำขัง นิยมปลูกมากในที่ราบสูง ตามไหล่เขาทางภาคเหนือ ใต้ ตะวันออก และตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย
 - ข้าวนาสวนหรือนาดำ (lowland rice) คือข้าวที่ปลูกในที่ลุ่มทั่วไปในสภาพที่มีน้ำหล่อเลี้ยงต้นข้าวตั้งแต่ปลูกจนถึงระยะก่อนเก็บเกี่ยว โดยที่ตลิ่งมีการรักษาระดับน้ำ และระดับน้ำต้องไม่เกิน 1 เมตร
 - ข้าวขึ้นน้ำหรือข้าวนาเมือง (floating rice) คือข้าวที่ปลูกในแหล่งที่ไม่สามารถรักษาระดับน้ำได้ บางครั้งระดับน้ำสูงเกินกว่า 1 เมตร ข้าวพันธุ์นี้จะมีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถยึดตัวหนีน้ำได้ ปลูกมากในแถบพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำ
- 2.3 เมื่อจำแนกจำแนกตามอายุการเก็บเกี่ยว จะจำแนกข้าวได้เป็น 3 ประเภทคือ
- ข้าวเบา (early variety) คือข้าวที่มีอายุการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ 90-100 วัน นับตั้งแต่เพาะกล้าหรือหว่านเมล็ดจนเก็บเกี่ยว
 - ข้าวกลาง (medium variety) คือข้าวที่มีอายุการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ 100-120 วัน นับตั้งแต่เพาะกล้าหรือหว่านเมล็ดจนเก็บเกี่ยว
 - ข้าวหนัก (late variety) คือข้าวที่มีอายุการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ 120 วันขึ้นไป นับตั้งแต่เพาะกล้าหรือหว่านเมล็ดจนเก็บเกี่ยว
- 2.4 เมื่อจำแนกตามลักษณะความไวแสง จะจำแนกข้าวได้เป็น 2 ประเภทคือ
- ข้าวไวแสง (photoperiod sensitive variety) ข้าวพวกนี้มีอายุการเก็บเกี่ยวไม่แน่นอน เพราะจะออกดอกในช่วงเดือนที่มีความยาวกลางวันมากกว่ากลางคืน ในประเทศไทยจะเริ่มในเดือนตุลาคม ข้าวพวกนี้จะปลูกในนาปี (ฤดูฝน)
 - ข้าวไม่ไวแสง (non-photoperiod sensitive variety) ข้าวพวกนี้มีอายุการเก็บเกี่ยวที่แน่นอน เพราะจะออกดอกและเก็บเกี่ยวได้เมื่อครบอายุการเจริญเติบโต โดยที่ช่วงแสงไม่มีผลกระทบต่อการออกดอก ข้าวพวกนี้จึงสามารถปลูกได้ทุกฤดูกาล

2.5 เมื่อจำแนกตามรูปร่างเมล็ด จะจำแนกข้าวได้เป็น 4 ประเภทคือ

- ข้าวเมล็ดสั้น (short grain) ความยาวเมล็ดไม่เกิน 5.50 มิลลิเมตร
- ข้าวเมล็ดยาวปานกลาง (medium-long grain) ความยาวเมล็ดตั้งแต่ 5.51-6.60 มิลลิเมตร
- ข้าวเมล็ดยาว (long grain) ความยาวเมล็ดตั้งแต่ 6.61-7.50 มิลลิเมตร
- ข้าวเมล็ดยาวพิเศษ (extra-long grain) ความยาวเมล็ดตั้งแต่ 7.51 มิลลิเมตรขึ้นไป

2.6 เมื่อจำแนกจำแนกตามฤดูปลูก จะจำแนกข้าวได้เป็น 2 ประเภทคือ

- ข้าวนาปี (rainfed rice) คือข้าวที่ปลูกในฤดูการทำนา (หน้าฝน) ในประเทศไทยเริ่มเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนตุลาคม และจะเก็บเกี่ยวเสร็จสิ้นไม่เกินเดือนกุมภาพันธ์
- ข้าวนาปรัง (off-season rice) คือข้าวที่ปลูกนอกฤดูการทำนา โดยอาศัยการชลประทานเป็นหลัก (ณรงค์ นิยมวิทย์, 2538)

2.7 เมื่อจำแนกจำแนกโดยใช้ปริมาณอะไมโลส

การจำแนกนี้ใช้ปริมาณอะไมโลสเป็นเกณฑ์เทียบกับลักษณะข้าวสุก จะจำแนกข้าวได้เป็น 5 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำแนกโดยใช้ปริมาณอะไมโลส

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

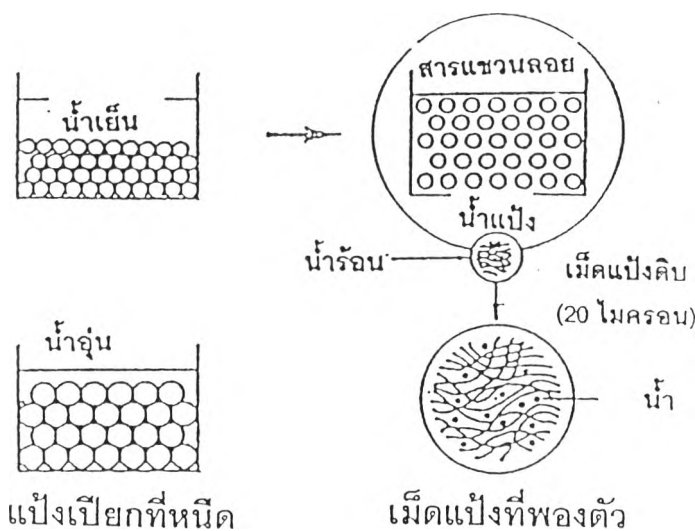
ที่มา : Juliano, 1985

3. สมบัติทางกายภาพของแป้ง

3.1 การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization)

เม็ดแป้งปกติจะไม่ละลายน้ำเนื่องจากโมเลกุลเกาะกันอยู่เป็นร่างแหทำให้ดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัว เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว เรียกว่าการเกิดเจลาตินในเซชัน (รูปที่ 2.5) ของเม็ดแป้งซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะแรก เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

ถึงจุดหนึ่งที่เรียกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตไนเซชัน (gelatinization temperature;GT) จะเข้าสู่ระยะที่ 2 คือเม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำได้มากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลลิตไนเซชัน ในขั้นนี้โมเลกุลของอะไมโลสจะละลายออกมานอกเม็ดแป้ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจะเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะเกิดการขยายตัวและมีรูปร่างไม่แน่นอน การละลายของเม็ดแป้งจะดีขึ้น โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะละลายออกมานอกเม็ดแป้งมากขึ้น จนไม่เหลือเม็ดแป้งอยู่ ซึ่งเกิดขึ้นได้จากการที่เม็ดแป้งในขั้นที่ 3 ถูกทำลายโดยแรงเฉือนหรือมีน้ำในระบบมากเพียงพอ (กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2542)



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งระหว่างการหุงต้ม

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2542

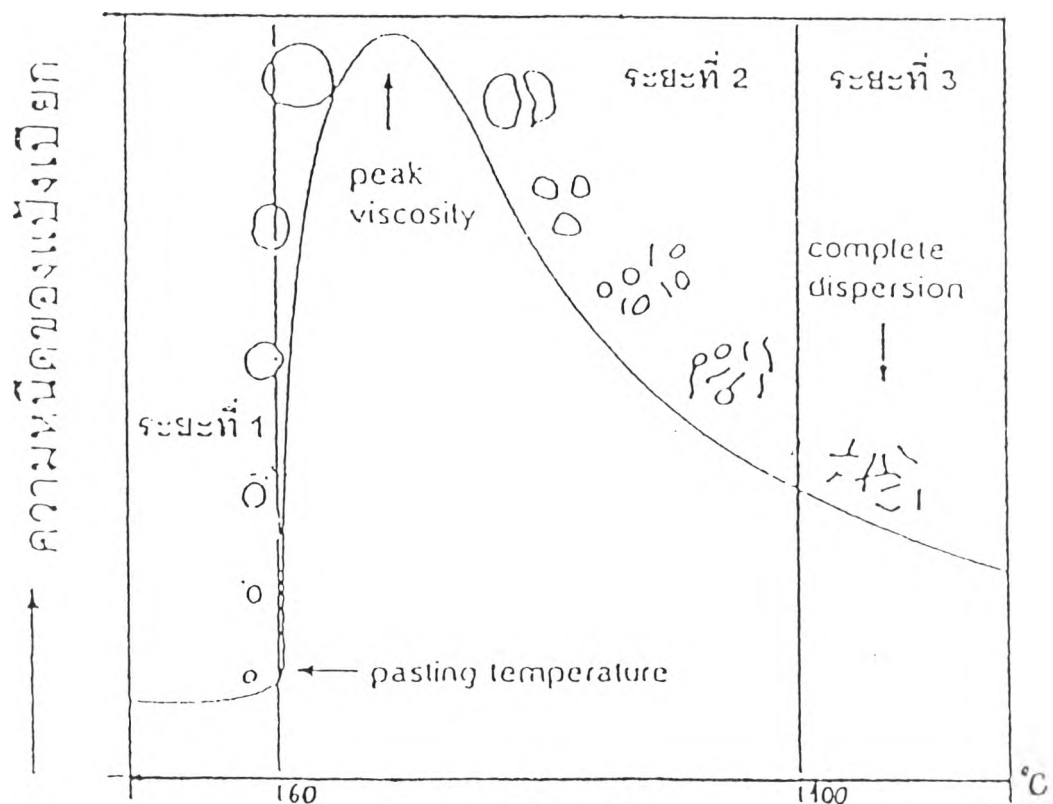
การสังเกตระยะต่าง ๆ ของการเกิดเจลลิตไนเซชันของเม็ดแป้งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายแป้ง การตรวจวัดปริมาณอะไมโลสที่ละลาย หรือการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานโดย DSC ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.1.1 การสังเกตระยะต่าง ๆ ของการเกิดเจลลิตไนเซชันของเม็ดแป้ง

3.1.1.1 การวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายแป้งโดยเครื่อง Brabender Viscoamylograph

จากรูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายแป้งที่สังเกตด้วยเครื่อง Brabender Viscoamylograph สามารถแบ่งได้เป็นขั้นตามช่วงอุณหภูมิคือ

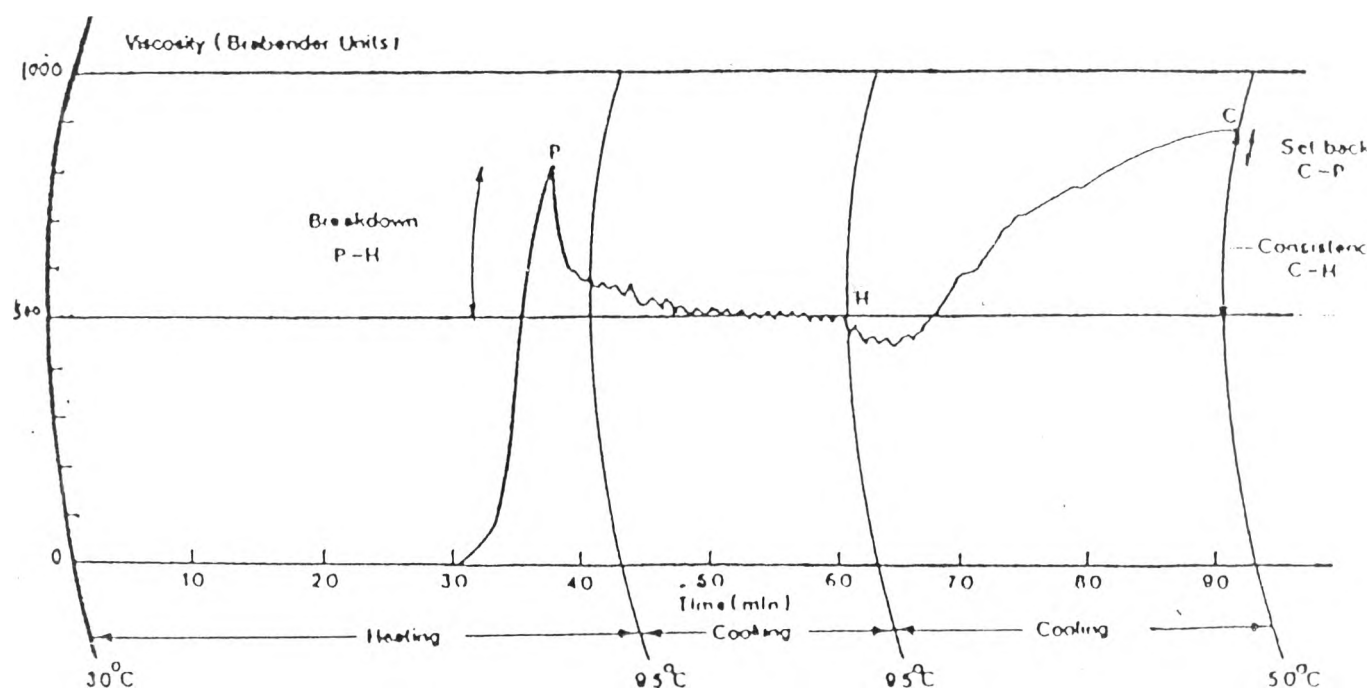
- Heating เป็นช่วงที่เริ่มให้ความร้อนแก่สารละลายแป้ง ความร้อนที่ให้จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเร็วคงที่จนถึงอุณหภูมิที่กำหนด โดยมากจะอยู่ที่ 95 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้เม็ดแป้งจะมีการพองตัวอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึง GT เม็ดแป้งเกิดการชนกันมากขึ้นทำให้ความหนืดของสารละลายสูงขึ้น
- Cooking เป็นช่วงที่มีการคงอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิที่กำหนดโดยมากจะอยู่ที่ 95 องศาเซลเซียสในระยะเวลาที่กำหนดตามชนิดของแป้ง ในช่วงนี้ความหนืดจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ลดลง หรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง
- Cooling เป็นช่วงที่มีการลดอุณหภูมิไปที่อุณหภูมิที่กำหนดโดยมากจะอยู่ที่ 50 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้ความหนืดจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง



รูปที่ 2.6 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าว

ที่มา : Juliano, 1985

จากแผนภูมิการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสามารถนำมาอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในขั้นตอนต่าง ๆ ของการเกิดเจลลิตในเซชันได้ในรูปที่ 2.7



P=ความหนืดสูงสุด

H=ความหนืดสุดท้ายที่ 95 องศาเซลเซียส

C=ความหนืดสุดท้ายที่ 50 องศาเซลเซียส

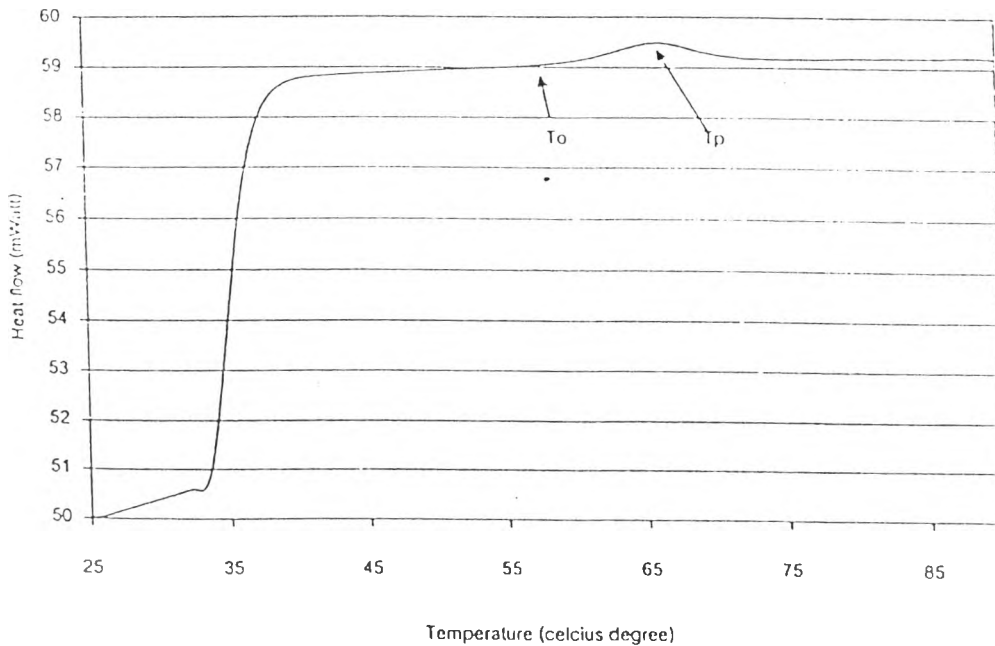
รูปที่ 2.7 ระยะเวลาในการเกิดเจลลิตในเซชันของเม็ดแป้ง

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2542

3.1.1.2 การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานโดย DSC

เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการ โดยปกติพอลิเมอร์ต่าง ๆ ในรูปผลึกและอสัณฐาน จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน ในกรณีของแป้ง เมื่อมีปริมาณน้ำเพียงพอเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการหลอมละลาย หรือเกิดเจลลิตในเซชันนั่นเอง ปริมาณความร้อนที่ใช้ไปในการหลอมละลายผลึกของเม็ดแป้งจะแสดงอยู่ในรูป heat

flow ดังในรูปที่ 2.8 อุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันจะอยู่ใน ช่วงอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง (onset temperature) และอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak temperature) พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน ($\Delta H, \text{cal/g}$) จะสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแห้งตัวอย่าง



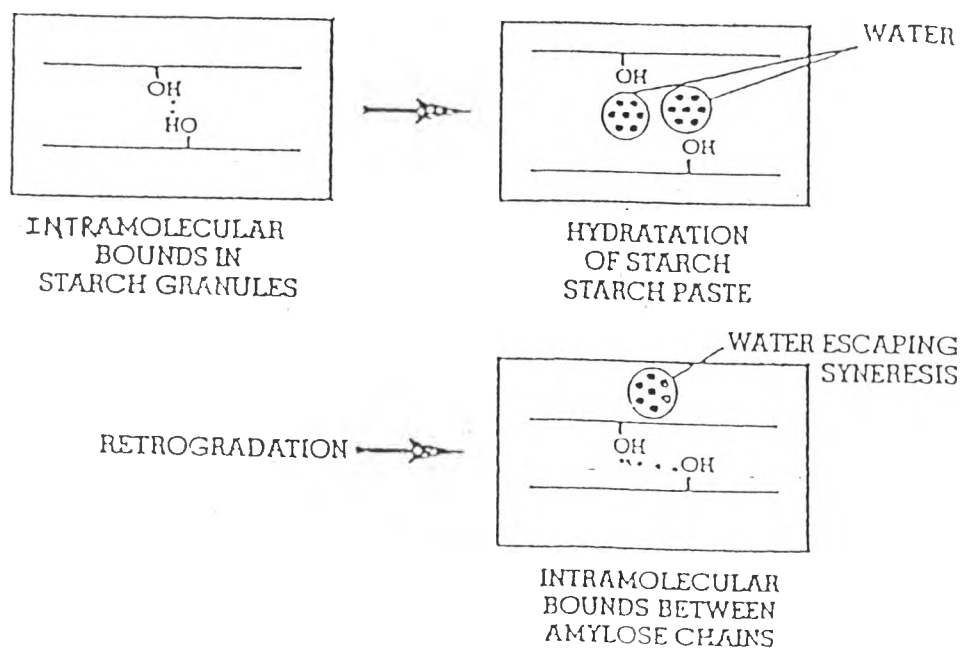
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกราฟ thermogram จากเครื่อง DSC

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2542

3.2 การเกิดการคืนตัวของแป้งสุก (retrogradation)

คือปรากฏการณ์เมื่อแป้งที่เกิดการเจลลาติโนเซชันเย็นตัวลง เมื่ออุณหภูมิลดลงโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายแป้งจะเริ่มเคลื่อนที่เข้าใกล้กันและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนบริเวณหมู่ไฮดรอกซิล และเกิดการกำจัดโมเลกุลของน้ำออกมาเรียกว่า syneresis เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่อย่างมีระเบียบอีกครั้งแต่ไม่เป็นลักษณะของ birefringence การจับตัวกันจะเกิดที่บริเวณสายตรงของทั้งโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

โดยการจับตัวกันนี้โมเลกุลอะไมโลสจะมีความสามารถในการจับตัวกันได้ดีกว่าอะไมโลเพคติน เนื่องจากโมเลกุลเป็นสายตรงทำให้สามารถเคลื่อนตัวใกล้กันได้มากกว่า การที่มีการจับตัวกันทั้งโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแห (matrix) ที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในระบบถ้าในระบบมีน้ำต่ำ (แต่ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 40) โมเลกุลของทั้งอะไมโลสและอะไมโลเพคตินอยู่ใกล้กันอยู่แล้วจึงจับกันได้ง่ายขึ้น ชนิดของแป้งก็มีผลต่อการคืนตัวของแป้งสุก โดยแป้งจาก พืชราก พืชหัว จะมีอัตราการคืนตัวช้ากว่าในแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เพราะแป้งจากพืชหัวเมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวและแตกได้ง่าย โมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินกระจายห่างกันมาก การที่จะเคลื่อนที่มาจับกันใหม่จึงยาก ในแป้งจากธัญพืชมีการพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อยกว่า การที่จะเคลื่อนที่มาจับกันใหม่จึงเกิดได้ง่ายกว่า (Whistler และ Johnson, 1948)



รูปที่ 2.9 แสดงกระบวนการเกิดการคืนตัวของแป้งสุก (retrogradation)

ที่มา : กล้าณรงค์ ศิริรอด, 2542

3.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของแป้ง

3.3.1 ปริมาณอะไมโลส

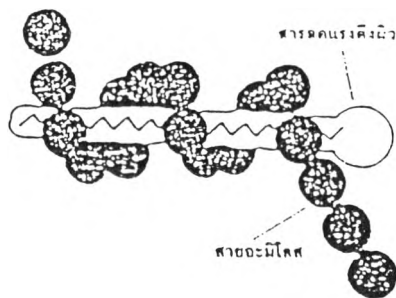
เนื่องจากเม็ดแป้งเกิดจากการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินทำให้เกิดส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐานตามที่อธิบายไว้แล้วในข้างต้น ส่วนที่เป็นผลึกนั้นมีการจับตัวกันอย่างแข็งแรงและส่วนมากจะเป็นโมเลกุลอะไมโลส ดังนั้นเมื่อมีปริมาณอะไมโลสสูงแสดงว่าในเม็ดแป้งนั้นจะมีผลึกที่แข็งแรง โดยทั่วไปแล้วแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะให้ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันและพลังงานในการสลายผลึกที่สูงกว่าในแป้งอะไมโลสต่ำ ในการเกิดการคืนตัวของแป้งสุก แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสที่สูงจะเกิดการคืนตัวที่สูงกว่าในแป้งอะไมโลสต่ำ แต่ทั้งนี้ผลของปริมาณอะไมโลสในแป้งต่อสมบัติทางกายภาพนั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ชนิดของพืชที่ให้แป้ง พื้นที่การปลูก พันธุ์ ฤดูกาล เป็นต้น

3.3.2 โปรตีน

ข้าวนั้นจัดเป็นธัญพืชที่มีโปรตีนสูง โปรตีนที่อยู่ในแป้งนั้นจะเกาะอยู่บริเวณผิวของเม็ดแป้งทำให้เกิดประจุบนผิวของเม็ดแป้งซึ่งมีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีอัตราการดูดน้ำ อัตราการพองตัว และการเกิดเจลาติไนเซชันที่เปลี่ยนแปลงไป โดยแป้งที่มีปริมาณโปรตีนสูง จะมีอัตราการดูดน้ำ อัตราการพองตัว และการเกิดเจลาติไนเซชันที่ต่ำกว่าในแป้งโปรตีนต่ำ ทำให้เมื่อนำมาแปรรูป ผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวโปรตีนต่ำจะให้เนื้อสัมผัสที่นุ่มกว่าผลิตภัณฑ์จากข้าวโปรตีนสูง (Ranjit และคณะ, 1997) นอกจากนี้ในระหว่างเก็บรักษา โปรตีนในเม็ดข้าวยังจะสามารถจับกับ อะไมโลสและอะไมโลเพคตินด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ทำให้เกิดการเจลาติไนเซชันของแป้งได้ช้า ดังนั้นข้าวเก่าจึงแข็งกว่าข้าวใหม่ (Chrastil, 1990)

3.3.3 ไขมัน

ไขมันในเมล็ดข้าวนั้นมาจากสองแหล่งคือจากส่วนของจมูกข้าวและส่วนที่รวมอยู่กับเม็ดแป้งซึ่งไขมันในส่วนนี้จะประกอบด้วยกรดไขมันเป็นส่วนใหญ่ กรดไขมันจะจับตัวกับอะไมโลส (รูปที่ 2.10) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (lipid-amylose complex; LAM) ที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยา จากการทดลองเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ ระหว่างแป้งที่มีการสกัดไขมันและแป้งที่ไม่สกัดไขมัน พบว่าแป้งที่ไม่สกัดไขมันจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืด การเกิดเจลาติไนเซชัน และ swelling ที่ต่ำกว่าในแป้งสกัดไขมัน เนื่องจาก LAM จะขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าสู่เม็ดแป้งและขัดขวางการละลายของอะไมโลส (Morrisson, 1995) เนื่องจาก LAM มีความคงตัว กว่าอะไมโลสปกติ ดังนั้นสำหรับการเกิดการคืนตัวของแป้งสุกจะพบว่าแป้งที่ไม่สกัดไขมันจะมีอัตราการคืนตัวเร็วกว่าแป้งสกัดไขมัน (Yoshiko และคณะ, 1990)



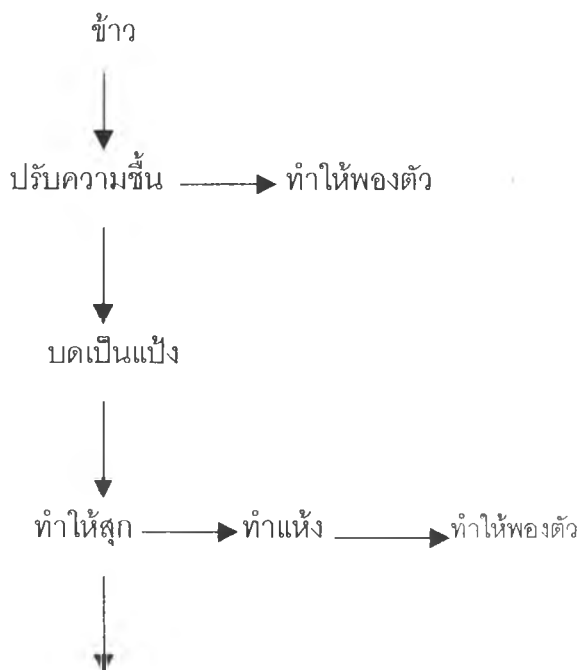
รูปที่ 2.10 การจับตัวกันของอะมิโนเอสกับ สารอินทรีย์

ที่มา : Galliard และ Bowler, 1987

นอกจากนี้ถ้ามีการเติมไขมันจากภายนอก เช่น ในการทำผลิตภัณฑ์บางประเภทที่มีการเติมไขมันในสูตรหรือมีการใช้ส่วนของพืชที่มีไขมัน พบว่าไขมันจะลดการเกิดเจลาตินในเซชั่นของแป้งและทำให้การพองตัวของผลิตภัณฑ์ต่ำลง แต่ไม่มีผลในการเกิดการคืนตัวของแป้งสุก (Suhaila และคณะ, 1994)

2.4 ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าว

ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวมีเป็นที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายในประเทศและหลายรูปแบบ รูปแบบหนึ่งที่ยอดนิยมคือขนมกรอบ เช่น ข้าวเกรียบว่าว ข้าวพอง ข้าวตัง ขนมอาราเร่ ขนมเซมเบ้ เป็นต้น กระบวนการผลิตขนมกรอบเหล่านี้มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันในบางขั้นตอนการผลิต ซึ่งสามารถสรุปรวมกระบวนการผลิต ดัง แสดงในรูปที่ 2.11





รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการผลิตขนมกรอบจากข้าว

ที่มา : มาลี ชิมสกุล, 2534; Suhaila และคณะ, 1994; Kim และ Maga, 1990

จากรูปที่ 2.11 เห็นว่าการผลิตขนมกรอบนั้นจะมีขั้นตอนการพองตัวอยู่ด้วยเสมอ ไม่ว่าจะมีการทำให้ข้าวสุกก่อนหรือไม่ และต้องมีการปรับความชื้นให้เหมาะสมกับการพองตัว ซึ่งปริมาณความชื้นขึ้นกับวัตถุดิบและวิธีการว่าจะป็นทอด อบ หรือย่าง การพองตัวของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นได้จะต้องมีความชื้นในวัตถุดิบที่จะทำให้พองตัวปริมาณความชื้นขึ้นกับวิธีการผลิต กระบวนการที่ทำให้เกิดการพองตัวในผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นวัตถุดิบนั้นจะเกิดจากแป้งที่มีความชื้นได้รับความร้อนจนเกิดเจลลิตในเซชันทำให้โครงสร้างอ่อนตัวและสามารถเกิดการขยายตัวจากแรงดันไอน้ำที่เกิดขึ้น ดังนั้นลักษณะและปริมาตรการพองตัวของผลิตภัณฑ์ ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำกับความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของโครงสร้างวัตถุดิบ (มาลี ชิมสกุล, 2534; Suhaila และคณะ, 1994; Kim และMaga, 1990)

Watanabe และคณะ (1999) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัตถุดิบระหว่างกระบวนการผลิตขนมขบเคี้ยวจากข้าวเหนียวโดยใช้ DSC พบว่า

กระบวนการนี้ เป็นการทำให้เกิดการเจลลิตในเซชันของแป้งข้าวเหนียวซึ่งสามารถดูได้จากค่า ΔH ที่ลดลงในแป้งนี้ (ตารางที่ 2.3) ซึ่งแสดงว่าปริมาณของโครงสร้างผลึกในเม็ดแป้งที่ลดลงและเมื่อค่า ΔH เป็นศูนย์แสดงว่าเป็นการเกิดเจลลิตในเซชันที่สมบูรณ์ ระดับการเกิดเจลลิตในเซชัน ของแป้งข้าวเหนียวจะขึ้นกับอุณหภูมิการนี้ (รูปที่ 2.12) โดยเมื่อใช้อุณหภูมิหนึ่งสูงขึ้นระดับการเจลลิตในเซชันจะเพิ่มขึ้น

การแช่เย็น เป็นการทำให้แป้งที่เกิดเจลาตินในเซชันมีการคืนตัว (retrogradation) อีกครั้ง โดยเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงร่างผลึกใหม่ เมื่อเพิ่มเวลาแช่เย็นการเกิดการคืนตัวจะเพิ่มขึ้นดูได้จากค่า ΔH ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.13)

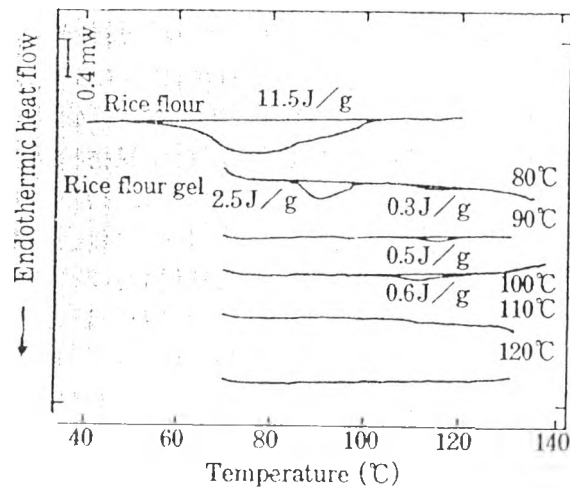
การอบแห้ง เป็นการดึงน้ำออกจากโครงร่างของแป้งที่เกิดการคืนตัว และยังทำให้เกิดโครงร่างที่แข็งแรงขึ้นในก้อนแป้งอีกด้วย ดูจาก ค่า ΔH ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาอบแห้งนานขึ้น (ตารางที่ 2.3)

การย่าง เป็นการทำลายโครงร่างที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการแช่เย็นและอบแห้ง (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า ΔH ของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างกระบวนการผลิตขนมขบเคี้ยวจากข้าวเหนียว

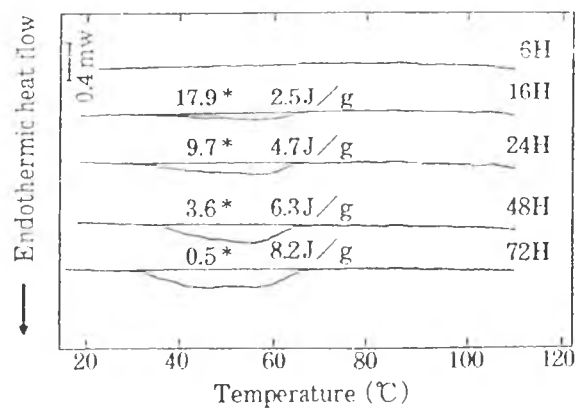
Sample	Peak temp ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH (J/g)
แป้งข้าวเหนียว	68.0	13.7 \pm 0.2
แป้งนึ่ง	-	0.0 \pm 0.0
แป้งสุกแช่เย็น		
6 ชั่วโมง	-	0.0 \pm 0.0
12 ชั่วโมง	49.5	1.5 \pm 0.3
24 ชั่วโมง	43.5	2.9 \pm 0.3
48 ชั่วโมง	42.8	5.3 \pm 0.2
แป้งสุกแช่เย็นอบแห้ง		
40 $^{\circ}\text{C}$ 1 ชั่วโมง	43.4	4.6 \pm 0.2
40 $^{\circ}\text{C}$ 3.5 ชั่วโมง	42.8	6.1 \pm 0.1
ผลิตภัณฑ์หลังย่าง	0.0	0.0 \pm 0.0

ที่มา: Watanabe และคณะ, 1999.



รูปที่ 2.12 แสดงกราฟจากเครื่อง DSC ของแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเหนียวหนึ่งที่อุณหภูมิหนึ่งต่าง ๆ

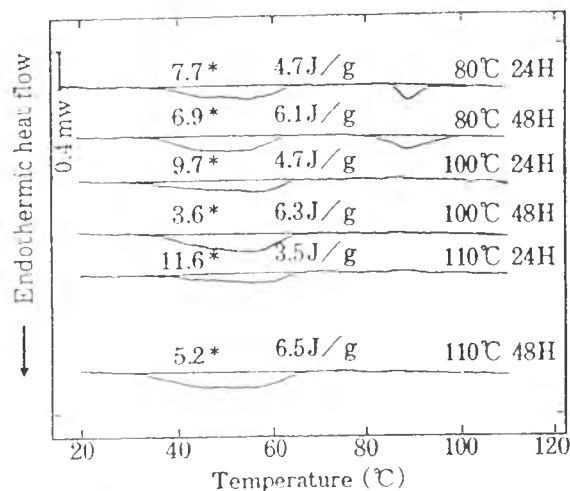
ที่มา: Watanabe และคณะ, 1999.



รูปที่ 2.13 แสดงกราฟจากเครื่อง DSC ของแป้งข้าวเหนียวสุกคั่นตัวที่เวลาแช่เย็นต่าง ๆ

ที่มา: Watanabe และคณะ, 1999.

นอกจากนี้ Watanabe และคณะยังพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหนึ่งและเวลาในการแช่เย็นต่อ ค่า ΔH ของแป้งสุกแช่เย็น (รูปที่ 2.14) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟจากเครื่อง DSC ในรูปที่ 2.12 ค่า ΔH ของแป้งที่หนึ่งด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสยังคงพบค่า ΔH ในช่วงอุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส แสดงว่าแป้งที่หนึ่งด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเกิด เจลาตินไนเซชันไม่สมบูรณ์ เมื่อแป้งเกิดการคั่นตัวจะได้ peak ของกราฟจากเครื่อง DSC สองจุด (รูปที่ 2.14) คือ ในช่วงอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส และ ในช่วงอุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิหนึ่ง ที่สูงกว่าการคั่นตัวของแป้งสุกจะเกิดน้อยกว่าที่เวลาแช่เย็นที่เท่ากัน



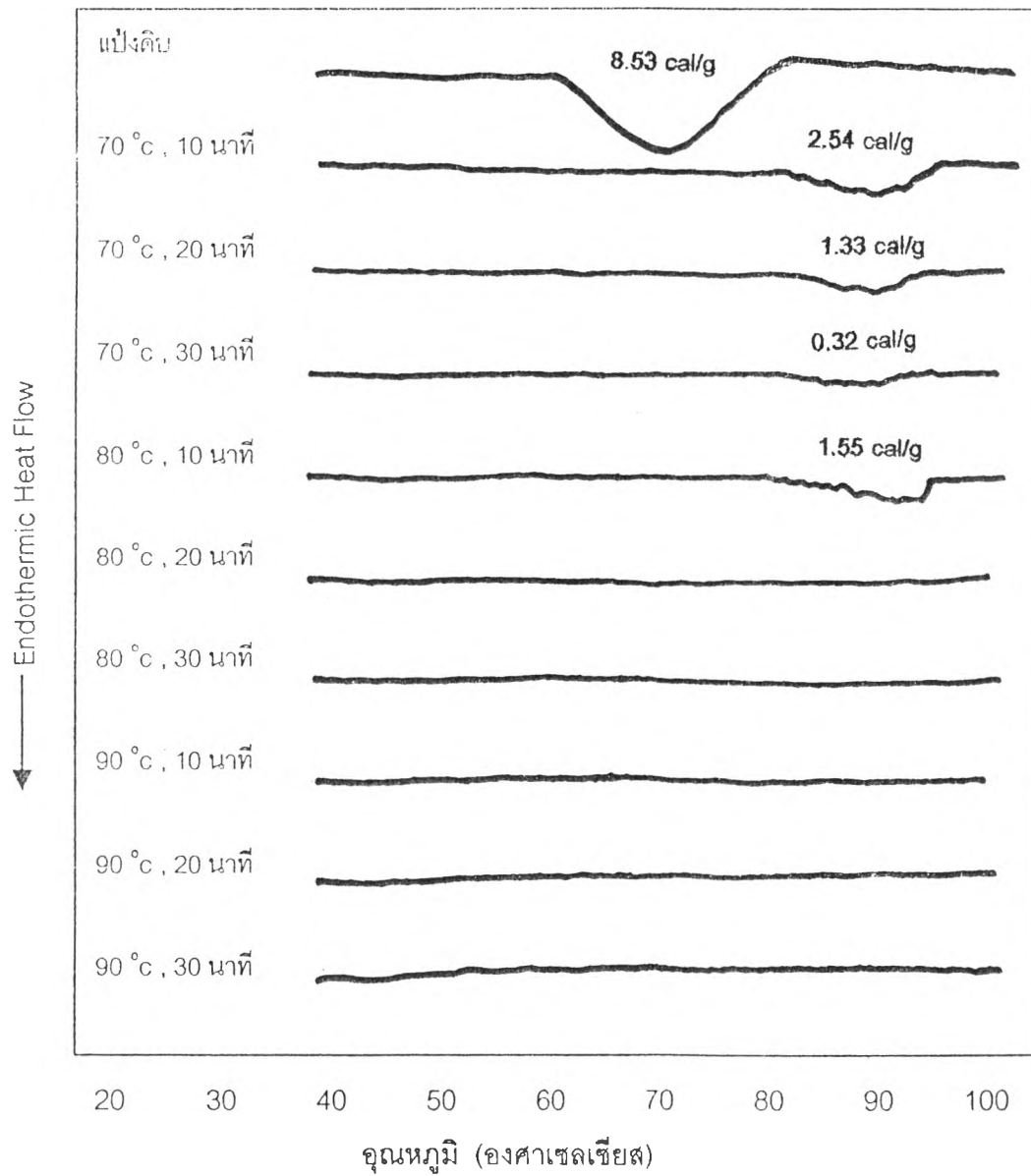
รูปที่ 2.14 แสดงกราฟจากเครื่อง DSC ของแป้งข้าวเหนียวสุกคั้นตัวที่อุณหภูมิการนึ่ง และเวลาแช่เย็นต่าง ๆ

ที่มา: Watanabe และคณะ, 1999.

แต่จากการทดลองของ Watanabe และคณะ (1999) ยังไม่สามารถทราบถึงผลของกระบวนการผลิตที่มีต่อผลิตภัณฑ์ ดังนั้น การันต์ วีระพัฒนานวงศ์ (2543) จึงทำการศึกษาผลของสภาวะกระบวนการผลิตต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์พบผลของกระบวนการผลิตต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ดังนี้

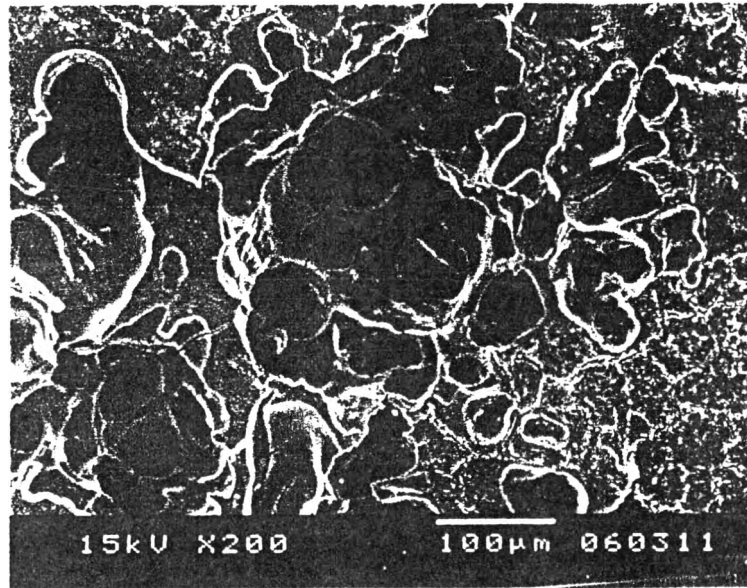
การนึ่ง พบว่าเวลาและอุณหภูมิการนึ่งที่เพิ่มขึ้นจะลดความหนาแน่นและเพิ่มปริมาตรการพองตัวของผลิตภัณฑ์ แต่เฉพาะอุณหภูมิหนึ่งเท่านั้นที่มีผลต่อความแข็งของผลิตภัณฑ์โดยอุณหภูมินึ่งที่เพิ่มขึ้นจะให้ความแข็งที่ลดลง และเมื่อวัดค่า ΔH ของตัวอย่างแป้งนึ่งพบว่าเมื่อเวลานึ่งเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ เกินกว่า 70 องศาเซลเซียส จะไม่พบ ค่า ΔH ของตัวอย่าง (รูปที่ 2.15) แสดงให้เห็นว่าการพองตัวของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นได้ดีเมื่อแป้งดิบเกิดการเจลลิ่งในเซชันอย่างสมบูรณ์

เวลานวดแป้งสุก พบว่าเมื่อเพิ่มเวลานวดแป้งสุกขึ้นถึง 8 นาที ค่าความแข็งและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จะลดลงแต่ปริมาตรการพองตัวของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลานวดสูงกว่า 8 นาที ค่าความแข็งและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จะเริ่มสูงขึ้นแต่ปริมาตรการพองตัวของผลิตภัณฑ์จะลดลง จากการศึกษาโครงสร้างภายในก้อนแป้งด้วย SEM พบว่าแป้งสุกที่นวด 8 นาทีจะมีลักษณะของฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากและกระจายตัวสม่ำเสมอ (รูปที่ 2.16) จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวที่ดี แต่ถ้านวดเกิน 8 นาที จะได้ฟองอากาศขนาดใหญ่จำนวนน้อยและกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 2.17)

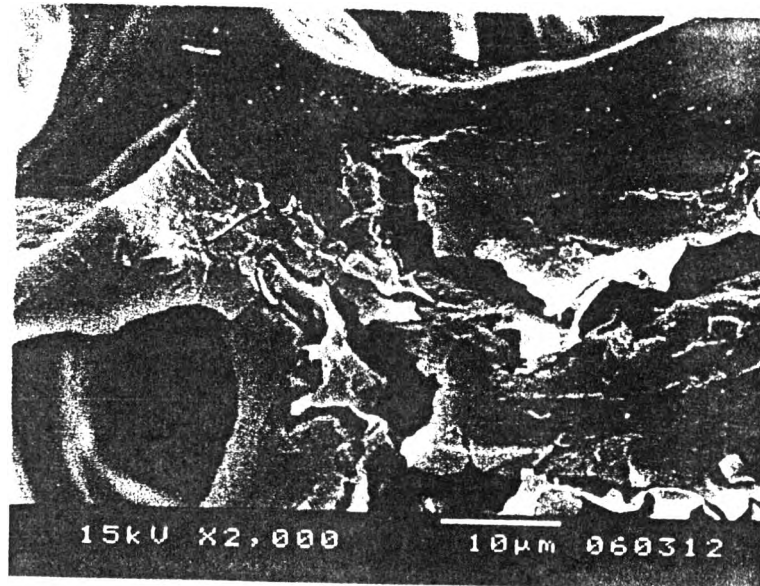


รูปที่ 2.15 DSC thermograms ของแป้งที่ผ่านเวลาและอุณหภูมิการนึ่งต่าง ๆ

ที่มา: การันต์ วีระพัฒนานวงศ์, 2543.

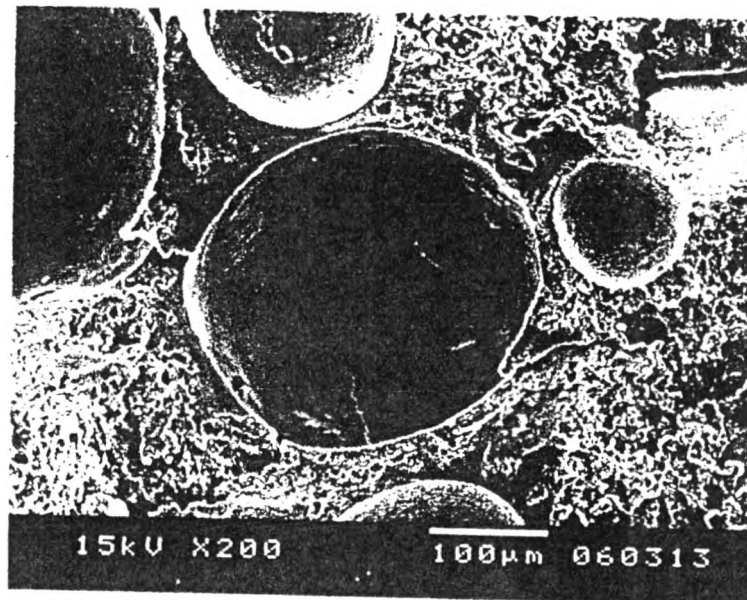


X200

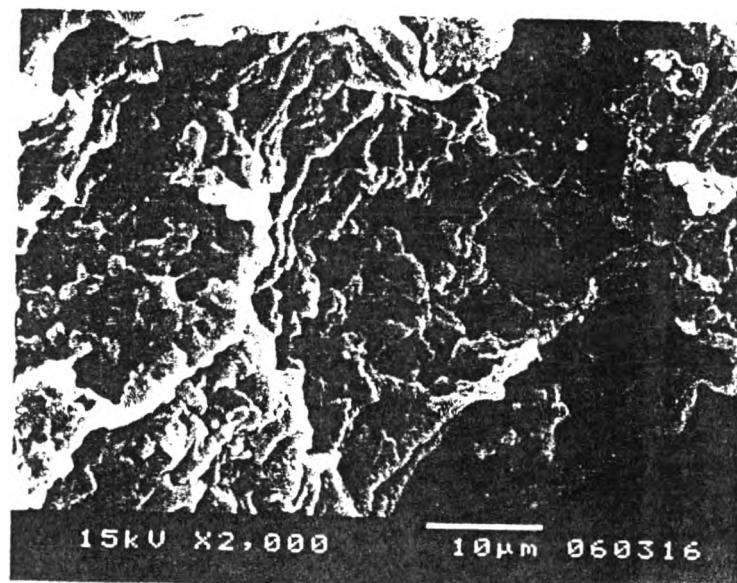


X2000

รูปที่ 2.16 โครงสร้างภายในก้อนแป้งที่ผ่านการนวด 8 นาที
ที่มา: การันต์ วีระพัฒนานุวงศ์, 2543.



X200



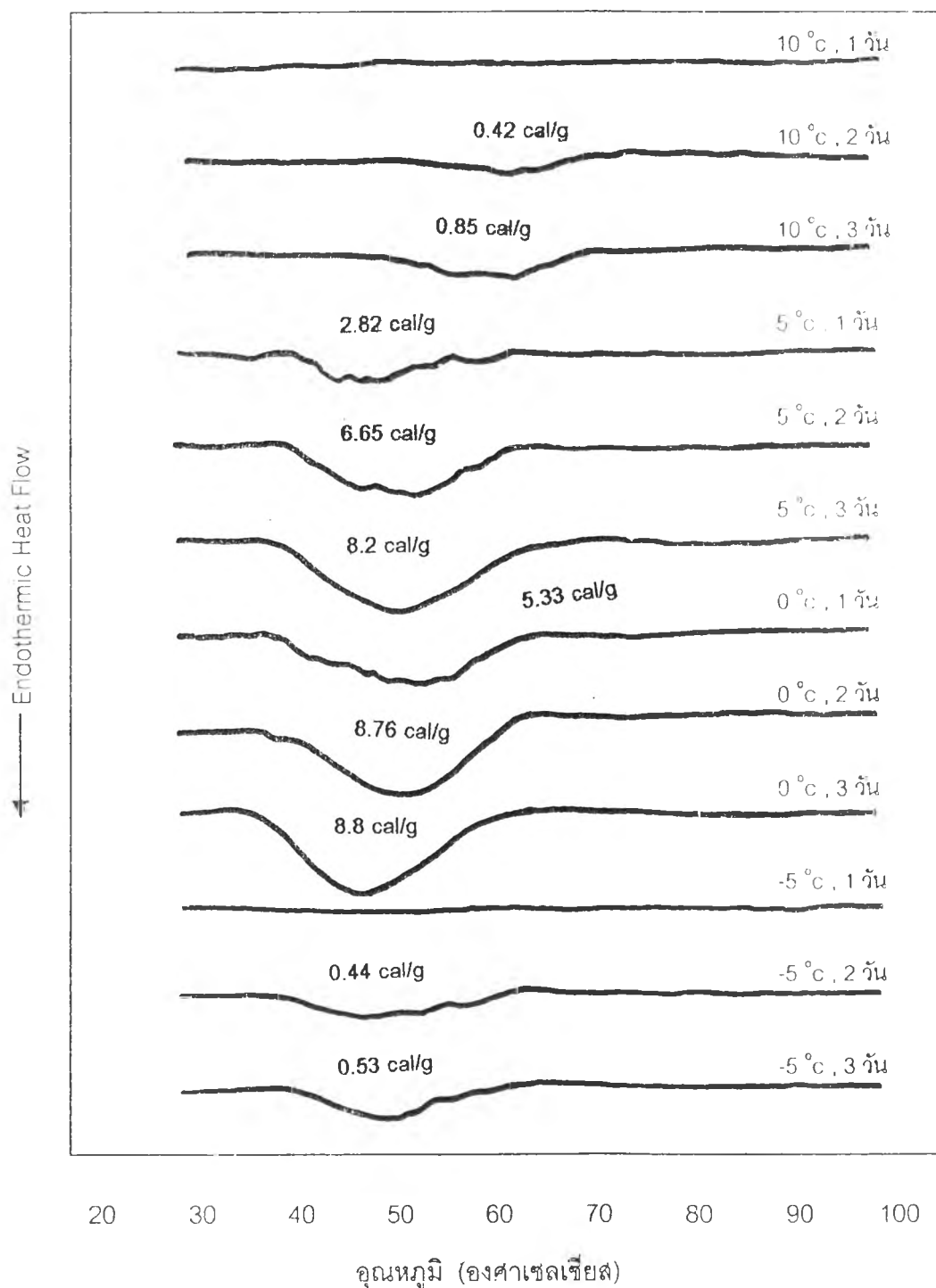
X2000

รูปที่ 2.17 โครงสร้างภายในก้อนแป้งที่ผ่านการนวด 10 นาที

ที่มา: การันต์ วีระพัฒนานุวงศ์, 2543.

อุณหภูมิและเวลาแช่เย็นแป้งสุก พบผลของทั้งอุณหภูมิและเวลาแช่เย็นแป้งสุกต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลของ ΔH ของแป้งสุกแช่เย็น (รูปที่ 2.18) ที่เกิด

จากการคืนตัวของแป้งสุกที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าค่าความหนาแน่นและความแข็งของผลิตภัณฑ์จะลดลงเมื่อ ΔH ของแป้งสุกแช่เย็น เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณการพองตัวจะสูงขึ้น แสดงว่าการพองตัวของผลิตภัณฑ์นั้นจะต้องอาศัยโครงสร้างที่เกิดจากการคืนตัวของแป้งสุกจึงจะเกิดการพองตัวได้ดี



รูปที่ 2.18 DSC thermograms ของแป้งที่ผ่านเวลาและอุณหภูมิการแช่เย็นต่าง ๆ
ที่มา: กาวนต์ วีระพัฒนานวงศ์, 2543.