



วิทยานิพนธ์

สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์และการเกิดเจลของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

**PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES AND GELATION OF
SORGHUM STARCH AND FLOUR**

นางสาวหทัยชนก ชะนะปาโมกข์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์การอาหาร

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์และการเกิดเจลของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

Physico-chemical Properties and Gelation of Sorghum Starch and Flour

นามผู้วิจัย นางสาวหทัยชนก ชะนะปาโมกข์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

ศาสตราจารย์ ดร. ทอวง

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มาศอุบล ทองงาม, Ph.D.)

กรรมการ

ศาสตราจารย์ ดร. พงษ์

(รองศาสตราจารย์ปาริฉัตร หงสประภาส, Ph.D.)

กรรมการ

พินันท์ สัตว์วงศ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นำฝน ลำดับวงศ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

ศาสตราจารย์ ดร. สัจจอนันต์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนะบุญ สัจจอนันต์กุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

ศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ

(รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 04 เดือน เมษายน พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์และการเกิดเจลของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

Physico-chemical Properties and Gelation of Sorghum Starch and Flour

โดย

นางสาวหทัยชนก ชะนะปาโมกโช

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

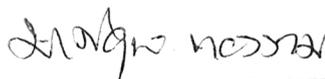
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรจารย์การอาหาร)

พ.ศ. 2551

หทัยชนก ชะนะปาโมโกโจ 2551: สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์และการเกิดเจลของสตาร์ช และแป้งข้าวฟ่าง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขา วิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ปรระธาน กรรมการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มาศอุบล ทองงาม, Ph.D. 132 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติเคมีเชิงฟิสิกส์ของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างจาก 2 สายพันธุ์ (KU 439 และ KU 804) ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณแอมิโลส กำลังการพองตัว ร้อยละการละลาย สมบัติทางความหนืด และสมบัติทางความร้อน นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของพีเอชและเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ต่อสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง โดยแป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยหยาบ และคาร์โบไฮเดรต อยู่ในช่วงร้อยละ 5.98-9.09, 0.16-0.33, 0.15-0.43, 0.10-0.34 และ 81.74-83.88 ตามลำดับ ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชพันธุ์ KU 439 และ KU 804 เท่ากับ ร้อยละ 27.76 และ 28.66 ตามลำดับ เมื่อตรวจสอบลักษณะของเม็ดสตาร์ช ข้าวฟ่างโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า เม็ดสตาร์ชข้าวฟ่างมีลักษณะกลมหลายเหลี่ยม และมีขนาดอยู่ในช่วง 10-20 ไมโครเมตร กำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างจะสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กำลังการพองตัวของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 สูงกว่า KU 804 เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ช และแป้งข้าวฟ่าง พบว่า สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 มีค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดลดลงสูงกว่า แต่มีค่าความหนืดสุดท้ายและค่าการคืนตัวต่ำกว่าสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง เท่ากับ 74.65-81.76 และ 70.84-79.75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชันของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง เท่ากับ 12.85-13.49 และ 9.07-13.66 จูลต่อกรัม ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงพีเอชมีผลต่อสมบัติการเกิดเจลของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง โดยที่พีเอช 5 เจลมีลักษณะแข็งและยืดหยุ่นมากที่สุด แต่จะลดลงเมื่อพีเอชต่ำกว่าหรือสูงกว่าพีเอช 5 และนอกจากนี้ค่าความแข็งและความยืดหยุ่นของเจลจะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อมีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยที่ความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ เจลมีความแข็งและความยืดหยุ่นสูงขึ้น แต่มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็น 1.0 โมลาร์

หทัยชนก ชะนะปาโมโกโจ
ลายมือชื่อนิติ


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

31 / มี.ค. / 51

Hathaichanok Chanapamokkho 2008: Physico-chemical Properties and Gelation of Sorghum Starch and Flour. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Masubon Thongngam, Ph.D. 132 pages.

In this study, starches and flours from two sorghum cultivars (KU 439 and KU 804) were determined for their chemical composition, amylose content, swelling power, solubility, pasting and thermal properties. Furthermore, the effect of pH and sodium chloride (NaCl) on the mechanical property of sorghum starch and flour gels were investigated. Sorghum starches and flours from both cultivars contained protein, lipid, ash, fibre and carbohydrate around 5.98-9.09, 0.16-0.33, 0.15-0.43, 0.10-0.34 and 81.74-83.88% respectively. In addition, the amylose content of KU 439 and KU 804 starches were 27.76 and 28.66% respectively. As observing by SEM, the shape of sorghum starch granules was polygonal and their sizes were around 10-20 μ m. The swelling power and solubility of starch and flour were increased with increasing temperature. Moreover, the swelling powers of sorghum starch and flours from KU 439 were higher than KU 804. The pasting properties of sorghum starches and flours were determined by using RVA. The results have shown that KU 439 starch and flour had higher peak viscosity and breakdown but lower final viscosity and setback than KU 804. The gelatinization temperature ranges of sorghum starches and flours were 74.65-81.76, 70.84-79.75 $^{\circ}$ C respectively. The enthalpy of gelatinization of sorghum starches and flours were 12.85-13.49 and 9.07-13.66 J/g respectively. The gelation properties of sorghum gels were affected by the change of pH. The results illustrate that at pH5, the hardness and elasticity of sorghum gel was the highest but decreased as the pH below or above pH 5. In addition, when the sodium chloride was present, the hardness and elasticity of sorghum gel was changed. At 0.1 M NaCl, the hardness and elasticity of gel were increased; while at 1 M NaCl, those of gel were decreased.

Hathaichanok Chanapamokkho

Student's signature

Masubon Thongngam 31 / 03 / 08

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาศอุบล ทองงาม กรรมการที่ปรึกษา เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้ความเอาใจใส่ ความเมตตา ช่วยเหลือให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนการตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปาริฉัตร หงสประภาส กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์ กรรมการที่ปรึกษาวิชาการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณมาลา พันธุ์ อาจารย์ผู้แทนบัณฑิต ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ธำรงค์ศิลป์ โปธิสูง ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์เมล็ดข้าวฟ่างที่นำมาใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่านที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทำวิจัย ขอขอบคุณ คุณกมลวรรณ อิศราคาร ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้กล้องจุลทรรศน์ รวมทั้งรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง นิสิตปริญญาโทและเอก สาขาวิทยาศาสตร์การอาหารทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติผู้ใหญ่ทุกท่านที่คอยอบรมเลี้ยงดู ให้คำปรึกษาและกำลังใจเสมอมา ตลอดจนให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าขอมอบความภาคภูมิใจและความสำเร็จนี้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ และครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคุณธรรมให้แก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอมอบส่วนที่ดีของวิทยานิพนธ์นี้ให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากวิทยานิพนธ์นี้มีข้อผิดพลาดประการใดข้าพเจ้าขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

หทัยชนก ชะนะปาโมกโข

กุมภาพันธ์ 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	48
สรุปและข้อเสนอแนะ	91
สรุป	91
ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ภาคผนวก	105
ภาคผนวก ก การสกัดสสารซ้่าวฟ้า	106
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์องค์ประกอบของสสารซ้และเป้งซ้่าวฟ้า	109
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สมบัติของสสารซ้และเป้งซ้่าวฟ้า	117
ภาคผนวก ง การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของเจตสสารซ้และเป้งซ้่าวฟ้า	128
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณองค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางความหนืดของเป้งซ้่าวฟ้า	130
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	132

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากข้าวฟ่าง	5
2	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ข้าวฟ่างที่ถูกไม่แห้ง (%โดยน้ำหนักแห้ง)	6
3	องค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดข้าวฟ่าง	10
4	องค์ประกอบทางเคมีในแป้งจากธัญพืชชนิดต่างๆ (%โดยน้ำหนักแห้ง)	10
5	สมบัติของสตาร์ชข้าวฟ่าง	11
6	ปริมาณกรดอะมิโนในข้าวฟ่าง (กรัมต่อ 16 กรัมไนโตรเจน)	13
7	ประโยชน์ของเกลือบางชนิดในอุตสาหกรรมอาหาร	28
8	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง	48
9	ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชข้าวฟ่าง	50
10	กำลังการพองตัวของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง	54
11	ร้อยละการละลายของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง	55
12	สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง	61
13	สมบัติการเกิดเจลลาคีโนเซชันของสตาร์ชข้าวฟ่าง	63
14	สมบัติการเกิดเจลลาคีโนเซชันของแป้งข้าวฟ่าง	64
15	สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวฟ่าง	65
16	สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวฟ่าง	66
17	สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 ที่พีเอชต่างๆ	73
18	สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ที่พีเอชต่างๆ	74
19	ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดที่เจลเริ่มแตกของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 ที่พีเอชต่างๆ	78
20	ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดที่เจลเริ่มแตกของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ที่พีเอชต่างๆ	79
21	สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 ที่ความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ระดับต่างๆ	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
22	สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ที่ความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ระดับต่างๆ	84
23	ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดที่เจลเริ่มแตกของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 ที่ความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ	89
24	ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดที่เจลเริ่มแตกของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ที่ความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ	90
25	สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง	93
ตารางผนวกที่		
ค1	สภาวะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเตรียมเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว	127
จ1	ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง	131

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างของเมล็ดข้าวฟ่าง	7
2	ภาพตัดขวางของส่วนรำข้าวฟ่าง ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์	8
3	โปรตีนในเอน โคสเปิร์มของข้าวฟ่าง	9
4	อนุพันธ์ของกรดเบนโซอิก (A1-6) และกรดซินนามิก (B7-11)	14
5	อนุพันธ์ของ 3-deoxyanthocyanidins	15
6	Polyflavan-3-ol	16
7	โครงสร้างของแอมิโลส (ก) และแอมิโลเพกติน (ข)	18
8	รูปแบบ X-ray diffraction pattern ของสตาร์ช	20
9	แบบแผนของโครงสร้างที่มีความเป็นไปได้ของแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชัน	24
10	ลำดับอิทธิพลของไอออนต่อการจับกับ โมเลกุลน้ำของฮอฟไมสเตอร์ (Hofmeister series)	29
11	เส้นกราฟอุดมคติของความเค้นและความเครียดที่ได้จากการวัดค่าแรงกด	34
12	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งข้าวฟ่างที่สกัดจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ 439WF และ 804WF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 และ 2,500 เท่า	51
13	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งข้าวฟ่างที่สกัดจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ผ่านกระบวนการแช่ 439SWF และ 804SWF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 และ 2,500 เท่า	52
14	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชข้าวฟ่าง 439S และ 804S ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า	53
15	กราฟแสดงลักษณะการเกิดความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439	57
16	กราฟแสดงลักษณะการเกิดความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804	57
17	ลักษณะเจลสตาร์ชข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 (439S) ที่พีเอชต่างๆ	68
18	ลักษณะเจลสตาร์ชข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 (804S) ที่พีเอชต่างๆ	68
19	ลักษณะเจลแป้งข้าวฟ่างที่พันธุ์ KU 439 (439WF) ที่พีเอชต่างๆ	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ลักษณะเจลแข็งขาวฟางพันธุ์ KU 804 (804WF) ที่พีเอชต่างๆ	69
21	ลักษณะเจลแข็งขาวฟางพันธุ์ KU 439 (439SWF) ที่พีเอชต่างๆ	70
22	ลักษณะเจลแข็งขาวฟางพันธุ์ KU 804 (804SWF) ที่พีเอชต่างๆ	70
23	การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟางพันธุ์ KU 439 และ KU 804 ที่พีเอชต่างๆ	75
24	ลักษณะ โครงสร้างของเจลสตาร์ชข้าวฟางพันธุ์ KU439 (439S) ที่เตรียมที่พีเอช 3, 5 และ 9 ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 (ก-ค) และ 2,500 (ง-ฉ) เท่า	80
25	ลักษณะ โครงสร้างของเจลแป้งข้าวฟางพันธุ์ KU439 (439WF) ที่เตรียมที่พีเอช 3, 5 และ 9 ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 (ก-ค) และ 2,500 (ง-ฉ) เท่า	81
26	การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟางพันธุ์ KU 439 และ KU 804 ที่ความเข้มข้นเกลือ โซเดียมคลอไรด์ระดับต่างๆ	85
ภาพผนวกที่		
ก1	ปริมาณแอมิโลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน	120

สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์และการเกิดเจลของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

Physico-chemical Properties and Gelation of Sorghum Starch and Flour

คำนำ

ประเทศไทยมีการเพาะปลูกข้าวฟ่างเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญ โดยจัดเป็นธัญพืชที่มีความสำคัญเป็นอันดับห้าของโลก รองจากข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี และข้าวบาร์เลย์ ข้าวฟ่างสามารถเพาะปลูกได้ง่าย และทนต่อสภาวะแห้งแล้งได้เป็นอย่างดี เหมาะสมกับภูมิอากาศของประเทศไทยที่อยู่ในเขตร้อน การใช้ประโยชน์จากข้าวฟ่างเป็นที่นิยมน้อยกว่าแพร่หลายในแถบทวีปแอฟริกาและประเทศอินเดีย โดยส่วนใหญ่นิยมนำมาประกอบเป็นอาหารหลักประจำท้องถิ่น ทดแทนการใช้แป้งข้าวสาลีที่ไม่สามารถเพาะปลูกได้ภายในประเทศ เช่น ในประเทศอินเดียนิยมใช้แป้งข้าวฟ่างทำโรติและผลิตภัณฑ์ขนมปัง (flat bread) ส่วนในแอฟริกา นิยมนำมาทำเป็นข้าวต้ม (porridge) และผลิตภัณฑ์ขนมอบหลายชนิด (Rooney and Awika, 2005) นอกจากนี้ ยังใช้เป็นวัตถุดิบหลักที่สำคัญในอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์และอาหารสัตว์ แต่ในประเทศไทยการใช้ประโยชน์จากข้าวฟ่างทางด้านอาหารยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก ส่วนใหญ่เพาะปลูกเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์และส่งออกเท่านั้น เนื่องจากประเทศไทยมีพืชหลายชนิดเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญของแป้ง เช่น ข้าว มันสำปะหลัง มันฝรั่ง ข้าวโพด และพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในประเทศไทยได้มีการศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวฟ่างในผลิตภัณฑ์อาหารมากขึ้นเช่นกัน จากการศึกษาทดลองนำข้าวฟ่างพันธุ์ต่างๆมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ปรากฏว่าได้ผลดี ผลิตภัณฑ์อาหารที่พัฒนาขึ้นมาได้มีคุณภาพและคุณค่าทางอาหารใกล้เคียง หรือดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้วัตถุดิบเดิมบางชนิด และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (ศิวาพร, 2533) แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาคูณสมบัติของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างในประเทศไทยยังมีไม่มากนัก ทำให้การใช้ประโยชน์จึงยังค่อนข้างจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาสมบัติของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง และผลของพีเอชและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. ตรวจสอบสมบัติเคมีเชิงฟิสิกส์ของสสารและแป้งข้าวฟ่าง
2. ตรวจสอบผลของการแช่เมล็ดข้าวฟ่างต่อสมบัติเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งข้าวฟ่าง
3. ตรวจสอบผลของฟิโอสและเกลือ โซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของเจลสสารและแป้งข้าวฟ่าง

การตรวจเอกสาร

1. ข้าวฟ่าง

ข้าวฟ่างเป็นพืชในวงศ์ Gramineae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Sorghum bicolor* L. Moench หรืออีกชื่อ *S. valgare* (Matz, 1991) ชื่อที่นิยมเรียก คือ Milo ซึ่งหมายถึง ข้าวฟ่างเมล็ด นอกจากนี้ข้าวฟ่าง (*Sorghum*) ยังมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปในแต่ละท้องถิ่น เช่น ชาวอินเดีย (ภาษาฮินดี) เรียกว่า jowar หรือ jaur ชาวสเปนเรียก sorgo หรือ zahina ชาวฝรั่งเศส เรียก sorgho ชาวจีนเรียก kaoliang เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีชื่ออื่นๆ อีกมากมาย เช่น milo, durra milo, milo maize, shallu, Egyptain corn, great millet และ Indian millet เป็นต้น (Doggett, 1970) ข้าวฟ่างเป็นพืชตระกูลหญ้า มีใบหยาบ ลำต้นแข็ง มีความสูงอยู่ในช่วงต่ำกว่า 1 เมตร ไปจนถึง 5 เมตร แล้วแต่พันธุ์ มีลักษณะคล้ายคลึงกับข้าวโพดมากในระยะงอกไปจนถึงก่อนออกดอก (ณัฐกฤตา, 2541)

2. การเพาะปลูกข้าวฟ่างในประเทศไทย

ในประเทศไทยเริ่มมีการเพาะปลูกข้าวฟ่างกันอย่างแพร่หลายเมื่อประมาณ 20 ปีมาแล้ว ข้าวฟ่างที่ถูกนำเข้ามาทดลองปลูกในประเทศไทยเป็นครั้งแรก เป็นข้าวฟ่างพวกเฮกการ์รี่ต้นเดี่ยว จากสหรัฐอเมริกา โดยนำเข้ามาปลูกที่สถานีบำรุงพันธุ์สัตว์ทับกวาง จังหวัดสระบุรี มีจุดประสงค์สำคัญเพื่อใช้ต้นเลี้ยงสัตว์ แต่เมื่อปลูกแล้วปรากฏว่าให้ผลผลิตเมล็ดดี และเมื่อมีตลาดต่างประเทศให้ความสนใจซื้อเมล็ดข้าวฟ่างจากประเทศไทย จากวัตถุประสงค์ของการนำข้าวฟ่างเข้ามาปลูกเพื่อใช้เลี้ยงสัตว์ จึงเปลี่ยนไปเป็นปลูกเพื่อเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญ (ธำรงศิลป์, 2530) ในปัจจุบันข้าวฟ่างมีการเพาะปลูกเป็นอย่างมากในหลายจังหวัด เนื่องจากข้าวฟ่างเป็นพืชที่เพาะปลูกได้ง่าย ใช้น้ำน้อย สามารถทนต่อสภาพแห้งแล้งได้ดี ซึ่งเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย โดยจังหวัดที่มีการเพาะปลูกข้าวฟ่างอย่างมาก ได้แก่ จังหวัดลพบุรี นครสวรรค์ เพชรบูรณ์ สระบุรี อุทัยธานี และนครราชสีมา เป็นต้น พันธุ์ข้าวฟ่างที่มีการเพาะปลูกในปัจจุบันมีทั้งพันธุ์แท้และพันธุ์ลูกผสม อาทิ เช่น พันธุ์เฮกการ์รี่หนัก พันธุ์เฮกการ์รี่เบา พันธุ์สุพรรณบุรี 60 พันธุ์สุพรรณบุรี 1 พันธุ์อุทอง 1 (DA 80) พันธุ์เค.ยู. 439 พันธุ์เค.ยู. 804 พันธุ์เค.ยู. 630 และ พันธุ์เค.ยู. 8501 เป็นต้น (ธำรงศิลป์, 2530)

3. การใช้ประโยชน์ของข้าวฟ่าง

การใช้ประโยชน์จากข้าวฟ่างในผลิตภัณฑ์อาหารมีมานานกว่า 2000 ปี โดยประเทศที่มีการบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากข้าวฟ่าง ได้แก่ ประเทศในแถบทวีปแอฟริกา อินเดีย จีน และบางประเทศในยุโรป การนำข้าวฟ่างมาทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสามารถใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้ในรูปของแป้ง สตาร์ช หรือใช้ทั้งเมล็ด ดังแสดงในตารางที่ 1 ในปัจจุบันนิยมนำข้าวฟ่างมาโม่แบบแห้ง โดยทำในลักษณะการบดข้าวโพดหรือข้าวสาลี หรือการขัดสีเปลือกออกแบบข้าวสาลี แล้วจึงนำเมล็ดข้าวฟ่างที่ขัดเปลือกออกแล้วมาบด ผลผลิตที่ได้จากการบดจะมีคุณค่าทางอาหารแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2 และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้านทั้งการนำไปประกอบอาหารชนิดต่างๆ ตามความนิยมของท้องถิ่น เช่น ในอินเดียนำแป้งข้าวฟ่างที่บดทั้งเมล็ด ปั่นและกดเป็นแผ่นกลมบางแล้วนำไปปิ้งหรือทอดหรืออบ และชาวจีนนิยมนำแป้งข้าวฟ่างไปทำขนมปัง นอกจากนี้ข้าวฟ่างมักนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเช้า และอาหารสำเร็จรูป โดยการขัดเปลือกเมล็ดข้าวฟ่างหรือใช้กรดหรือด่างเพื่อให้ได้เมล็ดที่มีเส้นใยต่ำ จากนั้นนำไปบดหยาบและทำให้สุก ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ข้าวต้ม โจ๊ก และอาหารสำหรับเด็กทารก หรืออาจนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบชนิดต่างๆ เช่น ขนมปัง เค้ก คุกกี้ มัฟฟิน และโรตีสานี่ สำหรับแป้งจากข้าวฟ่างข้าวเหนียว มักใช้เป็นสารทำให้ข้น (thickening agent) เช่น ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารบรรจุกระป๋อง ซึ่งแป้งเปียกจากข้าวฟ่างชนิดนี้มีความคงตัวในอาหารกระป๋องมากกว่าแป้งธรรมชาติทั่วไป หรืออาจใช้เป็นสารยึดในไส้กรอก (sausage binder) โดยเป็นตัวเชื่อมส่วนประกอบต่างๆ ของไส้กรอกเข้าด้วยกัน คุณค่าที่เพิ่มขึ้นจากน้ำแข็งที่ใช้ในการสับเนื้อสัตว์ และเป็น emulsifying agent ระหว่างไขมัน โปรตีนและความชื้น ส่วนการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ สามารถนำข้าวฟ่างมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมกระดาษและการผลิตแอลกอฮอล์ เช่น ผลิตภัณฑ์ช็อคโกแลตและกรดแลคติก หรือทำมอลต์ข้าวฟ่างเพื่อใช้ในการผลิตเบียร์ เป็นต้น (ณัฐฤตา, 2541)

แต่อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากข้าวฟ่างทางด้านอาหาร มักพบปัญหาด้านคุณภาพการย่อย โดยพบว่าอาหารที่ทำจากแป้งข้าวฟ่างมีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ เนื่องจากโปรตีนและสตาร์ชจะถูกย่อยได้ยากขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนระหว่างการแปรรูป ซึ่งปัญหาคคุณภาพของการย่อยโปรตีนและสตาร์ชนี้ เป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีในแป้งข้าวฟ่าง (Duodu *et al.*, 2003)

ตารางที่ 1 ผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากข้าวฟ่าง

ประเภทของอาหาร	ชื่ออาหาร	วัตถุดิบ	ประเทศ
Unfermented bread	Roti	แป้ง	อินเดีย
	Tortilla	เมล็ด	เม็กซิโก
Fermented bread	Kisra, Dosa, Dosai (pan cake)	แป้ง	แอฟริกา ชูดาน อินเดีย
	Injera	แป้งทั้งเมล็ด	เอธิโอเปีย
Stiff porridge (ข้าวต้ม)	Sangati, Ugali, tuwo, saino Dalaki, aceda, atap, bogobe	แป้ง	แอฟริกา อินเดีย
Thin porridge (ข้าวต้ม)	Ambali, Ogi, oko, akamu, kafa Koko, akasa, nasha	แป้ง	แอฟริกา อินเดีย กาน่า ไนจีเรีย เม็กซิโก
Steamed cooked products	Couscous	แป้ง	แอฟริกา
Boiled whole or pearled	Acha, snkati, mudde, kali, piti	เมล็ด	แอฟริกา อินเดีย
Snack foods		เมล็ด, แป้ง	ทั่วโลก
Alcoholic beverage	Burukutu, doto, pito, talla	เมล็ด	แอฟริกา
Sour/opaque beer	Marisa, busaa, merisa	ข้าวฟ่างมอลต์	แอฟริกา

ที่มา: Rooney and Serna-Saldivar (2000)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ข้าวฟ่างที่ถูกโม่แห้ง (%โดยน้ำหนักแห้ง)

ผลิตภัณฑ์ได้	โปรตีน (%)	ไขมัน (%)	เส้นใย (%)	เถ้า (%)
ข้าวฟ่างทั้งเมล็ด	9.6	3.4	2.2	1.5
ข้าวฟ่างขัดผิวแล้ว	9.5	3.0	1.3	1.2
แป้งข้าวฟ่าง-หยาบ	9.5	2.5	1.2	1.0
แป้งข้าวฟ่าง-ละเอียด	9.5	1.0	1.0	0.8
ข้าวฟ่างบดหยาบใช้ทำเบียร์	9.5	0.7	0.8	0.4
เปลือกข้าวฟ่าง	8.9	5.5	8.6	2.4
คัพภะข้าวฟ่าง	15.1	20.0	2.6	8.2
ส่วนที่ใช้เลี้ยงสัตว์	11.2	6.5	3.8	2.7

ที่มา: Hahn (1969)

4. โครงสร้างของเมล็ดข้าวฟ่าง

เมล็ดข้าวฟ่างที่เอากาบหุ้มเมล็ดออกแล้ว ส่วนใหญ่มีรูปร่างกลมหรือกลมรี มีขนาดทั่วไปโดยเฉลี่ยประมาณ 4.0 x 2.5 x 3.5 มิลลิเมตร น้ำหนักเมล็ดแปรผันจาก 8 ถึง 50 มิลลิกรัม มี 12,000-18,000 เมล็ดต่อปอนด์ มีทั้งพันธุ์เมล็ดขาวและพันธุ์เมล็ดแดง เนื้อเมล็ดและโครงสร้างภายในแต่ละส่วนของเมล็ดข้าวฟ่างสามารถแปรผันไปตามปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมที่ปลูก และลักษณะทางพันธุศาสตร์ โครงสร้างของเมล็ดข้าวฟ่างประกอบด้วย 3 ส่วน คือ เพอริคาร์พ (pericarp) เอนโดสเปิร์ม (endosperm) และคัพภะ (germ) (Rooney and Sullins, 1977) ดังแสดงในภาพที่ 1

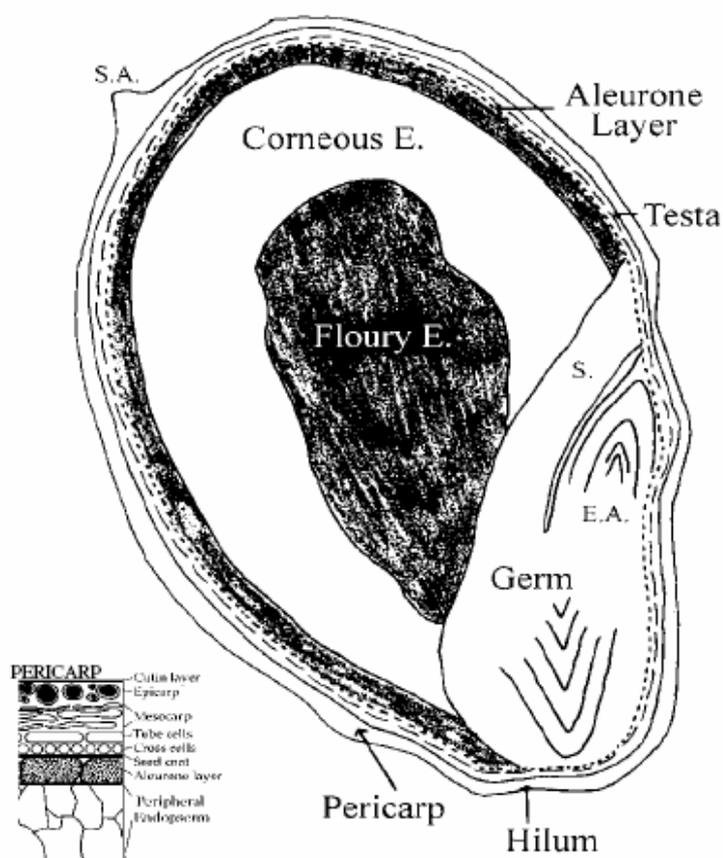
(1) เพอริคาร์พ (pericarp) เป็นส่วนของเปลือกหุ้มผลที่อยู่ชั้นนอกสุด องค์ประกอบที่อยู่ในส่วนนี้ได้แก่ เซลลูโลส เพนโทแซน รงควัตถุ แร่ธาตุ โปรตีน และไขมัน (Waniska, 2000) โดยแบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ

- ชั้นเอพิการ์พ (epicarp) ซึ่งเป็นชั้นที่อยู่ชั้นนอกสุด ชั้นนี้มักมีสารพอกขี้ผึ้ง (wax) และบางครั้งอาจมีสารรงควัตถุอยู่ด้วย ชั้นนี้มักจะประกอบด้วยชั้นเซลล์หนา 2-3 ชั้น เซลล์เหล่านี้ยาวและมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า อย่างไรก็ตาม ถ้าเนื้อเมล็ดถูกห่อหุ้มอยู่ภายใต้กาบหุ้มเมล็ดที่มีรงควัตถุ

โดยรงควัตถุจำนวนหนึ่งอาจถูกชะผ่านเอพิคาร์พเข้าไปในเนื้อเยื่อเอนโดสเปิร์มระหว่างการโม่แห้ง ข้าวฟ่างให้เป็นแป้ง รงควัตถุเป็นสาเหตุที่ทำให้มีสีติดค้างใน grits หรือแป้ง

- ชั้นมีโซคาร์พ (mesocarp) เป็นชั้นกลางที่มีโปรตีน และเม็ดสตา์ขนาดเล็ก แทรกอยู่ภายในชั้นนี้

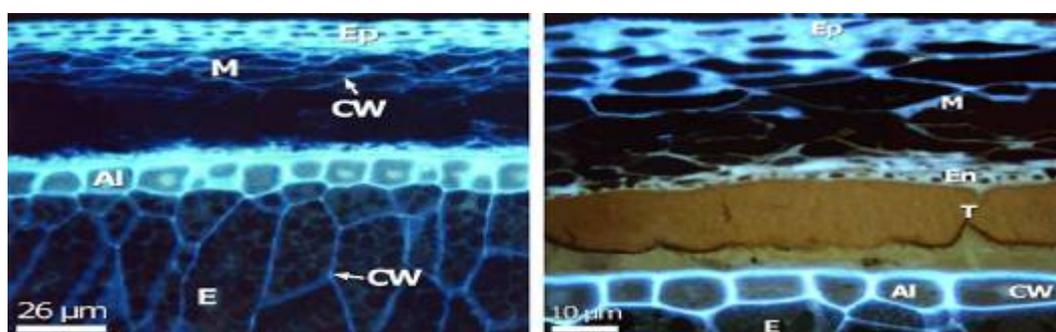
- ชั้นเอนโดคาร์พ (endocarp) ชั้นนี้จะประกอบด้วยเซลล์ขวาง (cross cells) และเซลล์แท่ง (tube cells) ซึ่งทำหน้าที่ในการถ่ายเทความชื้น และเซลล์นี้เป็นจุดแตกหักเมื่อเพอริคาร์พถูกแยกออกระหว่างการโม่เมล็ด



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเมล็ดข้าวฟ่าง

ที่มา: Waniska (2000)

(2) เปลือกใน (testa) เป็นชั้นของเปลือกในที่ห่อหุ้มเมล็ดเอาไว้ ซึ่งจะอยู่ใต้ชั้นเพอริคาร์พ ในชั้นนี้มีสารรงควัตถุอยู่มาก ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบแทนนิน โดยชั้น testa นี้จะพบในเมล็ดข้าวฟ่างบางชนิดเท่านั้น โดยข้าวฟ่างพันธุ์ที่ไม่มีแทนนิน จะไม่พบชั้น testa นี้ ดังแสดงในภาพที่ 2ก จะเห็นได้ว่าข้าวฟ่างพันธุ์ที่ไม่มีแทนนินจะไม่พบชั้นของ testa ส่วนข้าวฟ่างพันธุ์ที่มีแทนนินจะมีแทนนินสะสมอยู่ในชั้นของ Testa (ภาพที่ 2ข) นอกจากสารรงควัตถุแล้วชั้นนี้ยังประกอบด้วย โปรตีน แร่ธาตุ เพนโทแซน เซลลูโลส และไขมัน แต่มีปริมาณน้อยกว่าชั้นเพอริคาร์พ (Waniska, 2000)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 2 ภาพตัดขวางของส่วนรำข้าวฟ่าง ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนส์

หมายเหตุ (ก) ข้าวฟ่างพันธุ์ที่ไม่มีแทนนิน (ข) ข้าวฟ่างพันธุ์ที่มีแทนนิน

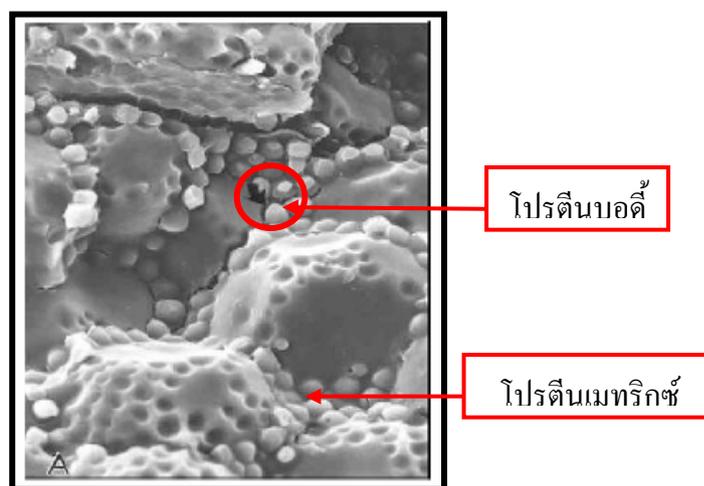
ที่มา: Joseph and Rooney (2004)

(3) เอนโดสเปิร์ม (endosperm) เป็นส่วนของเนื้อเยื่อสะสมภายในเมล็ด เป็นส่วนที่เก็บสะสมอาหารไว้สำหรับต้นอ่อน โครงสร้างของเอนโดสเปิร์มของข้าวฟ่างประกอบด้วยชั้นแอลิวโรน (aleurone) เพอริเฟอรอล (peripheral) คอร์เนียสเอนโดสเปิร์ม (corneous endosperm) และฟลาวรีเอนโดสเปิร์ม (floury endosperm) (Waniska, 2000)

- แอลิวโรน (Aleurone) เป็นชั้นของเยื่อหุ้มเมล็ด ชั้นนี้ประกอบด้วยโปรตีน มีทั้งอยู่ในรูปโปรตีนบอดี (protein body) และเอนไซม์ ซึ่งโปรตีนที่อยู่ในชั้นนี้มีกรดอะมิโนที่จำเป็นมากกว่าโปรตีนในเอนโดสเปิร์ม นอกจากนี้ยังมีเถ้าและน้ำมันอยู่ในชั้นนี้ด้วย (Waniska, 2000)

- เพอริเฟอรอล (peripheral) ประกอบด้วยเซลล์หลายชั้นที่อยู่รวมกันอย่างหนาแน่น องค์ประกอบที่อยู่ในส่วนนี้ คือ โปรตีน และเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กกว่าสตาร์ชในส่วนคอร์เนียส-เอนโดสเปิร์ม และฟลาวรีเอนโดสเปิร์ม (Waniska, 2000)

- คอร์เนียสเอนโดสเปิร์ม (corneous endosperm) และฟลาวรีเอนโดสเปิร์ม (floury endosperm) เป็นส่วนของเนื้อเมล็ด ที่ประกอบด้วยสตาร์ชและโปรตีน โดยโปรตีนที่พบในชั้นเอนโดสเปิร์มนี้มีอยู่ 2 ลักษณะ คือ เกาะรวมกันเป็นเม็ดกลมหรือที่เรียกว่า โปรตีนบอดี (protein bodies) และเกาะเกี่ยวกันเป็นร่างแหเชื่อมระหว่างเม็ดสตาร์ชและโปรตีนบอดี เรียกว่า โปรตีนเมทริกซ์ (protein matrix) ดังแสดงในภาพที่ 3 (Waniska, 2000)



ภาพที่ 3 โปรตีนในเอนโดสเปิร์มของข้าวฟ่าง

ที่มา: Hamaker and Bugusu (2003)

(4) คัพกะ (germ) เป็นส่วนที่อยู่ของเอ็มบริโอที่จะเจริญเป็นต้นอ่อนต่อไป ในส่วนนี้จะมีสารอาหารสะสมไว้สำหรับต้นอ่อน ซึ่งประกอบด้วย ไขมัน โปรตีน เอนไซม์ และแร่ธาตุ (Waniska, 2000)

5. องค์ประกอบทางเคมีในข้าวฟ่าง

องค์ประกอบทางเคมีในข้าวฟ่างจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของข้าวฟ่างพันธุ์ต่างๆ ที่มีความแตกต่างกันทั้งทางด้านขนาด รูปร่าง ความหนาแน่น น้ำหนัก และสี โดยข้าวฟ่างมีองค์ประกอบ

กอบทางเคมีของเมล็ดทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และเส้นใย ในแป้งจากแหล่งธัญพืชชนิดอื่นๆ ข้าวฟ่างมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดข้าวฟ่าง

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนักแห้ง
สตาร์ช	70.2
โปรตีน (Nx6.25)	12.5
ไขมัน	3.4
เถ้า	2.2
เส้นใยหยาบ	2.7
น้ำตาล (เดกซ์โทรส)	1.4
แทนนิน	0.003-0.17
ใย	0.2
เพนโทแซน	2.5

ที่มา: Miller (1958)

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีในแป้งจากธัญพืชชนิดต่างๆ (%โดยน้ำหนักแห้ง)

ธัญพืช	คาร์โบไฮเดรต (%)	โปรตีน (%)	เส้นใย (%)
แป้งข้าวฟ่าง	73.5	10.4	4.7
แป้งข้าวเจ้า	83.7	6.1	1.1
แป้งข้าวสาลี	75.1	10.3	3.0
แป้งข้าวโพด	73.0	7.6	4.6
แป้งมิลเลต	65.7	8.0	6.2

ที่มา: คัดแปลงมาจาก Barikmo *et al.* (2004)

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในข้าวฟ่าง ได้แก่ สตาร์ช โปรตีน และสารรงควัตถุ

1. สตาร์ช

ในข้าวฟ่าง มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบประมาณ 70-75% โดยทั่วไปสมบัติของสตาร์ชข้าวฟ่างคล้ายกับสตาร์ชข้าวโพดทั้งลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช ปริมาณแอมิโลส แอมิโลเพกติน การเกิดเจลลิตินเซชัน และสมบัติทางความหนืด ในปี 1984 Watson ได้สรุปสมบัติของสตาร์ชข้าวฟ่างไว้ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมบัติของสตาร์ชข้าวฟ่าง

สมบัติ	สตาร์ชข้าวฟ่าง
ขนาดของเม็ดสตาร์ช (ไมครอน)	4-25
ปริมาณแป้ง (%)	88
ปริมาณแอมิโลส (%)	28
ปริมาณแอมิโลเพกติน (%)	72
ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินเซชัน (°C)	68-75
กำลังการพองตัวที่ 95 °C	22
ความสามารถในการละลายที่ 95 °C (%)	22
ความถ่วงจำเพาะ	1.5
น้ำหนักต่อ 1 ลูกบาศก์ฟุต (ปอนด์)	44.45

ที่มา: Watson (1984)

2. โปรตีน

ข้าวฟ่างมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบประมาณ 6-12% ส่วนใหญ่พบได้ในส่วนของเอนโดสเปิร์ม และสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท ตามความสามารถในการละลาย ดังนี้

- อัลบูมิน (albumins) เป็นโปรตีนที่ละลายในน้ำ
- โกลบูลิน (globulins) เป็นโปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ

- โพรลามิน (prolamines) เป็นโปรตีนที่ละลายในสารละลายเอธานอล
- กลูเตลิน (glutelins) เป็นโปรตีนที่ละลายในสารละลายต่างเจือจาง

ปริมาณของโปรตีนแต่ละชนิดที่พบในข้าวฟ่างจะมีอัลบูมิน โกลบูลิน โพรลามิน และกลูเตลินประมาณ 1.3-7.7, 2.0-9.3, 32.6-58.8 และ 19.0-37.4 เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนทั้งหมดในเมล็ด ตามลำดับ (Youssef, 1998) เมื่อวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดอะมิโนในโปรตีนทั้งหมดนั้น จะพบว่ามีปริมาณไลซีน ทรีโอนีน เมไทโอนีน อาร์จินีน ฮิสทีดีน ไกลซีน และไทโรซีนน้อย แต่มีลิวซีน กรดกลูตามิก โพรลีน และกรดแอสพาร์ติกมาก ดังแสดงในตารางที่ 6

โปรตีนหลักที่พบมากที่สุดในข้าวฟ่าง คือ โปรตีนประเภทโพรลามินที่ละลายได้ดีในสารละลายแอลกอฮอล์ และมีชื่อเรียกอีกชื่อว่า คาฟิริน (kafirin) โดยจะสะสมอยู่ในเอนโดสเปิร์ม มีลักษณะเป็นโปรตีนบอดี (protein body) โปรตีนคาฟิรินแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ แอลฟา-คาฟิริน (α -kafirin), เบต้า-คาฟิริน (β -kafirin) และแกมมา-คาฟิริน (γ -kafirin) ซึ่งแบ่งตามน้ำหนักโมเลกุล ความสามารถในการสกัด และลักษณะโครงสร้างของโปรตีน คาฟิรินทั้ง 3 ชนิดนี้จะอยู่รวมกันภายในโปรตีนบอดี และมีพันธะไดซัลไฟด์เป็นจำนวนมาก (Hamaker and Bugusu, 2003) เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดอะมิโนในโปรตีนคาฟิรินทั้ง 3 ชนิด พบว่า โปรตีนคาฟิรินแต่ละชนิดมีปริมาณของกรดอะมิโนซิสเตอีน (cysteine) แตกต่างกัน โดยแอลฟา-คาฟิริน มีกรดอะมิโนซิสเตอีนระดับต่ำ ในขณะที่เบต้า-คาฟิริน และแกมมา-คาฟิรินมีกรดอะมิโนซิสเตอีนในระดับสูงมาก (Shull *et al.*, 1992) จากการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ที่จำเพาะกับลำดับกรดอะมิโน พบว่า โปรตีนแกมมา-คาฟิรินมีกรดอะมิโนซิสเตอีน 14 หน่วย (de Barros *et al.*, 1991)

มีรายงานว่าโปรตีนคาฟิรินในข้าวฟ่างมีลักษณะโครงสร้าง และสมบัติคล้ายกับโปรตีนซีน (zein) ในข้าวโพดอย่างมาก และจัดเป็นโปรตีนประเภทโพรลามินเช่นเดียวกัน (de Rose *et al.*, 1989) การใช้ประโยชน์จากโปรตีนคาฟิรินที่พบส่วนใหญ่ คือ นำไปทำเป็นฟิล์มเคลือบผักและผลไม้ที่สามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable flim) (Buffo *et al.*, 1997) เนื่องจากโครงสร้างของโปรตีนคาฟิรินมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มาก และถูกย่อยสลายได้ยาก ดังนั้นจึงมีศักยภาพในการเป็นสารไบโอโพลีเมอร์ (biopolymer) ที่สามารถใช้เคลือบเป็นฟิล์มได้ (Emmambux *et al.*, 2004)

ตารางที่ 6 ปริมาณกรดอะมิโนในข้าวฟ่าง (กรัมต่อ 16 กรัมไนโตรเจน)

องค์ประกอบ	ข้าวฟ่างสายพันธุ์ Monitor
ไนโตรเจน	2.25
ไกลซีน	2.8
อะลานีน	9.5
วาลีน	5.3
ลิวซีน	13.8
ไอโซลิวซีน	4.2
เซอรีน	4.7
ทรีโอนีน	3.2
ไทโรซีน	3.9
เฟนิลอะลานีน	5.5
ทรีปโทเฟน	1.05
โพรลีน	8.3
เมทไอนีน	1.35
ซิสทีน	1.85
ไลซีน	2.05
ฮิสทีดีน	2.3
อาร์จินีน	3.7
กรดแอสพาร์ติก	7.7
กรดกลูตามิก	22.4
ผลรวมของไนโตรเจน	95.6

หมายเหตุ ปริมาณไนโตรเจน = ปริมาณไนโตรเจนในเมล็ด (กรัม/100 กรัมน้ำหนักแห้งของกรดนั้น)

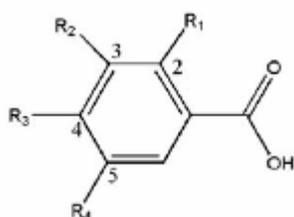
ที่มา: Mosse (1988)

3. รวงควัตถุ

ข้าวฟ่างต่างพันธุ์กันจะมีสีเปลือกที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับสารรงควัตถุที่อยู่ในเมล็ดข้าวฟ่าง ซึ่งสารรงควัตถุอาจติดไปกับเนื้อเมล็ดที่แตกหัก (grits) ระหว่างการโม่แห้ง และติดไปกับสตาร์ช และโปรตีนในระหว่างการโม่เปียก สารรงควัตถุส่วนใหญ่ในข้าวฟ่างเป็นสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เมล็ดและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งข้าวฟ่างมีรสชาติขมและมีสีคล้ำไม่เป็นที่ต้องการ นอกจากนี้ยังมีผลต่อการย่อยโปรตีนข้าวฟ่างและอาจเป็นพิษต่อสัตว์เมื่อนำไปให้สัตว์บริโภค สารประกอบฟีนอลิกที่พบในข้าวฟ่างมี 3 ชนิด ได้แก่ กรดฟีนอลิก แอนโทไซยานิน และแทนนิน (Awika and Rooney, 2004)

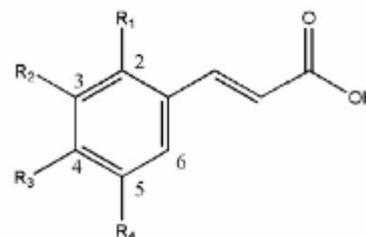
3.1 กรดฟีนอลิก (phenolic acid)

กรดฟีนอลิกที่พบในข้าวฟ่างส่วนใหญ่เป็นสารอนุพันธ์ของกรดเบนโซอิก (benzoic) และกรดซินนามิก (cinnamic) ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งจะพบมากในส่วนของรำข้าว (Awika and Rooney, 2004)



A. Benzoic acids (1-6)

- Gallic acid (1) : $R_1=H, R_2=R_3=R_4=OH$
 Gentisic acid (2) : $R_1=R_4=OH, R_2=R_3=H$
 Salicylic acid (3) : $R_1=OH, R_2=R_3=R_4=H$
 p-hydroxybenzoic acid (4) : $R_1=R_2=R_4=H, R_3=OH$
 Syringic (5) : $R_1=H, R_2=R_4=OCH_3, R_3=OH$
 Protocatechuic (6) : $R_1=R_4=H, R_2=R_3=OH$



B. Cinnamic acids (7-11)

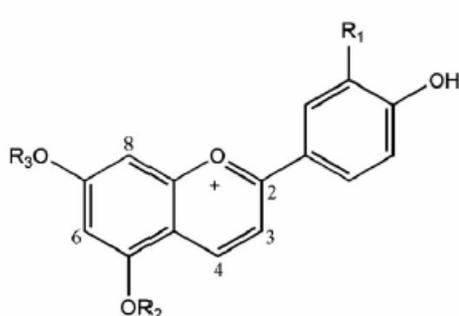
- Caffeic acid (7) : $R_1=R_4=H, R_2=R_3=OH$
 Ferulic acid (8) : $R_1=R_4=H, R_2=OCH_3, R_3=OH$
 o-coumaric acid (9) : $R_1=OH, R_2=R_3=R_4=H$
 p-coumaric acid (10) : $R_1=R_2=R_4=H, R_3=OH$
 Sinapic (11) : $R_1=H, R_2=R_4=OCH_3, R_3=OH$

ภาพที่ 4 อนุพันธ์ของกรดเบนโซอิก (A1-6) และกรดซินนามิก (B7-11)

ที่มา: Awika and Rooney (2004)

3.2 แอนโทไซยานิน (anthocyanin)

แอนโทไซยานินที่พบในข้าวฟ่างส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของ 3-deoxyanthocyanidins ดังภาพที่ 5 ซึ่งสารแอนโทไซยานินนี้พบมากในผักและผลไม้ เช่น องุ่นแดง บลูเบอร์รี่ และราสเบอร์รี่ เป็นต้น ส่วนในข้าวฟ่างมักพบแอนโทไซยานินในส่วนของเพอริคาร์พ (Awika and Rooney, 2004)



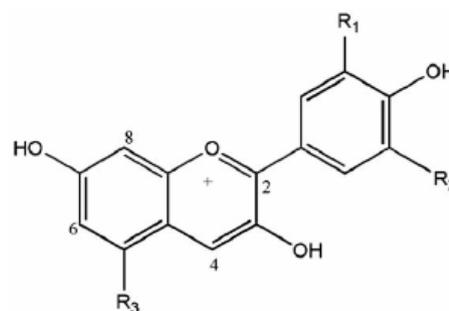
Apigeninidin (1) : $R_1=H, R_2=H, R_3=H$

Apigeninidin-5-glucoside (2) : $R_1=H, R_2=Glc, R_3=H$

Luteolinidin (3) : $R_1=OH, R_2=H, R_3=H$

Luteolinidin-5-glucoside (4) : $R_1=OH, R_2=Glc, R_3=H$

7-O-methyl apigeninidin (5) : $R_1=H, R_2=H, R_3=CH_3$



$R_3=H$:

Fisetinidin (6) : $R_1=OH, R_2=OH$

$R_3=OH$

Cyanidin (7) : $R_1=OH, R_2=H$

Pelargonidin (8) : $R_1=H, R_2=H$

Peonidin (9) : $R_1=OCH_3, R_2=H$

Malvidin (10) : $R_1=OCH_3, R_2=OCH_3$

Delphinidin (11) : $R_1=OH, R_2=OH$

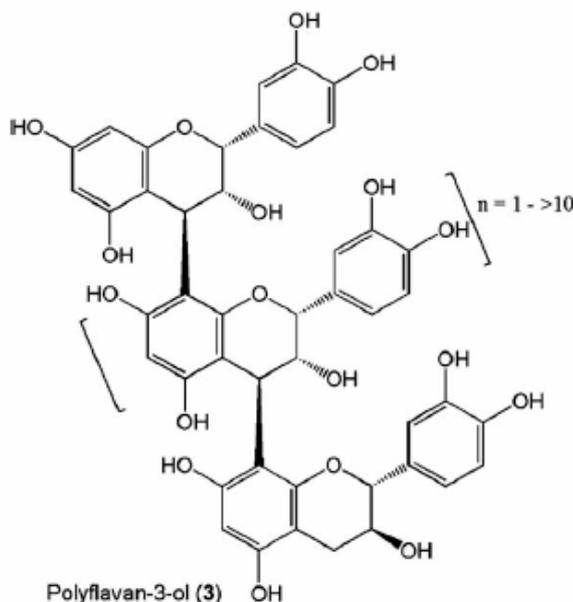
Petunidin (12) : $R_1=OCH_3, R_2=OH$

ภาพที่ 5 อนุพันธ์ของ 3-deoxyanthocyanidins

ที่มา: Awika and Rooney (2004)

3.3 แทนนิน (tannin)

แทนนินที่พบในข้าวฟ่างส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป “condensed tannin” ซึ่งเกิดจากการโพลีเมอไรซ์เช่ระหว่างสารประกอบ flavan-3-ols และ/หรือ flavan-3,4-diols ดังแสดงในรูปที่ 6



ภาพที่ 6 Polyflavan-3-ol

ที่มา: Awika and Rooney (2004)

ถึงแม้ว่าสารประกอบฟีนอลิกเหล่านี้จะมีผลในทิศทางตรงข้ามต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากแป้งข้าวฟ่าง แต่สารเหล่านี้มีสมบัติในการเป็นสารต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidant) ได้ดี ดังนั้นในปัจจุบันนักวิจัยส่วนใหญ่จึงให้ความสนใจในสารประกอบฟีนอลิกเหล่านี้ในด้านสุขภาพมากขึ้น พบว่า สารประกอบฟีนอลิกในข้าวฟ่างมีส่วนช่วยลดความเสี่ยงในการเป็นโรคหัวใจ โรคอ้วน และโรคเบาหวานที่เกิดขึ้นในสัตว์ได้ และนอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งในคน ได้เช่นเดียวกัน (Awika and Rooney, 2004)

6. คุณสมบัติพื้นฐานของสตาร์ช

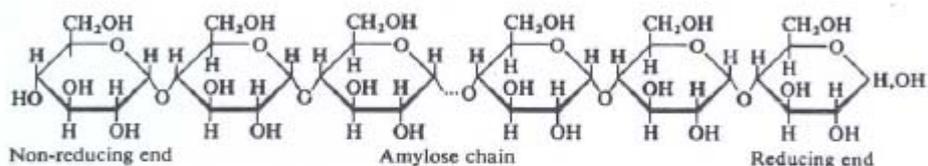
6.1 องค์ประกอบภายในเม็ดสตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ เรียกว่า reducing end group สตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (แอมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (แอมิโลเพกติน) สตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของสตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกัน (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543)

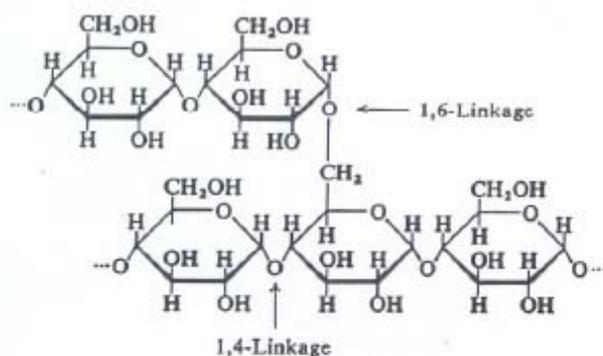
แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นของ glucopyranose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glucosidic linkage ดังภาพที่ 7 แอมิโลสในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป (Young, 1984) มีรายงานว่า Degree of polymerization (DP) ของแอมิโลสอยู่ในช่วง 1,400 ถึง 17,000 หน่วยกลูโคส แอมิโลสเป็นโมเลกุลที่มีความยืดหยุ่น สามารถเคลื่อนที่ได้ และประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก จึงทำให้สามารถจับกับโมเลกุลชนิดอื่นได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน (French, 1979) เช่น ในโครงสร้างเจลโมเลกุลของแอมิโลสจะจับกับโมเลกุลของสตาร์ชชนิดอื่นด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ และนอกจากนี้ยังสามารถจับกับโมเลกุลชนิดอื่นได้ เช่น การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน (Bowers, 1992) ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนนี้มีความคงทนมาก การทำลายพันธะนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 100 องศาเซลเซียส (Kugimiya *et al.*, 1980)

แอมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 6-glucosidic linkage (Bowers, 1992) ดังแสดงในภาพที่ 7 โมเลกุลแอมิโลเพกตินประกอบขึ้นจากสายโซ่หลักหนึ่งสายเรียกว่า C chain ซึ่งจะมีหมู่ reducing end หนึ่งหมู่ สายกิ่งที่เข้ามาต่อกับ C chain เรียกว่า B chain ซึ่งมีจำนวนมาก ส่วนสายที่เข้ามาต่อกับสาย B chain และอยู่ชั้นนอกสุดเรียกว่า A chain โดยทั่วไปโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแอมิโลเพกตินจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของสตาร์ช (Whistler and BeMiller, 1999)

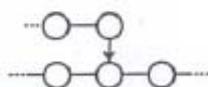
ก)

Symbolic representation
of an amylose chain

ข)



Branch point in amylopectin or glycogen

Symbolic representation of a
branch point in amylopectin or glycogen

ภาพที่ 7 โครงสร้างของแอมิโลส (ก) และแอมิโลเพกติน (ข)

ที่มา: French (1979)

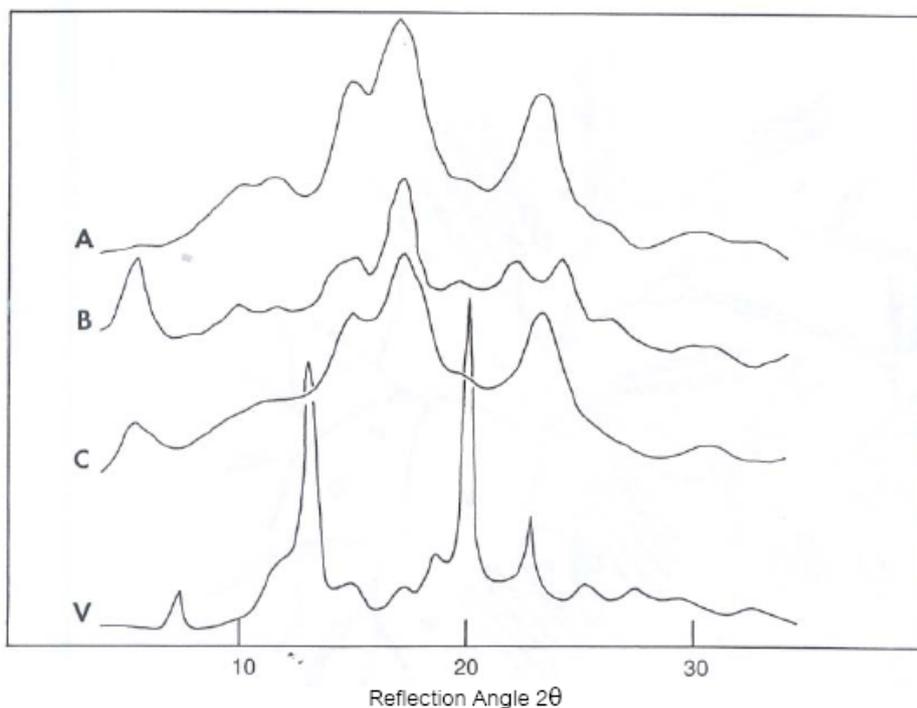
6.2 โครงสร้างผลึกและส่วนอสัณฐานภายในเม็ดสตาร์ช

เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็น semi-crystalline คือ มีส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนอสัณฐาน (amorphous) ส่วนที่เป็นผลึกเกิดจากการพันเกลียวคู่ของสายแอมิโลเพกตินที่อยู่ใกล้เคียงกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งส่วนผลึกนี้เป็นส่วนที่ทำให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงสามารถคงรูปร่างของเม็ดสตาร์ชไว้ได้ สำหรับส่วนอสัณฐานเป็นส่วนที่ยืดเกาะชั้นผลึกไว้ด้วยกัน และเป็นส่วนที่สร้างความยืดหยุ่นให้กับเม็ดสตาร์ช (Morrison *et al.*, 1994) ดังนั้นส่วนโครงสร้างผลึกของ

โมเลกุล แอมิโลเพกตินจึงเป็นส่วนหลักในการแสดงค่าความเป็นผลึกให้แก่เม็ดสตาร์ช (วารางคณา, 2544)

รูปแบบ X-ray diffraction pattern สามารถใช้จำแนกสตาร์ชตามโครงสร้างผลึก ซึ่งความแตกต่างของโครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ชจะเกี่ยวข้องกับความยาวของกิ่งแอมิโลเพกติน โดยสามารถจำแนกสตาร์ชได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) A-type X-ray pattern จะมีกิ่งของแอมิโลเพกตินสั้น (DP เท่ากับ 19-28) เช่น สตาร์ชข้าว เผือก มันสำปะหลัง 2) B-type X-ray pattern จะมีกิ่งของแอมิโลเพกตินยาว (DP เท่ากับ 29-31) เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง ข้าวโพดที่มีปริมาณแอมิโลสสูง และ 3) C-type X-ray pattern มีลักษณะโครงสร้างอยู่ระหว่าง A-type และ B-type โดยมีกิ่งของแอมิโลเพกตินที่สั้นและยาวผสมกัน (DP เท่ากับ 25-27) เช่น สตาร์ชกล้วย (Spence and Jane, 1999) นอกจาก A, B และ C-type แล้ว บางครั้งยังปรากฏลักษณะ V-type ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อนที่เกิดจากการจับกันของแอมิโลสและแอลกอฮอล์ที่เป็นเส้นตรง ไอโอดีน หรือกรดไขมัน (Bear, 1942) ลักษณะ V-type นี้จะพบในแป้งที่มีปริมาณแอมิโลสมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 40 เช่น ในสตาร์ชข้าวโพดที่มีการตัดแปลงพันธุกรรม (Eliasson, 1996) ภาพที่ 8 แสดงรูปแบบ X-ray diffraction pattern ของสตาร์ช

สตาร์ชที่มีรูปแบบของ X-ray diffraction pattern เป็นชนิด A-type ได้แก่ สตาร์ชจากธัญพืชและราก สามารถสังเกตได้จากกราฟ คือ ไม่มีพีคที่มุมหักเห (diffraction angle) ที่ 5.6° แต่มีพีคเดี่ยวที่มุม 17° และ 17.9° และพีคเดี่ยว (singlet) ที่ 23° สตาร์ชชนิด B-type ได้แก่ สตาร์ชจากพืชหัวสามารถสังเกตได้จากกราฟ คือ จะมีพีคขนาดเล็กที่มุมหักเหที่ 5.6° มีพีคเดี่ยว (singlet) ที่มุม 17° และ 17.9° และมีพีคคู่ (doublet) ที่ 23° ส่วนสตาร์ชชนิด C-type จะมีลักษณะของกราฟอยู่ระหว่าง A-type และ B-type คือ มีพีคขนาดเล็กที่มุมหักเหที่ 5.6° มีพีคเดี่ยวที่มุม 17° และ 17.9° และมีพีคเดี่ยวที่ 23° (นิตี, 2543)



ภาพที่ 8 รูปแบบ X-ray diffraction pattern ของดาวรีซ

ที่มา: Bowers (1992)

6.3 การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำจากบรรยากาศ จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดสตาร์ชกับความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ สตาร์ชดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลีนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชที่อยู่ใกล้ ๆ กัน หรือ water bridges แต่สามารถพองตัวในน้ำได้เล็กน้อย ซึ่งการพองตัวลักษณะนี้ผันกลับได้ คือเมื่อทำให้แห้งก็จะกลับเป็นเม็ดสตาร์ชเหมือนเดิม (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543; Whistler and BeMiller, 1999) เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำตลอดเวลาที่ให้ความร้อน และพองตัวเป็นหลายเท่าของขนาดเดิม นอกจากนี้โมเลกุลเอมิโลสจะละลายออกมาในน้ำที่อยู่บริเวณรอบๆ เม็ดสตาร์ช (Bowers, 1992)

Leach *et al.*, (1959) ได้พัฒนาวิธีการวัดค่าการพองตัวและการละลายของสตาร์ชที่อุณหภูมิต่างๆ โดยน้ำแป้งจะถูกให้ความร้อนภายใต้สภาวะที่ถูกควบคุม ต่อจากนั้นจะทำการเหวี่ยง

ค่ากำลังการพองตัว (swelling power) คำนวณจากปริมาตรและน้ำหนักของตะกอนแป้งที่เหวียงได้ และค่าการละลาย (solubility) คำนวณจากปริมาณของแข็งที่ละลายได้ การใช้อุณหภูมิที่หลากหลาย จะแสดงอัตราการพองตัวและการละลายที่แตกต่างกันของสตาร์ชแต่ละชนิด

สตาร์ชสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยใช้รูปแบบการพองตัวและการละลายเป็นเกณฑ์ ได้แก่ สตาร์ชจากธัญพืช สตาร์ชจากราก และสตาร์ชจากหัว โดยสตาร์ชจากธัญพืชมีรูปแบบการพองตัวและการละลายเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (two-stage swelling) แสดงให้เห็นถึงพันธะภายในเม็ดสตาร์ชที่มีความแข็งแรงแตกต่างกัน 2 ระดับ นั่นคือ พันธะบริเวณส่วนเปลือกและส่วนอสังฐาน ซึ่งสามารถคลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่างกัน สตาร์ชในกลุ่มธัญพืชนี้มีจำนวนพันธะสูงสุด และพันธะมีความแข็งแรงมาก ดังนั้นในช่วงอุณหภูมิต่ำ (55-75 องศาเซลเซียส) พันธะบริเวณส่วนอสังฐานซึ่งมีความแข็งแรงต่ำกว่าจึงเกิดการคลายตัวได้ก่อน หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (85-95 องศาเซลเซียส) ส่วนของเปลือกจึงจะเกิดการคลายตัว ดังนั้นจึงเห็นการพองตัวเป็นแบบ 2 ขั้นตอน สำหรับรูปแบบการพองตัวและการละลายของสตาร์ชมันสำปะหลังจะคล้ายกับสตาร์ชที่ได้จากราก คือ มีการพองตัวเพียงขั้นเดียว กำลังการพองตัวและการละลายมีค่าสูงกว่ากลุ่มแรก เนื่องจากมีจำนวนพันธะน้อยกว่า สตาร์ชในกลุ่มนี้จะเกิดเจลลิตินเซชันที่อุณหภูมิต่ำกว่ากลุ่มแรก กลุ่มสุดท้ายเป็นสตาร์ชจากพืชหัว เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชกลุ่มนี้มีการพองตัวสูง เนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ นอกจากนี้หมู่ฟอสเฟตที่เกิด esterify มีส่วนช่วยให้เกิดการพองตัวได้ง่าย เนื่องจากเกิดแรงผลักทางไฟฟ้า รูปแบบการพองตัวของสตาร์ชกลุ่มนี้เป็นแบบขั้นเดียว สามารถพองตัวได้รวดเร็ว และเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ (Pomeranz, 1991)

นอกจากชนิดของสตาร์ชที่มีผลต่อการพองตัวและการละลายแล้ว ปัจจัยอื่นที่มีผลได้แก่ ความแข็งแรงและลักษณะร่างแหภายในเม็ดสตาร์ชหรือจำนวนและชนิดพันธะภายในเม็ดสตาร์ชในระดับโมเลกุล ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจำนวนพันธะ คือ ขนาด รูปร่าง ส่วนประกอบ และการกระจายตัวของร่างแหภายในเม็ดแป้ง อัตราส่วนของเอมิโลสและเอมิโลเพกติน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโมเลกุล จำนวนกิ่งสาขา การจัดเรียงตัว และความยาวของกิ่งในเอมิโลเพกตินก็มีผลต่อจำนวนของพันธะเช่นเดียวกัน (Leach *et al.*, 1959)

6.4 การเกิดเจลลิติน

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนมีคุณสมบัติชอบน้ำ แต่เนื่องจากเม็ดสตาร์ชอยู่ในรูปของร่างแห micelles การจัดเรียงตัว

ลักษณะนี้จะทำให้เม็ดสตาร์ชละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่สตาร์ชอยู่ในน้ำเย็นเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้ง พลังงานไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) สตาร์ชจากส่วนหัว (มันฝรั่ง) และส่วนราก (มันสำปะหลัง) มีพันธะภายในโมเลกุลที่ไม่แข็งแรง การเกิดเจลาตินในเซชันจึงเกิดขึ้นได้ง่ายและเกิดความหนืดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Whistler and BeMiller, 1999)

อุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชเกิดเจลาตินในเซชันไม่ได้อยู่ที่อุณหภูมิเฉพาะ แต่มักอยู่เป็นช่วง (gelatinization temperature range) เนื่องจากเมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อน เม็ดสตาร์ชเม็ดแรกเริ่มเกิดเจลาตินในเซชันที่อุณหภูมิหนึ่ง ส่วนเม็ดสตาร์ชอื่นๆ ก็จะเริ่มเปลี่ยนเป็นชั้นใสที่อุณหภูมิสูงกว่าครั้งแรก ดังนั้นค่าที่แท้จริงจึงควรนับจากอุณหภูมิแรกที่ทำให้เม็ดสตาร์ชเจลาตินในเซชัน จนถึงอุณหภูมิสูงขึ้นไปที่มีผลต่อเม็ดสตาร์ชต่อมา นอกจากนี้การวัดอุณหภูมิที่ทำให้น้ำแป้งเกิดเจลาตินในเซชันยังอาจใช้วิธี Kofler hot-stage microscope หรือทำการวัดด้วยเครื่อง Brabender visco analyzer และเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) และเรียกอุณหภูมิที่วัดด้วยเครื่องนี้ว่า DSC gelatinization temperature range ซึ่งค่าที่ได้จะแตกต่างจากวิธี Kofler (Whistler and BeMiller, 1999)

6.5 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชที่เกิดเจลาตินในเซชันแล้ว คือ ในส่วนของออสซิลลูชันจะมีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบมากขึ้นหรือจัดเรียงกันเป็นผลึก โดยมีสาเหตุมาจากความไม่สมดุลของระบบเทอร์โมไดนามิกส์ และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางรีโอโลยี (rheology) ทำให้ความแน่นเนื้อ (firmness) หรือความแข็ง (rigidity) เพิ่มขึ้น มีการสูญเสียความสามารถในการกักเก็บน้ำและเกิดสภาพที่เป็นผลึกอีกครั้งหนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บนานขึ้น (Eliasson and Gudmundsson, 1996) รีโทรเกรเดชันของสตาร์ชที่เกิดเจลาตินในเซชันแล้ว มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดเรียงตัวใหม่อีกครั้งของทั้งแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ซึ่งแอมิโลสมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วกว่าแอมิโลเพกตินมาก (Jacobson *et al.*, 1997) ดังนั้นคำว่ารีโทรเกรเดชันจึงใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังจากการลดอุณหภูมิลงและในช่วงการเก็บรักษาสตาร์ชที่เกิดการเจลาตินในเซชันแล้ว (Fredriksson *et al.*, 1998)

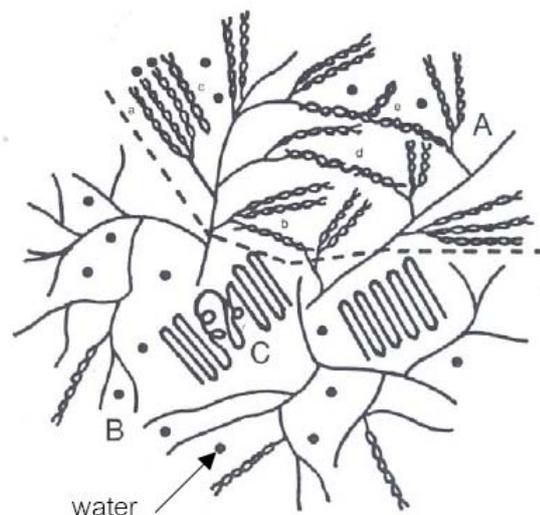
การจัดเรียงโครงสร้างของเจลสตาร์ชในช่วงเวลาสั้นๆ หลังจากการลดอุณหภูมินั้น เป็นลักษณะของการเกิดเจล (gelation) และการยึดเกาะกันของส่วนแอมิโลส จากงานวิจัยของ Sievert and Würsch (1993a) แอมิโลสที่เกิดรีโทรเกรเดชันนี้จะทนต่อความร้อนและเกิดการหลอมเหลวได้ที่อุณหภูมิสูงอยู่ในช่วง 120-165 องศาเซลเซียส (Sievert and Pomeranz, 1989) ปัจจัยที่มีผลต่อการเกาะเกี่ยวกันของสายแอมิโลส คือ ความยาวของสายโซ่ อุณหภูมิสุดท้ายของการทำให้เย็น อัตราการลดลงของอุณหภูมิ และการมีสารประกอบเชิงซ้อนของลิปิด (Sievert and Würsch, 1993b) นอกจากนี้แอมิโลเพกตินยังเป็นตัวช่วยยั้งการจัดเรียงตัวใหม่อีกครั้งของแอมิโลสด้วย (Sievert and Würsch, 1993a)

ส่วนการเปลี่ยนแปลงในระยะยาวของรีโทรเกรเดชันที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาเจลสตาร์ช เกิดจากการเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างผลึกอีกครั้งของส่วนแอมิโลเพกติน โดยเกิดจากการรวมตัวกันของกิ่งซึ่งใช้เวลาในการเกิดนานกว่าแอมิโลส และเป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางรีโอโลยี (rheology) และโครงสร้างของเจล (Gudmundsson, 1994) ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดและระดับการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ช คือ 1) อัตราส่วนโมเลกุลของแอมิโลสต่อแอมิโลเพกติน 2) ลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกตินในสตาร์ชแต่ละชนิด 3) อุณหภูมิในการเก็บรักษาเจล 4) ปริมาณน้ำหรือความเข้มข้นของสตาร์ชและ 5) การมีองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ลิปิด สารลดแรงตึงผิว และเกลือ (Gudmundsson, 1994; Whistler and BeMiller, 1999)

การที่สตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันนี้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การเสื่อมคุณภาพของขนมปัง (bread staling) ทำให้ซุบและซอสเกิดการตกตะกอนและมีความหนืดลดลง (Whistler and BeMiller, 1999) แต่รีโทรเกรเดชันเป็นเรื่องดีสำหรับการผลิตก๊วยเตี๋ยวและเส้นหมี่ เพราะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความเหนียวหนืดและแข็ง (วิภา, 2541) สำหรับวิธีที่ใช้ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิเคราะห์เครื่อง DSC หรือ เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ หรือใช้เอนไซม์ เป็นต้น (Kim *et al.*, 1997)

Bowers (1992) แสดงโครงสร้างการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช โดยพิจารณาบริเวณโครงสร้างของแอมิโลเพกตินที่แผ่ขยาย สามารถแบ่งบริเวณนี้ออกได้ 3 ส่วน ดังภาพที่ 9 ซึ่งจะแตกต่างกันตามโครงสร้างการจัดเรียงตัวที่มีความเป็นไปได้ในการเกิดรีโทรเกรเดชัน ได้แก่ 1) Domain A (เหนือเส้นประ) เกิดจากกิ่งของแอมิโลเพกตินที่พันกันด้วยพันธะเกลียวคู่ โดยมีแอมิโลสบางสายรวมอยู่ในเกลียว 2) Domain B เกิดจากกิ่งของแอมิโลเพกตินที่พันกันและยังคงกระจายได้ในน้ำ

บริเวณรอบๆ โดย Domain B นี้จะมีสถานะอยู่ระหว่างการเกิดเจลกับการเกิดรีโทรเกรเดชันของ Domain A และ 3) Domain C เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสที่เกิดจากโมเลกุลที่พับไปมา ทั้งนี้เนื่องจากแอมิโลเพกตินเป็นส่วนประกอบหลักในแป้ง ดังนั้น Domain A และ Domain B จึงเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของการเก็บเจล โดยในการเกิดรีโทรเกรเดชัน แอมิโลสจะเกิดก่อนและเมื่อเวลาผ่านไปแอมิโลเพกตินจึงจะเกิดรีโทรเกรเดชัน



ภาพที่ 9 แบบแผนของโครงสร้างที่มีความเป็นไปได้ของแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชัน
ที่มา: Bowers (1992)

7. เจล และความสำคัญในโครงสร้างอาหาร

ในปัจจุบันวิถีการดำรงชีวิตของผู้บริโภคเปลี่ยนแปลงไป ผู้บริโภคต้องการอาหารที่สามารถบริโภคได้สะดวก ประหยัดเวลา และมีคุณค่าทางอาหารสูง จึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์อาหารใหม่ๆ หลากหลายรูปแบบ การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารดังกล่าวทำให้มีการใช้คุณสมบัติการเกิดเจลของสารมาโครโมเลกุลในอาหารมากขึ้น ซึ่งคุณสมบัติในการเกิดเจลของสารผสมอาหารเป็นสิ่งสำคัญซึ่งทำให้อาหารที่เป็นของแข็งมีลักษณะเนื้อสัมผัสแบบต่างๆ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ผลิตภัณฑ์ขนม ผลิตภัณฑ์ขนมหวาน หรือผลิตภัณฑ์เนื้อล้วนต้องการคุณสมบัติในการเกิดเจลของวัตถุดิบหลักในสูตรทั้งสิ้น เช่น แป้งที่ผ่านการเจลาทีไนซ์ หรือโปรตีนที่เกิดการเสียสภาพและสานตัวเป็นโครงสร้างร่างแหเป็นต้น นอกจากความสำคัญในการเป็นโครงสร้างสำหรับอาหาร ทำให้อาหารมีลักษณะและรูปร่างต่างๆ ตามต้องการแล้ว เจลยังสามารถอุ้มน้ำไว้ใน

ผลิตภัณฑ์ ทำให้อาหารมีความชุ่มฉ่ำ และเป็นการเพิ่มน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้ด้วยเช่นกัน (ปาริฉัตร, 2545)

เจล หมายถึง โครงสร้างของระบบคอลลอยด์ที่ไม่แสดงการไหล (no steady-state flow) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยของเหลวและของแข็ง โดยมีของเหลวทำหน้าที่เป็นตัวกลาง และของแข็งที่มีอยู่ในโครงสร้างทำหน้าที่ประสานกันเป็นร่างแห ทำให้สามารถเก็บกักน้ำหรือของเหลวไว้ภายในโครงสร้างได้ สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการเกิดเจล (gelling agent) ส่วนใหญ่เป็นสารมาโครโมเลกุลประเภทคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน โดยกลไกการเกิดเจลของสารเหล่านี้มีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ สารเหล่านี้จะต้องถูกทำให้เปียก (wetting) มีการดูดน้ำ (water absorption) บางชนิดละลายน้ำได้ (water soluble) บางชนิดพองตัว (swelling) เมื่อดูดน้ำและอุ้มน้ำไว้ได้แล้ว สารที่ทำให้เกิดเจลบางชนิดจะต้องผ่านกระบวนการให้ความร้อน เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับโมเลกุล เช่น มีการเกิดเจลาทีไนซ์ของสตาร์ช มีการคลายเกลียวหรือการเสียสภาพของโปรตีน เป็นต้น หลังจากนั้น โมเลกุลที่มีโครงสร้างใหม่จะจัดเรียงตัวประสานกันเป็นร่างแหสามมิติ ที่สามารถเก็บกักน้ำไว้ภายในได้ หรือที่เรียกว่าเกิดเจลขึ้น (ปาริฉัตร, 2545)

สตาร์ชและแป้งจัดเป็นสารมาโครโมเลกุลชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารหลายประเภทอย่างกว้างขวาง จุดประสงค์สำคัญอย่างหนึ่งในการใช้แป้งในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อเป็นสารทำให้เกิดความข้นหนืด (thickening) เพิ่มจุดเด่นทางด้านเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และเพื่อให้สามารถใช้เป็นไส้ของผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้สะดวก (Thomas, 1997) ปัจจุบันงานวิจัยสามารถใช้สตาร์ชเพื่อทำหน้าที่คล้ายชอร์ตเทนนิ่ง (shortening) ในเนื้อสัมผัสของเจล โดยจะทำให้เนื้อสัมผัสของเจลเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากขึ้น ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ผู้บริโภคมองรับ ได้แก่ ความข้น (thickness) ความเนียน (smoothness) ความลื่น (slipperiness) ซึ่งลักษณะเหล่านี้สามารถประมาณได้จากการวัดสมบัติทางรีโอโลยี (Friedman, 1995)

กลไกการเกิดเจลของสตาร์ชมีเอมิโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการเกิดเจล โดยเมื่อสตาร์ชอยู่ในสารละลายน้ำที่มากเกินไป เม็ดสตาร์ชจะดูดซับน้ำและมีการพองตัว และเมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดสตาร์ชจะพองตัวมากยิ่งขึ้น โมเลกุลของเอมิโลสบางส่วนจะค่อยๆ หลุดออกมา หากมีการให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ เม็ดสตาร์ชจะพองตัวจนกระทั่งแตกออก โมเลกุลเอมิโลสและเอมิโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ชจะหลุดออกมาในสารละลายมากยิ่งขึ้น เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลเอมิโลสจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหที่สามารถเก็บกักน้ำได้ ส่วนเอมิโลเพกตินเป็นองค์ประกอบที่ไม่มีความสำคัญในการเกิดเจล เนื่องจาก

โครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นกึ่งมาก จึงยากที่จะสานตัวเป็น โครงร่างแอสสมิตี นอกจากนี้ยังไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลสในโครงสร้างเจลด้วย (สมาคมการค้าอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2531) ส่วนกลไกการเกิดเจลของแป้งก็เหมือนเช่นเดียวกับสตาร์ช แต่จะแตกต่างกันตรงที่แป้งมีปัจจัยจากองค์ประกอบอื่นร่วมอยู่ด้วย เช่น โปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุ เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อการเกิดเจลของแป้ง เช่น โปรตีนและไขมันจะยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของแอมิโลส ทำให้เจลแป้งมีลักษณะและเนื้อสัมผัสแตกต่างจากเจลสตาร์ชถึงแม้ว่าจะมาจากแหล่งวัตถุดิบเดียวกันและมีกระบวนการผลิตที่เหมือนกันก็ตาม นอกจากนี้ปัจจัยจากสถานะที่ใช้ในการเกิดเจลก็มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชและแป้งเช่นกัน (Friedman, 1995) ได้แก่ พีเอช (pH) ชนิดและความเข้มข้นของวัตถุดิบเช่น เกลือ น้ำตาล และไขมัน เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงผลของพีเอช และเกลือต่อสมบัติการเกิดเจลของสตาร์ช

7.1 ผลของพีเอช

พีเอชของสารละลายน้ำแป้งมีผลต่อลักษณะ โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช สมบัติทางความหนืดและสมบัติของเจล โดยที่เมื่อสตาร์ชอยู่ในสภาวะกรด เม็ดสตาร์ชซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบ semi-crystalline คือ มีส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) และส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) จะต้านทานการไฮโดรไลซ์ของกรดได้บางส่วน โดยส่วนที่เป็นผลึกจะต้านทานการไฮโดรไลซ์ได้ดี เนื่องจากโครงสร้างมีความแข็งแรงมาก เพราะเกิดจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันของส่วนที่เป็นเส้นตรงในโมเลกุลแอมิโลเพกตินที่พันกันเป็นเกลียวคู่ ดังนั้นกรดจึงแทรกตัวเข้าไปในเม็ดสตาร์ชและทำการไฮโดรไลซ์ส่วนที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าก่อน นั่นก็คือ ส่วนอสัณฐาน ทำให้โครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงลดลง สามารถเกิดการแตกหักได้ง่าย โดยจะเกิดการแตกหักตามแนวรัศมี (radial fissure) ทำให้ความหนืดของแป้งเปียกลดลง (Wurzburg, 1986) นอกจากนี้หากมีการให้ความร้อนร่วมด้วยกรดจะสามารถทำการไฮโดรไลซ์ส่วนที่เป็นผลึกได้ เนื่องจากโครงสร้างผลึกได้ถูกทำลายไป ซึ่งการจะทำให้โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินมีขนาดเล็กลง เนื่องจากกรดเข้าไปไฮโดรไลซ์ที่พันธะ α -D-(1 \rightarrow 4) ไกลโคซิดิก โดยทั่วไปพันธะ α -D-(1 \rightarrow 4) ไกลโคซิดิก จะถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายกว่าพันธะ α -D-(1 \rightarrow 6) ไกลโคซิดิก (Wurzburg, 1986) มีรายงานว่าสตาร์ชที่ถูกลดขนาดโมเลกุลด้วยกรดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน จะยังคงมีลักษณะเม็ดสตาร์ช คุณสมบัติ birefringence และคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำเย็นเหมือนกับแป้งดิบอยู่ (Rohwer and Klem, 1984) แต่คุณสมบัติบางประการจะเปลี่ยนแปลงไป เช่น ในขณะที่ให้ความร้อนเม็ดสตาร์ชจะแตกออกได้ง่าย ทำให้แป้งเปียกมีลักษณะเป็นของเหลวใส ความหนืดจะลดลง และมี

ความเหลว (fluidity) เพิ่มขึ้น จึงสามารถให้ความร้อนแก่สตาร์ชที่มีความเข้มข้นสูงได้ แต่เมื่อเย็นลง จะเกิดการคืนตัวทำให้สูญเสียความใส ได้เจลที่แข็งและทึบแสง (Wurzburg, 1986)

สำหรับผลของด่างต่อลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช สมบัติทางความหนืด และสมบัติการเกิดเจล พบว่า โดยทั่วไปมักใช้ด่างในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น คุณภาพทางด้านสีและเนื้อสัมผัส ตัวอย่างด่างที่นิยมใช้มากในผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide; NaOH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide; $\text{Ca}(\text{OH})_2$) และโซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate; Na_2CO_3) เป็นต้น ด่างเหล่านี้มีคุณสมบัติในการทำให้สตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชัน (gelatinizing agent) ได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยด่างจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลของเอมิโลเพกตินที่พันเกี่ยวกันอยู่ให้คลายออก ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและดูดซับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชัน (Medcalf and Gilles, 1966; Mistry and Eckhoff, 1992) นอกจากนี้ยังพบว่าหากใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูง (อย่างน้อย 0.001 โมลาร์ หรือ 0.01 เปอร์เซ็นต์ พีเอชประมาณ 11) โซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถไฮโดรไลซ์โมเลกุลเอมิโลสและเอมิโลเพกตินได้ (Jackson *et al.*, 1988) จากการที่ด่างสามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลของเอมิโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีการพองตัวมากขึ้น เม็ดสตาร์ชมีความคงทนต่อแรงเฉือนต่ำลง ดังนั้นจึงมีผลทำให้สตาร์ชมีค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดลดลง (pasting temperature) แต่ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และความหนืดลดลง (Breakdown) สูงขึ้น และนอกจากนี้ยังพบว่า ด่างมีผลทำให้การรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชชะลอตัวลง (Roberts and Cameron, 2002)

7.2 ผลของเกลือ

เกลือเป็นสารประกอบประเภทไอออนิก (ionic compounds) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับกรด หรือปฏิกิริยาการทำให้เป็นกลางระหว่างกรดกับด่าง โดยในโมเลกุลของเกลือจะประกอบด้วยอะตอมของโลหะ 1 อะตอมหรือมากกว่า แทนที่อะตอมของไฮโดรเจนในกรด สมบัติของเกลือ คือ มีจุดหลอมเหลวสูง สามารถตกผลึกได้ เมื่อละลายน้ำสารละลายที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็นกลางหรือด่างขึ้นกับชนิดของเกลือ (นิธิยา, 2539) ตัวอย่างเกลือที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร แสดงในตารางที่ 7

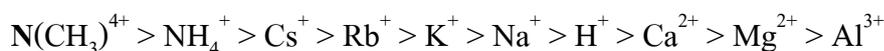
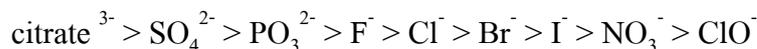
ตารางที่ 7 ประโยชน์ของเกลือบางชนิดในอุตสาหกรรมอาหาร

เกลือของกรดอินทรีย์	การใช้ประโยชน์
โมโน โซเดียมกลูตาเมต (MSG)	สารเพิ่มรสชาติอาหาร
โพแทสเซียมโบรเมต	ปรับปรุงคุณภาพแป้ง
โซเดียมคาร์บอเนต	ทำให้น้ำอ่อน
โซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง)	สารให้รสชาติและช่วยถนอมรักษาอาหาร
โซเดียมไนเตรต	ถนอมรักษาผลิตภัณฑ์เนื้อ

ที่มา: นิธิยา (2539)

เมื่อเกลืออยู่ในสารละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุขึ้น โดยไอออนของเกลือที่เกิดขึ้นมีแรงดึงดูดที่สามารถดึงโมเลกุลของน้ำให้เข้ามาใกล้ชิดได้ มีผลทำให้โครงสร้างของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของสารมาโครโมเลกุลในสารละลาย เช่น โปรตีนและสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นสคาร์ชและไมโซสคาร์ช เป็นต้น จากการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้าง (conformation) ของสารมาโครโมเลกุล ส่งผลให้สมบัติบางประการของสารมาโครโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไป เช่น เกิดการตกตะกอน หรือความหนืดเปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น (Zhang and Cremer, 2006)

อิทธิพลของไอออนที่มีต่อสารมาโครโมเลกุลจะขึ้นอยู่กับชนิด ความแรงและความสามารถในการจับกับโมเลกุลน้ำของไอออน ไอออนที่มีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นของประจุมาก จะมีแรงดึงดูดโมเลกุลน้ำให้เข้ามาใกล้ได้มากกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นของประจุน้อย ซึ่งการดึงดูดโมเลกุลน้ำให้เข้ามาใกล้ไอออนจะส่งผลให้โมเลกุลของน้ำที่เคยจับกับโมเลกุลของน้ำด้วยตัวเอง หรือจับอยู่กับสารมาโครโมเลกุลต้องแยกออกจากกันและหันมาจับกับโมเลกุลของไอออนแทน ทำให้โครงสร้างของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจส่งผลให้โครงสร้างของน้ำมีความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของไอออน (Zhang and Cremer, 2006) จากทฤษฎีการจัดลำดับอิทธิพลของไอออนโดยฮอฟไมสเตอร์ (Hofmeister series) สามารถเรียงลำดับความแรงของ ไอออนทั้งไอออน บวกและลบที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลน้ำได้ ดังภาพที่ 10

Strongly hydrated anions**Weakly hydrated anions****Weakly hydrated cations****Strongly hydrated cations**

ภาพที่ 10 ลำดับอิทธิพลของไอออนต่อการจับกับโมเลกุลน้ำของฮอฟไมสเตอร์ (Hofmeister series)
ที่มา: Chaplin (2008)

จากภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่า ไอออนลบที่อยู่ทางซ้าย (Strongly hydrated anions) กับ ไอออนบวกที่อยู่ทางขวา (Strongly hydrated cations) มีความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลของน้ำ มากกว่าไอออนบวกที่อยู่ทางซ้าย (Weakly hydrated cation) และไอออนลบที่อยู่ทางขวา (Weakly hydrated anions) เนื่องจากไอออนบวกและไอออนลบที่เป็น Strongly hydrated ions เป็นไอออนที่มีความแรงของประจุมากกว่าไอออนบวกและไอออนลบที่เป็น Weakly hydrated ions ดังนั้นจึงสามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำในสารละลายให้เข้ามาใกล้ซิดไอออนได้มาก ทำให้โมเลกุลของน้ำมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น น้ำอิสระที่จะเกิดอันตรกิริยากับสารมาโครโมเลกุลมีสัดส่วนลดลง ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่สารมาโครโมเลกุลจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันมากขึ้น เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดจากอิทธิพลของไอออนกลุ่มนี้ว่า “salting out effect” ตัวอย่างปรากฏการณ์ที่เกิดจากอิทธิพลของไอออนกลุ่มนี้ เช่น โปรตีนเกิดการตกตะกอน และสตาร์ชมีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้น เป็นต้น สำหรับอิทธิพลของไอออนบวกและลบที่เป็น Weakly hydrated ions ซึ่งมีความแรงของประจุน้อย ดังนั้นจึงสามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำเข้ามาใกล้ซิดไอออนได้น้อย และทำลายความเป็นระเบียบของโมเลกุลน้ำให้ลดลง ดังนั้นจึงมีสัดส่วนของน้ำอิสระที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับสารมาโครโมเลกุลมากขึ้น สารมาโครโมเลกุลจึงเกิดการกระจายตัวหรือละลายน้ำได้มากขึ้น เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดจากอิทธิพลของไอออนกลุ่มนี้ว่า “salting in effect” ตัวอย่างปรากฏการณ์ที่เกิดจากอิทธิพลของไอออนกลุ่มนี้ เช่น โปรตีนเกิดการละลาย และสตาร์ชมีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันลดลง เป็นต้น (Zhang and Cremer, 2006) แต่อย่างไรก็ตามการที่ไอออนจะมีอิทธิพลทำให้เกิดปรากฏการณ์ใดนั้นยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเกลือที่ใช้ เช่น การใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่ำ (ประมาณ 0.1-0.15 โมลาร์) จะมีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ salting in effect และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็น 2 โมลาร์ จะมีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ salting out effect (Damodaran, 1994)

งานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีการศึกษาผลของเกลือชนิดต่างๆ ต่อคุณสมบัติของสตาร์ช โดยพบว่า เกลือมีผลต่อการพองตัวของสตาร์ช อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน และความหนืดของแป้งเปียก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของเกลือที่ใช้

ในปีค.ศ. 1999 Ahmad and Williams ได้ศึกษาผลของเกลือต่อสมบัติการเกิดเจลาติไนเซชันและการพองตัวของสตาร์ช sago โดยพบว่า อีออนในกลุ่ม salting out ion มีผลทำให้การพองตัวของสตาร์ชลดลง ส่วนอีออนในกลุ่ม salting in ion จะช่วยเพิ่มการพองตัวของสตาร์ช และจากการศึกษาผลของเกลือต่อการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ช sago พบว่า เกลือแต่ละชนิดมีผลต่ออุณหภูมิเจลาติไนเซชันของสตาร์ช sago แตกต่างกัน โดยเกลือ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) มีผลทำให้อุณหภูมิเจลาติไนเซชันของสตาร์ช sago เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้น (0-1.0 โมลาร์) ส่วนเกลือ โซเดียมคลอไรด์มีผลทำให้อุณหภูมิเจลาติไนเซชันของสตาร์ช sago เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่ง (0-2.0 โมลาร์) จากนั้นอุณหภูมิเจลาติไนเซชันของสตาร์ชจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเกลือสูงขึ้น (มากกว่า 2.0 โมลาร์) และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน พบว่า สามารถเรียงลำดับอิทธิพลของของเกลือ อีออนลบได้ดังนี้ $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{NO}_3^- > \text{I}^- > \text{SCN}^-$ และสามารถเรียงลำดับอิทธิพลของของเกลือ อีออนบวกได้ดังนี้ $\text{Al}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Cs}^+$ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของฮอฟไมสเตอร์ (Hofmeister series)

Oosten (1982, 1990) เสนอสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่ออุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชในน้ำ จากการศึกษพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์ อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจากนั้นจะเริ่มลดลงแม้ว่าความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์จะเพิ่มมากขึ้น โดยอธิบายว่าเมื่อเติมเกลือ โซเดียมคลอไรด์ลงในสารละลายน้ำแป้ง หมู่ alcohol groups บน โมเลกุลของสตาร์ชจะเกิดอันตรกิริยากับ โซเดียมอีออน (Na^+) กลายเป็น sodium-alcoholates ซึ่งการเกิด sodium-alcoholates นี้จะทำให้ความต่างศักย์ดอนแนน (Donnan potential) ของระบบมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เกลือ โซเดียมอีออนไม่สามารถเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชได้ ดังนั้นจึงเป็นการป้องกันการเกิดเจลาติไนเซชันที่เกิดจากเกลือ โซเดียมอีออน และทำให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น มีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันสูงขึ้น แต่การเกิดอันตรกิริยาระหว่าง โมเลกุลของสตาร์ชกับ โซเดียมอีออนเป็นไปอย่างจำกัด ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันจึงเป็นไปอย่างจำกัดด้วย โดยพบว่าที่ความเข้มข้นเกลือ โซเดียมคลอไรด์ต่ำกว่า 2 โมลาร์ สตาร์ชจะมีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์สูงกว่า 2 โมลาร์

อุณหภูมิเจลาติโนเซชันของสตาร์ชจะเริ่มลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นเกลือ โซเดียมคลอไรด์ มากกว่า 2 โมลาร์ อิทธิพลของคลอไรด์ไอออนจะเริ่มเด่นชัด โดยคลอไรด์ไอออนจะสามารถเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชและทำให้สตาร์ชเกิดการเจลาติโนเซชัน ดังนั้นอุณหภูมิเจลาติโนเซชันของสตาร์ชจึงลดลง

Zobel (1984) รายงานว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีผลต่ออุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชันของสตาร์ช โดยประจุลบหรือประจุบวกสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชันได้ โดยจะมีผลต่อโครงสร้างของน้ำในสารละลาย เช่น สารละลายอิเล็กโทรไลต์กลุ่มที่มีความแรงของประจุมากมีแนวโน้มไปเพิ่มโครงสร้างที่เป็นระเบียบของน้ำและลดจำนวนโมเลกุลของน้ำอิสระ จึงทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชันเพิ่มขึ้น

Lii and Lee (1993) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำและความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์ต่อการเปลี่ยนสถานะของเม็ดสตาร์ช 7 ชนิด ด้วยเทคนิค DSC โดยใช้อัตราส่วนของสตาร์ชต่อน้ำ เท่ากับ 1:4, 2:3 และ 3:2 ในสารละลายเกลือ โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0-5 โมลาร์ จากการตรวจลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชทั้ง 7 ชนิดด้วยเครื่อง X-ray diffractometer จะได้สตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึก 3 แบบ คือ A, B และ C ซึ่งเมื่อให้ความร้อนแก่สตาร์ชในสารละลายเกลือ โซเดียมคลอไรด์ พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือจะทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชันของสตาร์ชเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ซึ่งความเข้มข้นของเกลือที่จุดนั้นจะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช จากนั้นอุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชันจะลดลงแม้ว่าความเข้มข้นของเกลือจะเพิ่มขึ้น โดยสามารถอธิบายผลการทดลองด้วยสมมติฐานของ Oosten (1982, 1990) และพบว่า เม็ดสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแข็งแรงและหนาแน่น เช่น สตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A (สตาร์ชจากธัญพืช) จะมีความสามารถในการต้านทานต่อการเกิดเจลาติโนเซชันโดย Cl^- ได้ดี ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ทำให้เกิดความต่างศักย์คอลลอยด์สูงกว่าสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B และ C ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นอุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชันของสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะลดลงน้อยกว่าสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B นอกจากนี้ยังพบว่าอิทธิพลของเกลือ โซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดเจลาติโนเซชันสตาร์ชในระบบที่มีปริมาณน้ำจำกัดไม่แตกต่างกับระบบที่มีปริมาณน้ำมากเกินไป

Maaurf *et al.* (2001) ศึกษาผลของเกลือ โซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดเจลาติโนเซชันของสตาร์ช sago โดยใช้เทคนิค DSC พบว่า การเกิดเจลาติโนเซชันของสตาร์ช sago เมื่อใช้สตาร์ชต่อน้ำในอัตราส่วน 2:3 และ 3:2 และเกลือ โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0-5 โมลาร์ อุณหภูมิการเกิด

เจลาตินในเซชันของสตาร์ช sago จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นถึง 2.0 โมลาร์ จากนั้นจะลดลงแม้ว่าความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์จะเพิ่มมากขึ้น ความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น และนอกจากผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์แล้วการเปลี่ยนของอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันและพลังงานยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำและสตาร์ชอีกด้วย

8. การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแป้ง

ลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัสเป็นผลประกอบกันของคุณสมบัติทางด้านกายภาพ และด้านเคมี ซึ่งรวมถึง ขนาด รูปร่าง จำนวน และการจัดเรียงตัวของโครงสร้างของสารนั้นๆ ทั้งหมดนั้นเป็นผลของโครงสร้างของวัสดุ และจากโครงสร้างของวัสดุเราสามารถทำความเข้าใจคุณสมบัติทางด้านกายภาพและลักษณะทางเนื้อสัมผัสได้ จึงนำหลักการนี้มาใช้ในการประเมินลักษณะทางเนื้อสัมผัส โดยใช้เครื่องมือ เครื่องมืออาจจะใช้วัดคุณสมบัติทางกายภาพเพียงหนึ่งลักษณะ แต่บ่อยครั้งที่พิจารณาลักษณะทางกายภาพหลายอย่างรวมกัน ด้วยเหตุนี้จึงมีวิธีการวัดเนื้อสัมผัสแบบทางอ้อม และผลของการวัดที่ได้ก็มีความหมายมากถ้าเราสามารถนำมาเชื่อมโยงกับหลักการและค่าที่ได้จากการวัดทางประสาทสัมผัส (Lewis, 1990) วิธีการประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสของ เจลแป้งสามารถวัดค่าได้โดยการใช้เครื่องมือและวิธีการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ดังนี้

8.1 การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแป้งโดยการใช้เครื่องมือ

Bourne (1982) กล่าวว่า วิธีการประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสโดยการใช้เครื่องมือสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีใหญ่ ดังนี้

(1) วิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์ (Fundamental measurement)

เป็นวิธีการซึ่งพัฒนามาจากนักวิทยาศาสตร์และวิศวกร ซึ่งบ่อยครั้งพบว่าข้อมูลไม่สามารถนำมาใช้ในการประเมินความรู้สึกของมนุษย์ในด้านเนื้อสัมผัสขณะเคี้ยวได้ ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถอธิบายค่าที่วัดได้ในเชิงวัสดุศาสตร์ และข้อเสีย คือ ค่าที่ได้ไม่ค่อยมีความสัมพันธ์กับการวัดค่าทางประสาทสัมผัส เครื่องมือมีราคาแพงและใช้เวลาในการวัดค่านาน วิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์จะเกี่ยวข้องกับค่าแรงที่มากกระทำต่อตัวอย่าง ทั้งนี้แรงที่มากกระทำต่อตัวอย่างมีหลาย

รูปแบบ เช่น แรงกดและแรงกดอัด (Compression-Extrusion) แรงดึง (Tensile) แรงตัดและแรงเฉือน (Cutting and Shearing) เป็นต้น

(2) วิธีการวัดค่าแบบประยุกต์ (Empirical measurement)

เป็นวิธีการวัดค่าเนื้อสัมผัสที่ถูกออกแบบมาโดยนักประดิษฐ์ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ โดยเฉพาะงานควบคุมคุณภาพและแบ่งระดับชั้นคุณภาพผลิตภัณฑ์ในโรงงานอุตสาหกรรม ข้อดีของวิธีการนี้ คือ เครื่องมือใช้งานง่าย มีความรวดเร็วในการวัด และค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กับการวัดค่าทางประสาทสัมผัส และข้อเสีย คือ ไม่สามารถอธิบายหลักการวัดค่าที่ได้บนพื้นฐานทางการวัดค่าวัสดุศาสตร์ วัดค่าได้เพียงคุณลักษณะใดคุณลักษณะหนึ่ง วิธีการวัดค่าขึ้นอยู่กับผู้วัด ไม่มีวิธีการวัดที่ได้มาตรฐานแน่นอน และโดยทั่วไปจะวัดค่าที่จุดใดจุดหนึ่งจึงไม่สามารถให้ข้อมูลที่ต่อเนื่องได้ ตัวอย่างเครื่องมือวัดค่าแบบประยุกต์ได้แก่ Fruit pressure tester, Bloom gelometer, Penetrometer เป็นต้น

(3) วิธีการเลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ (Imitative measurement)

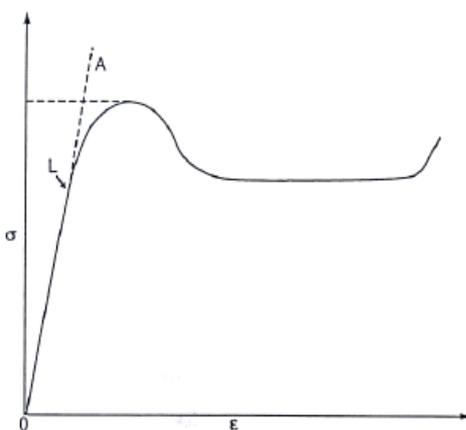
วิธีการนี้จะออกแบบเครื่องมือให้มีหลักการทำงานคล้ายกับการเคี้ยวของมนุษย์ โดยเป็นเครื่องมือแบบเดียวกันกับวิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์ ที่สามารถหาค่าแรงกับระยะทางหรือความเค้นกับความเครียดได้ ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้วัดค่าด้วยวิธีการนี้ได้แก่ Texture Analysis, Instron, Lloyd เป็นต้น ในการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง โดยการใช้เครื่องมือสำหรับการทดลองครั้งนี้ ได้ทำการวัดค่าลักษณะเนื้อสัมผัสโดยวิธีการวัดค่าแรงกด (Uniaxial compression) ดังนั้นจึงขอกกล่าวถึงวิธีการนี้พอสังเขป ดังต่อไปนี้

8.1.1 การวัดค่าแรงกด (Uniaxial compression)

เจลแป้งที่มีลักษณะแข็งขึ้น แสดงถึงการเกิดการคืนตัวของแป้งหรือการเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถศึกษาได้โดยวิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์ เช่น การวัดค่าแรงกดตามแนวใดแนวหนึ่ง (Uniaxial compression) (Jankowski and Rha, 1986) ทั้งนี้แรงกดตามแนวใดแนวหนึ่ง หมายถึง แรงภายนอกที่มากระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่ทำการทดสอบแล้วพยายามให้ตัวอย่างอัดกันแน่นขึ้น ส่วนตัวอย่างจะเกิดแรงต้านที่อยู่ภายในขึ้นมา เพื่อพยายามรักษาสถิติรูปร่างของตัวอย่างให้คงรูปเดิม (ธงชัย, 2544) วิธีการวัด

ค่าแรงกดจะให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับด้านทางกลซึ่งสามารถหาได้จาก Hencky's strain (ϵ_H) และค่า Young's modulus (E) ซึ่งค่า Young's modulus (E) นี้บ่งบอกถึงความยืดหยุ่นของวัสดุ และสามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงเริ่มต้นที่เป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 11 ซึ่งแสดงลักษณะเส้นกราฟอุดมคติของความเค้นและความเครียดที่ได้จากการวัดค่าแรงกด และพารามิเตอร์เหล่านี้นิยมใช้ในการแสดงผลของการวัดค่าแรงกดในเจลแข็ง (Jankowski and Rha, 1986)

นฤวิจน์ และคณะ (2545) พบว่า วิธีการวัดค่าแรงกด โดยการหาค่าความเค้นสูงสุดสามารถใช้แยกแยะความแตกต่างระหว่างเจลแข็งข้าวเจ้าและเจลแข็งมันสำปะหลังได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่าเจลแข็งข้าวเจ้ามีค่าความเค้นแรงกดสูงสุดสูงกว่าเจลแข็งมันสำปะหลัง Peleg (1997) ใช้วิธีการวัดค่าแรงกดวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปัง ขนมมัฟฟิน และเค้ก โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียด อธิบายรูปแบบความสัมพันธ์นี้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดที่ได้จากการวัดค่าแรงกดนี้ สามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการกดหลายๆ ครั้งได้ โดยผลิตภัณฑ์ขนมอบที่มีลักษณะของโพมหรือฟองน้ำเหล่านี้จะให้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์แบบ sigmoid curve และลักษณะเช่นนี้จะหายไปเมื่อทำการกดในครั้งที่ 2 หรือครั้งต่อๆ ไป Karim *et al.* (2000) ได้ทำการรวบรวมวิธีการศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของแข็งและพบว่าในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนมปังในระหว่างการเก็บรักษานิยมใช้วิธีการวัดค่าแรงกด



ภาพที่ 11 เส้นกราฟอุดมคติของความเค้นและความเครียดที่ได้จากการวัดค่าแรงกด

หมายเหตุ: ความชันของเส้นตรง OA คือค่า Young's modulus (E)

ที่มา: Karim *et al.* (2000)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

เมล็ดข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 และ KU 804 ได้รับจากศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ (National Corn and Sorghum Research Center) อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

2. เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1 เครื่องมือสำหรับผลิตแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง

2.1.1 เครื่องขัดสีข้าวสาร

2.1.2 เครื่องปั่นน้ำผลไม้ (Waring blender: model VA-M11L, Hitachi, Japan)

2.1.3 เครื่องทำแห้งแบบลมร้อน (Tray dryer: Kan Seng Lee Machinery (1960) Ltd. Part, Thailand)

2.1.4 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot air oven: model 400, memmert GmbH + Co.KG., Germany)

2.1.5 ตะแกรงร่อนขนาด 16, 100 และ 270 เมช

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM: model JSM-5600 and JSM-6480, JEOL, Japan)

2.2.2 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC: model Pyris1, Perkin-Elmer, USA)

2.2.3 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer: model RVA3D, Newport Scientific Instrument & Engineering, Australia)

- 2.2.4 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (BÜCHI: model B-324, Labortechnik AG, Switzerland)
- 2.2.5 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Soxtec system: model HT 1043, Tecator, Sweden)
- 2.2.6 เครื่องวิเคราะห์เส้นใยหยาบ (Fibertec system: model M1020, Tecator, Sweden)
- 2.2.7 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace, model Tactical 308, Gellenkamp, U.K.)
- 2.2.8 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, model TA.XT.Plus, Stable Micro Systems, England)
- 2.2.9 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (model SPB31, Scale Tech, Germany)
- 2.2.10 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge: model Sorvall RC 285, Dupont, USA)
- 2.2.11 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter: model 06071 N, Jenco Electronics Ltd., China)
- 2.2.12 เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer: model HetoFD2.5, Heto Lab Equipment Manufactured, Denmark)
- 2.2.13 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot air oven: model 400, memmert GmbH + Co.KG., Germany)
- 2.2.14 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer: model Spectronic 22, Spectronic Instrument Inc. USA)
- 2.2.15 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath: model OB14, Memmert GmbH+Co. KG, Germany)
- 2.2.16 ภาชนะกันความชื้น (Desiccator)
- 2.2.17 ภาชนะอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น (Moisture can)
- 2.2.18 อุปกรณ์เครื่องแก้ว
- 2.2.19 หลอดนํ้ายขนาด 25 มิลลิลิตร

3. สารเคมี

3.1 สารเคมีสำหรับแช่เมล็ดข้าวฟ่าง

- 3.1.1 กรดแลคติกร้อยละ 85 (Lactic acid; Ajax Finechem, Australia)
- 3.1.2 โซเดียมไบซัลไฟท์ (Sodium bisulfite; Merck, Germany)

3.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์แอมิโลสด้วยวิธีการเกิดสีกับไอโอดีน

- 3.2.1 เอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 (Ethyl alcohol; Merck, Germany)
- 3.2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; Merck, Germany)
- 3.2.3 กรดแอซติกกลีว (Glacial acetic acid; Merck, Germany)
- 3.2.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (Amylose from potato type III; Sigma, USA)
- 3.2.5 ไอโอดีน (Iodine; APS, Australia)
- 3.2.6 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide; Ajax Finechem, Australia)

3.3 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์แอมิโลสด้วยชุดตรวจวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (Amylose/Amylopectin assay kit, Megazyme)

- 3.3.1 DMSO (Dimethyl sulphoxide; BDH Analar, England)
- 3.3.2 เอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 (Ethyl alcohol; Merck, Germany)
- 3.3.3 แอนไฮไดรต โซเดียมแอซิเตท (Anhydrous sodium acetate; Sigma, USA)
- 3.3.4 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; Sigma, USA)
- 3.3.5 แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride; Sigma, USA)
- 3.3.6 แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride; Sigma, USA)
- 3.3.7 แมงกานีสคลอไรด์ (Manganese chloride; Sigma, USA)
- 3.3.8 กรดแอซติกกลีว (Glacial acetic acid; Merck, Germany)
- 3.3.9 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; Merck, Germany)
- 3.3.10 โซเดียมแอไซด์ (Sodium azide; Merck, Germany)
- 3.3.11 Freeze dried ConA (Megazyme, Ireland)
- 3.3.12 Amyloglucosidase/amylase mixture (Megazyme, Ireland)
- 3.3.13 GOPOD reagent buffer (Megazyme, Ireland)
- 3.3.14 Freeze dried GOPOD reagent enzyme (Glucose oxidase/peroxidase; Megazyme, Ireland)

3.4 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์โปรตีน

- 3.4.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 95-97 (Sulphuric acid; Merck, Germany)
- 3.4.2 กรดบอริก (Boric acid; J.T. Baker, USA)
- 3.4.3 คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper Sulphate; Merck, Germany)
- 3.4.4 โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulphate; Merck, Germany)
- 3.4.5 เมทิลเรด (Methyl red; Panreac Quimica SK, Spain)
- 3.4.6 โบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol green; Ajax Finechem, New Zealand)
- 3.4.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; Merck, Germany)

3.5 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ไขมัน คือ ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether; Mallinckrodt Baker Inc., Paris)

3.6 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์เส้นใยหยาบ

- 3.6.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 95-97 (Sulphuric acid; Merck, Germany)
- 3.6.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; Merck, Germany)
- 3.6.3 ออกทานาล (n-octanal; Ajax Finechem, New Zealand)
- 3.6.4 เอทิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 95 (Ethyl alcohol; Merck, Germany)

3.7 สารเคมีสำหรับการศึกษาผลของพีเอชและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

- 3.7.1 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric; Merck, Germany)
- 3.7.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; Merck, Germany)
- 3.7.3 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride; Sigma, USA)
- 3.7.4 เอทิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 95 (Ethyl alcohol; Merck, Germany)

วิธีการ

1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 การเตรียมสตาร์ชข้าวฟ่าง

สกัดสตาร์ชข้าวฟ่างจากเมล็ดข้าวฟ่าง 2 พันธุ์ โดยนำเมล็ดข้าวฟ่างมาแช่ในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 0.25% (w/v) กับกรดแลคติกความเข้มข้น 0.5% (w/v) ที่อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเมล็ดและสารละลายแช่ 1 ต่อ 2 ก่อนทำการสกัดสตาร์ชข้าวฟ่างโดยวิธีการโม้เปียก โดยดัดแปลงวิธีของ Wang *et al.*, 2000 (ภาคผนวก ก)

1.2 การเตรียมแป้งข้าวฟ่าง

เตรียมแป้งข้าวฟ่างจากเมล็ดข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ ที่ผ่านกระบวนการแช่และไม่แช่เมล็ด ดังนี้

1.2.1 เตรียมจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ โดยนำเมล็ดข้าวฟ่างมาขัดสีเปลือกออก โดยใช้เครื่องขัดสีเปลือกข้าวสาร จากนั้นนำเมล็ดที่ขัดสีเปลือกออกแล้วมาคัดแยกเมล็ดเสียออกก่อนนำไปโม้เปียก โดยนำเมล็ดข้าวฟ่างที่ขัดสีเปลือกออกแล้วมาแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และนำมาโม้ด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ โดยใช้อัตราส่วนเมล็ดข้าวฟ่างต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 2 จากนั้นเหวี่ยงแยกน้ำออกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง และนำเข้าอบในตู้อบลมร้อนที่มีอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะแห้ง นำแป้งหลังอบมาบดโดยใช้เครื่องปั่นน้ำผลไม้แบบแห้ง จากนั้นร่อนแป้งที่ได้โดยใช้ตะแกรงร่อน 100 เมช

1.2.2 เตรียมจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ผ่านกระบวนการแช่ โดยนำเมล็ดข้าวฟ่างมาแช่ในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 0.25% (w/v) กับกรดแลคติกความเข้มข้น 0.5% (w/v) ที่อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเมล็ดและสารละลายแช่ 1 ต่อ 2 จากนั้นนำเมล็ดมาล้างจนกระทั่งน้ำล้างมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 7 จากนั้นนำเมล็ดมาทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลมร้อน (Tray dryer) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ทำการขัดสีเปลือกข้าวฟ่างที่ผ่านกระบวนการแช่แล้วด้วยเครื่องขัดสีเปลือก

ข้าวสาร จากนั้นนำเมล็ดที่ขัดสีเปลือกแล้วมากัดแยกเมล็ดเสียออกก่อนนำไปโม่เปียก ตามวิธีการในข้อ 1.2.1

2. การวิเคราะห์สมบัติของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

2.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง (ภาคผนวก ข)

2.1.1 ความชื้น ตามวิธีของ AOAC (2000)

2.1.2 ปริมาณโปรตีน คัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (2000)

2.1.3 ปริมาณไขมัน คัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (2000)

2.1.4 ปริมาณเถ้า ตามวิธีการของ AOAC (2000)

2.1.5 ปริมาณเส้นใยหยาบ คัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (2000)

2.2 วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสที่เป็นองค์ประกอบของสตาร์ชข้าวฟ่างด้วยวิธีการเกิดสีกับไอโอดีน (Juliano, 1971) และชุดตรวจวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสหลังจากทำการตกตะกอนแอมิโลเพกตินด้วย Concanavalin-A หรือ Con A (Amylose/Amylopectin assay kit, Megazyme) (ภาคผนวก ค)

2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ตามวิธีการของ Walker (1976) ภาคผนวก ค3

2.4 กำล้างการพองตัวและร้อยละการละลายน้ำ

ศึกษากำล้างการพองตัวและการละลายน้ำของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส โดยชั่งตัวอย่าง 0.3 กรัม และเติมน้ำ 30 มิลลิลิตร ลงในหลอดเซนตริฟิวจ์ ขนาด 50 มิลลิลิตร ที่ทราบน้ำหนัก และผสมสารให้เข้ากัน โดยใช้ vortex mixer วางหลอด

ตัวอย่างลงในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้พลิกกลับหลอดทุกทุก 5 นาที จากนั้นนำหลอดตัวอย่างตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อ่างน้ำแข็งนาน 30 นาที นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 8000g อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 20 นาที เทส่วนสารละลายใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมที่ไล่ความชื้นและทราบน้ำหนักแล้ว จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำระเหยออกไปหมดและน้ำหนักคงที่ ส่วนตะกอนหรือเจลที่อยู่ในหลอดเซนตริฟิวจ์จะถูกชั่งน้ำหนักพร้อมหลอด (Li and Yeh, 2001) กำลังการพองตัวและร้อยละการละลายคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{กำลังการพองตัว (กรัม/กรัมตัวอย่าง)} = \frac{\text{น้ำหนักของตะกอนหรือเจลหลังให้ความร้อน}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง}}$$

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็งทั้งหมดในส่วนสารละลาย} \times 100}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง}}$$

2.5 สมบัติทางความหนืด

สมบัติทางความหนืดตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyzer; RVA) ตามวิธีการของ AACC (2000) (ภาคผนวก ก) เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) และค่าเซตแบค (setback)

2.6 สมบัติการเกิดเจลตาดีในเซชัน

ตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ Differential Scanning Calorimetry (DSC) ชั่งแป้งหรือสตาร์ชลงในถ้วยใส่ตัวอย่างสแตนเลส (stainless steel) ให้มีอัตราส่วนแป้งหรือสตาร์ชต่อน้ำโดยน้ำหนักเท่ากับ 30 ต่อ 70 โดยมีน้ำหนักรวมสุดท้ายเท่ากับ 20 มิลลิกรัม ปิดฝาให้สนิท และวางตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์การเกิดเจลตาดีในเซชันด้วย DSC ใช้ถ้วยใส่ตัวอย่างสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอ้างอิง และกำหนดอุณหภูมิในการให้ความร้อนที่ 25 ถึง 130 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที วิเคราะห์การเกิดเจลตาดีในเซชันจากอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o)

อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, T_c) และพลังงานเอนทัลปี (enthalpy, ΔH) (Zhang and Hamaker, 1998)

2.7 สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน

นำตัวอย่างที่ได้จากการศึกษาสมบัติการเกิดเจลลิตในเซชันไปเก็บไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 14 วัน เพื่อวิเคราะห์การสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่อง DSC โดยการให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 25 ถึง 130 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที วิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, T_c) และค่าพลังงานเอนทัลปี (enthalpy, ΔH) ในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Zhang and Hamaker, 1998)

2.8 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA) ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติจะคำนวณค่า Duncan's Multiple Range Test (DMRT) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Science; version 12.0)

วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (correlation coefficient, r) ระหว่างปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Science; version 12.0)

3. การศึกษาผลของพีเอชต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

การศึกษาผลของพีเอชต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง ได้ศึกษาในตัวอย่างสตาร์ชข้าวฟ่าง (439S และ 804S) และแป้งข้าวฟ่าง (439WF, 804WF, 439SWF และ 804SWF)

3.1 การเตรียมเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพีเอชต่างๆ

เตรียมสารละลายสตาร์ชและแป้งความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งสตาร์ช จากนั้นปรับพีเอชของสารละลายเป็น 3, 5, 7 และ 9 โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ นำสารละลายน้ำแป้งที่ปรับพีเอชแล้วไปให้ความร้อนและวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็วตามสภาวะที่ใช้ในข้อที่ 3.2 นำแป้งเปียกที่ได้มาบรรจุในหลอดนิตยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และสูง 60 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปเก็บที่ 3 อุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิ 4 และ -10 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 15 ชั่วโมง นำเจลที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกลตามวิธีในข้อที่ 3.3

3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่พีเอชต่างๆ

สภาวะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเตรียมเจล และการวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่พีเอชต่างๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว แสดงในตารางภาคผนวก ก1 บันทึกอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) และค่าเซตแบค (setback) (AACC, 2000)

3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่พีเอชต่างๆ

นำเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมได้ในข้อ 3.1 มาตัดเป็นแท่งโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analysis) ด้วยวิธีการวัดค่าแรงกด (Compressive test) แบบ Single hardness โดยใช้หัวกดสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร กดลงไปด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที กำหนดค่าความเค้น (stress, σ) และความเครียด (strain, ϵ) ณ ความเครียดที่เจลแตก (Tang *et al.*, 1994) ตามสมการ

$$\sigma = \frac{F(L - \Delta L)}{\pi r^2 L}$$

$$\varepsilon = \frac{-\ln(1 - \frac{\Delta L}{L})}{L}$$

- โดยที่ σ คือ ค่าความเค้น (หน่วยเป็นกิโลปาสกาล; kPa)
 ε คือ ค่าความเครียด
 F คือ แรงที่ใช้ในการกด (หน่วยเป็นนิวตัน; N)
 L คือ ความสูงของเจลเริ่มต้น (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)
 ΔL คือ ระยะทางที่ตกลงไป (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)
 r คือ รัศมีของเจลเริ่มต้น (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

3.4 ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่พีเอชต่างๆ

นำเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมจากข้อ 3.1 มาทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer) จากนั้นนำไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่พีเอชต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ตามวิธีการของ Walker (1976) ภาคผนวก ค3

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA) ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติจะคำนวณค่า Duncan's Multiple Range Test (DMRT) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Science; version 12.0)

4. การศึกษาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

การศึกษาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง ได้ศึกษาในตัวอย่างสตาร์ชข้าวฟ่าง (439S และ 804S) และแป้งข้าวฟ่าง (439WF, 804WF, 439SWF และ 804SWF)

4.1 การเตรียมเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ

เตรียมสารละลายสตาร์ชและแป้งความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งสตาร์ชในสารละลายน้ำกลั่นและสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1.0 โมลาร์ จากนั้นนำไปให้ความร้อนและวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็วตามสภาวะที่ใช้ในตารางที่ 8 นำแป้งเปียกที่ได้มาบรรจุในหลอดชนิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และสูง 60 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปเก็บที่ 3 อุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิ 4 และ -10 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 15 ชั่วโมง นำเจลที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกลตามวิธีในข้อที่ 4.3

4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

สภาวะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเตรียมเจล และการวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่พีเอชต่างๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว แสดงในตารางภาคผนวก ก1 บันทึกอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) และค่าเซตแบค (setback) (AACC, 2000)

4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ

นำเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมได้ในข้อ 4.1 มาตัดเป็นแท่งโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analysis) ด้วยวิธีการวัดค่าแรงกด (Compressive test) แบบ Single hardness โดยใช้หัวกดสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร กดลงไปด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที คำนวณค่าความเค้น (stress, σ) และความเครียด (strain, ϵ) ณ ความเครียดที่เจลแตก (Tang *et al.*, 1994) ตามสมการ

$$\sigma = \frac{F(L - \Delta L)}{\pi r^2 L}$$

$$\epsilon = \frac{-\ln(1 - \Delta L)}{L}$$

โดยที่ σ	คือ	ค่าความเค้น (หน่วยเป็นกิโลปาสกาล; kPa)
ϵ	คือ	ค่าความเครียด
F	คือ	แรงที่ใช้ในการกด (หน่วยเป็นนิวตัน; N)
L	คือ	ความสูงของเจลเริ่มต้น (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)
ΔL	คือ	ระยะทางที่กดลงไป (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)
r	คือ	รัศมีของเจลเริ่มต้น (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

4.4 การวิเคราะห์ผล

ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA) ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติจะคำนวณค่า Duncan's Multiple Range Test (DMRT) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Science; version 12.0)

5. สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ระยะเวลาที่ทำการวิจัย

ตั้งแต่เดือน พฤษภาคม 2548 สิ้นสุดเดือน พฤษภาคม 2550

ผลและวิจารณ์

1. องค์ประกอบทางเคมีของสตราซ์และแป้งข้าวฟ่าง

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสตราซ์และแป้งข้าวฟ่าง 2 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 และ KU 804 ตามวิธีการของ AOAC (2000) แสดงผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีของสตราซ์และแป้งข้าวฟ่าง

ตัวอย่าง	ความชื้น	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ โดยน้ำหนักแห้ง)				
		โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	เส้นใยหยาบ	คาร์โบไฮเดรต
439S	10.13±0.16 b	0.30±0.00 e	0.06±0.02 c	0.04±0.00 d	0.25±0.13 bc	99.36±0.15 a
804S	10.85±0.15 a	0.28±0.06 e	0.09±0.01 c	0.07±0.01 d	0.10±0.00 c	99.47±0.04 a
439WF	9.51±0.06 c	5.98±0.40 c	0.16±0.04 c	0.15±0.02 c	0.34±0.09 b	93.39±0.47 b
804WF	8.33±0.11 d	9.09±0.23 a	0.33±0.05 b	0.40±0.04 b	0.10±0.06 c	90.10±0.19 d
439SWF	9.94±0.06 b	5.17±0.06 d	0.48±0.01 b	0.38±0.01 b	0.42±0.01 b	93.57±0.08 b
804SWF	7.92±0.10 e	7.00±0.00 b	0.95±0.14 a	0.56±0.00 a	0.66±0.01 a	90.84±0.13 c

หมายเหตุ - อักษร a-e หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันมีตัวอักษรต่างกันมี

ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- ตัวเลข 439 และ 804 คือ ข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 และ KU 804 ตามลำดับ

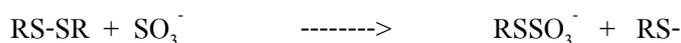
- อักษร S, WF และ SWF คือ สตราซ์ข้าวฟ่าง แป้งข้าวฟ่างที่สกัดจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ และแป้งข้าวฟ่างที่สกัดจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ผ่านกระบวนการแช่ ตามลำดับ

จากตารางที่ 8 เมื่อพิจารณาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสตราซ์ข้าวฟ่าง 2 พันธุ์ (439S และ 804S) พบว่า ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบของสตราซ์ข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และเมื่อพิจารณาปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบ พบว่า มีปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 0.5 แสดงให้เห็นว่าสตราซ์ข้าวฟ่างที่สกัดได้มีความ

บริสุทธิ์สูง โดย 439S และ 804S มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 99.36 และ 99.47 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวฟ่าง 2 พันธุ์ ที่สกัดจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่เมล็ด (439WF และ 804WF) พบว่า 439WF มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยหยาบ และคาร์โบไฮเดรตร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 5.98, 0.16, 0.15, 0.34 และ 93.39 ตามลำดับ และ 804WF มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยหยาบและคาร์โบไฮเดรตร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 9.09, 0.33, 0.40, 0.10 และ 90.10 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า 439WF มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้า ต่ำกว่า 804WF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาผลของการแช่เมล็ดข้าวฟ่างต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวฟ่าง 2 พันธุ์ (439SWF และ 804SWF) พบว่า การแช่เมล็ดข้าวฟ่างในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไบซัลไฟต์และกรดแลคติก มีผลทำให้ปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวฟ่างลดลง แต่ปริมาณไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบในแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) โดยที่ 439SWF มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยหยาบ และคาร์โบไฮเดรตร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 5.17, 0.48, 0.38, 0.42 และ 93.57 ตามลำดับ และ 804SWF มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยหยาบ และคาร์โบไฮเดรตร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 7.00, 0.95, 0.56, 0.66 และ 90.84 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระหว่างกระบวนการแช่เมล็ดข้าวฟ่างด้วยสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์และกรดแลคติก จะเกิดสารประกอบซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในสารละลายขึ้น ซึ่งสารประกอบนี้มีคุณสมบัติเป็นสารรีดิวซ์ สามารถรีดิวซ์พันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond; S-S) ของโปรตีนได้ (Watson and Hirata, 1954) ดังสมการ



ดังนั้นเมื่อเมล็ดข้าวฟ่างผ่านกระบวนการแช่ โปรตีนภายในเอนโดสเปิร์มบางส่วนจึงถูกทำลาย โดยเฉพาะโปรตีนเมทริกซ์ (protein matrix) ซึ่งอาจละลายปนออกมากับน้ำในขั้นตอนการไม่เปียกมากขึ้น เป็นผลให้ปริมาณโปรตีนในตัวอย่างแป้ง 439SWF และ 804SWF ลดลง สำหรับการเพิ่มขึ้นของปริมาณไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบนั้น อาจเนื่องมาจากการแช่เมล็ดในสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์และกรดแลคติก มีผลทำให้เมล็ดข้าวฟ่างมีความเปราะและแตกหักได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในระหว่างกระบวนการขัดสีเมล็ดข้าวฟ่างที่ผ่านกระบวนการแช่จึงเกิดการแตกหักเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ จำนวนมาก ซึ่งยากต่อการขัดสีเปลือกออกจากเมล็ดข้าวฟ่างได้หมด โดยเฉพาะเมล็ด

ข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ที่มีความเปราะมากกว่าเมล็ดข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 ดังนั้นเมื่อทำการขัดสีเมล็ดข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ที่ผ่านกระบวนการแช่ จะได้เมล็ดที่มีส่วนของเปลือก (pericarp) ติดอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเปลือกข้าวฟ่างนี้มีองค์ประกอบของเซลลูโลส เพนโทแซน รงควัตถุ แร่ธาตุ ไขมัน และไขมัน มากกว่าส่วนอื่นๆของเมล็ด (Waniska, 2000) ดังนั้นจึงทำให้แป้งข้าวฟ่างที่สกัดจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ผ่านกระบวนการแช่มีการปนเปื้อนขององค์ประกอบพวกไขมัน เถ้า และเส้นใย หยาบจากเปลือกที่ติดมากับเมล็ดมากขึ้น

2. ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชข้าวฟ่าง

การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสในสตาร์ชข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 และ KU 804 ด้วยชุดตรวจวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสหลังจากทำการตกตะกอนแอมิโลเพกตินด้วย Concanavalin-A หรือ Con-A (Amylose/Amylopectin assay kit, Megazyme) และวิธีการเกิดสีกับไอโอดีน (Juliano, 1971) แสดงผลดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชข้าวฟ่าง

ตัวอย่าง	ปริมาณแอมิโลส (ร้อยละ โดยน้ำหนักแห้ง)	
	วิธี Con-A	วิธีการเกิดสีกับไอโอดีน
439S	27.76±1.06 ns	35.52±2.01 ns
804S	28.66±2.87 ns	35.24±1.71 ns

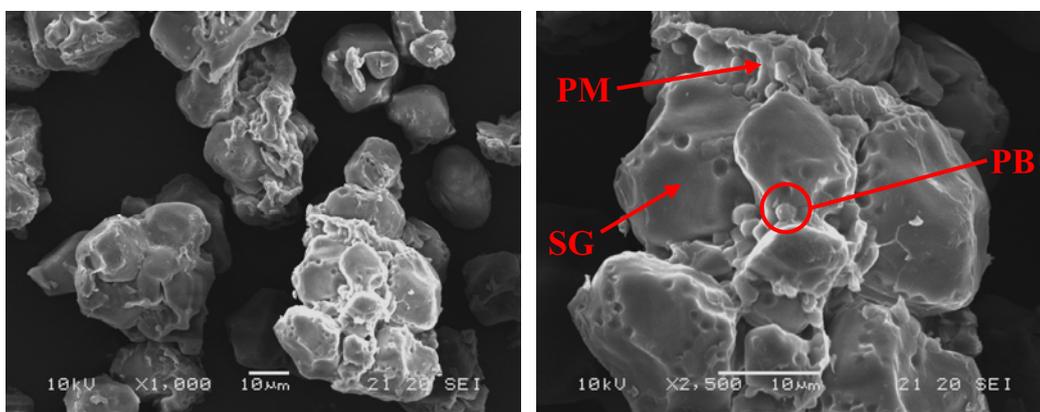
หมายเหตุ - อักษร ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

จากตารางที่ 9 พบว่า 439S และ 804S มีปริมาณแอมิโลสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดย 439S และ 804S มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ โดยน้ำหนักแห้งจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Con A เท่ากับ 27.76 และ 28.66 ตามลำดับ และมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ โดยน้ำหนักแห้งจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเกิดสีกับไอโอดีน เท่ากับ 35.52 และ 35.24 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแอมิโลสที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Con A กับวิธีการเกิดสีกับไอโอดีน พบว่า โดยส่วนใหญ่ปริมาณแอมิโลสที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Con A จะมีค่าต่ำกว่าวิธีการเกิดสีกับไอโอดีน ทั้งนี้เพราะการเกิดสีกับ

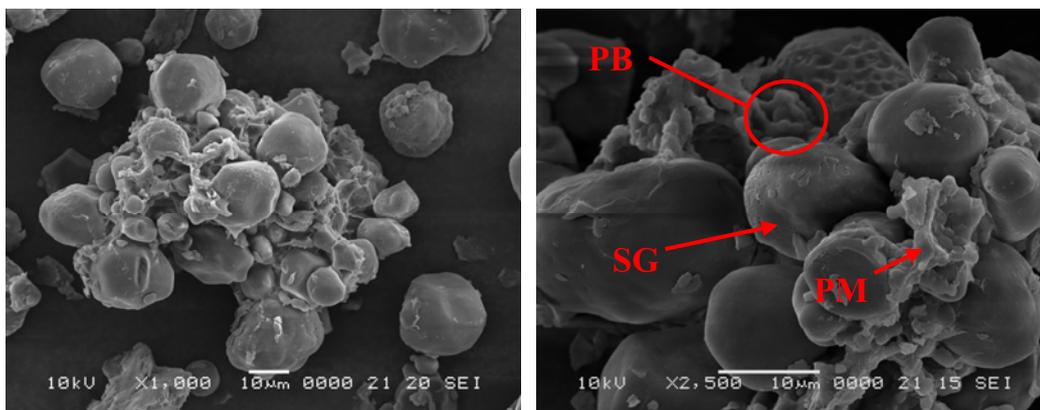
ไอโอดีนอาจมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากโมเลกุลของแอมิโลเพกตินสามารถเกิดสีกับไอโอดีนได้เช่นกัน จึงอาจรบกวนการวัดค่าการเกิดสีของโมเลกุลแอมิโลสกับไอโอดีน

3. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 และ KU 804 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) แสดงดังภาพที่ 12-14



(ก) 439WF

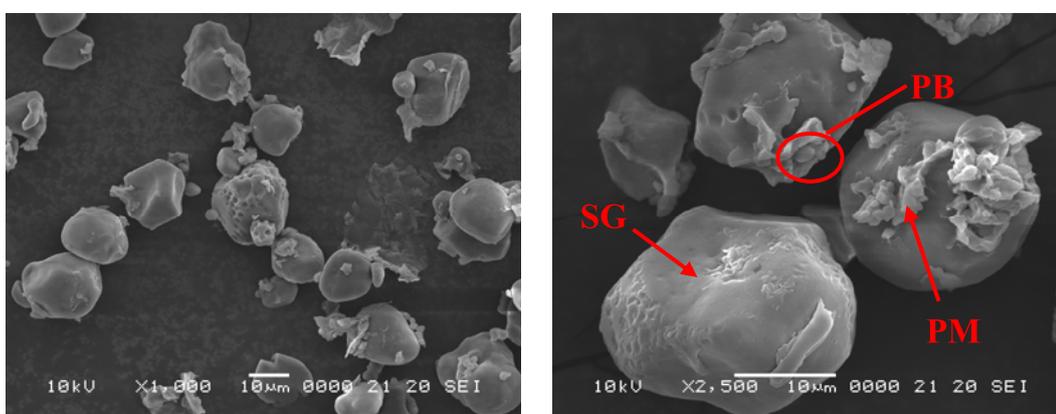


(ข) 804WF

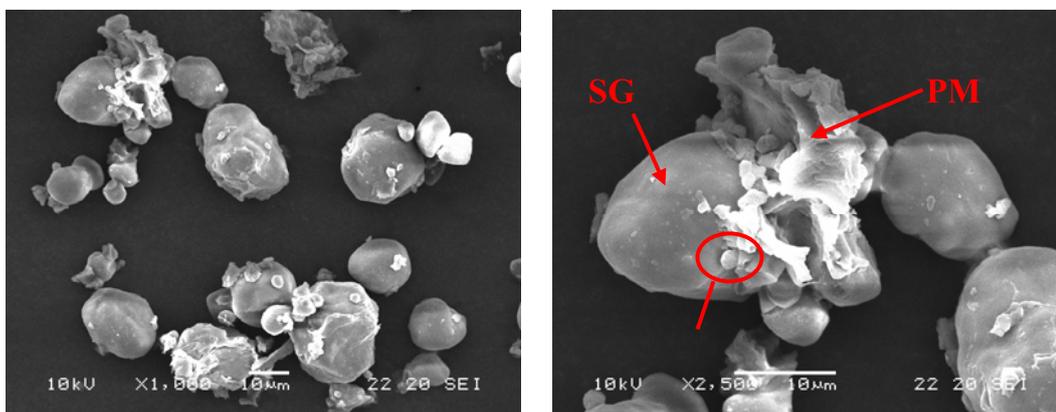
ภาพที่ 12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งข้าวฟ่างที่สกัดจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ 439WF และ 804WF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 และ 2,500 เท่า

หมายเหตุ SG คือ เม็ดสตาร์ช, PB คือ โปรตีนบอดี และ PM คือ โปรตีนเมทริกซ์

เมื่อตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งข้าวฟ่าง 439WF และ 804WF แสดงในภาพที่ 12ก และ 12ข ตามลำดับ พบว่า แป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาลักษณะคล้ายคลึงกัน (โดยเม็ดสตาร์ชมีรูปร่างกลม หลายเหลี่ยม) เม็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวน้อย ส่วนใหญ่จะอยู่ติดกันเป็นกลุ่มก้อน และมีสิ่งเจือปนอยู่บนผิวเม็ดสตาร์ชจำนวนมาก ซึ่งสิ่งเจือปนที่พบคาดว่าจะ เป็นโปรตีนที่มีทั้งโปรตีนบอดี (protein body; PB) และโปรตีนเมทริกซ์ (protein matrix; PM) โดยโปรตีนบอดีจะฝังอยู่บนผิวของเม็ดสตาร์ช และโปรตีนเมทริกซ์ทำหน้าที่เป็นเสมือนกาวเชื่อมให้เม็ดสตาร์ชอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน



(ก) 439SWF

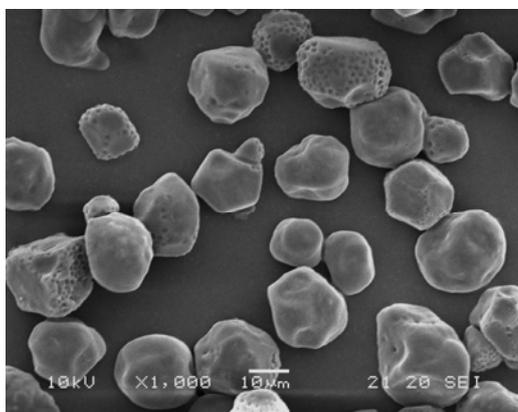


(ข) 804SWF

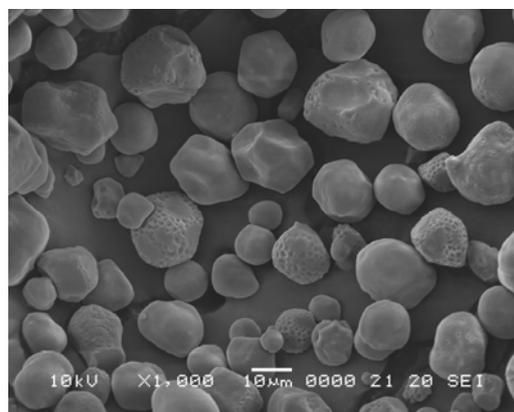
ภาพที่ 13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งข้าวฟ่างที่สกัดจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ผ่านกระบวนการแช่ 439SWF และ 804SWF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 และ 2,500 เท่า

หมายเหตุ SG คือ เม็ดสตาร์ช, PB คือ โปรตีนบอดี และ PM คือ โปรตีนเมทริกซ์

เมื่อพิจารณาผลของการแช่เมล็ดข้าวฟ่างด้วยสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์และกรดแลคติก ก่อนนำมาสกัดเป็นแป้ง พบว่า การแช่มีผลทำให้เมล็ดสตาร์ชมีการเกาะกลุ่มกันลดลง และสามารถกระจายตัวได้มากขึ้น (ดังแสดงในภาพที่ 13ก และ 13ข) ซึ่งเป็นผลมาจากโปรตีนเมทริกซ์ที่อยู่ล้อมรอบเมล็ดสตาร์ชได้ถูกทำลายไปโดยสารประกอบซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในสารละลายที่ใช้แช่ ทำให้เมล็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวมากขึ้น (โปรตีนที่อยู่ล้อมรอบเมล็ดสตาร์ชมีปริมาณน้อยลง) ซึ่งสอดคล้องกับผลขององค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวฟ่างในตารางที่ 8 ที่แสดงให้เห็นว่าการแช่เมล็ดข้าวฟ่างด้วยสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์และกรดแลคติก มีผลทำให้ปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ ลดลง



(ก) 439S



(ข) 804S

ภาพที่ 14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชข้าวฟ่าง 439S และ 804S ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1,000 เท่า

เมื่อตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชข้าวฟ่าง 439S และ 804S ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 14ก และ 14ข พบว่า เม็ดสตาร์ชข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ มีรูปร่างกลม หลายเหลี่ยม ขนาดของเม็ดสตาร์ชอยู่ในช่วง 10-20 ไมโครเมตร บนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชมีหลุมขนาดเล็กกระจายอยู่จำนวนมาก โดยคาดว่าน่าเป็นร่องรอยของโปรตีนบอดีที่เคยฝังอยู่บนเม็ดสตาร์ชและถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนการสกัดสตาร์ช นอกจากนี้ยังพบว่าเม็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ไม่พบสิ่งเจือปนหลงเหลืออยู่

4. กำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 และ KU 804 ที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส แสดงผลดังตารางที่ 10-11

เมื่อพิจารณาค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 10 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างจะมีค่ากำลังการพองตัวสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนไปทำลายพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชที่อยู่ใกล้ๆ กัน ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระได้ เม็ดแป้งจึงเกิดการพองตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น (กล้านรงค์และเกื้อกุล, 2543; Leach *et al.*, 1959)

ตารางที่ 10 กำลังการพองตัวของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

ตัวอย่าง	กำลังการพองตัว (กรัม/กรัมน้ำหนักแห้งตัวอย่าง)				
	55 °C	65 °C	75 °C	85 °C	95 °C
439S	1.74±0.06 d	2.05±0.12 d	11.19±0.94 a	14.18±0.62 a	21.83±0.39 a
804S	1.72±0.02 d	2.09±0.07 d	10.79±0.63ab	13.01±1.19 a	20.56±0.38 b
439WF	3.48±0.38 a	4.07±0.09 a	8.02±0.82 c	11.23±0.21 b	16.62±0.57 c
804WF	2.97±0.08 b	3.40±0.18 b	8.63±0.33 c	9.79±1.37 b	14.55±0.12 d
439SWF	2.82±0.07 bc	2.84±0.03 c	10.03±0.41 b	11.16±0.17 b	16.73±0.33 c
804SWF	2.57±0.15 c	2.70±0.07 c	7.66±0.07 c	10.70±0.38 b	13.61±0.12 e

หมายเหตุ - อักษร a-e หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันมีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ พบว่า สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 (439S, 439WF และ 439SWF) มีค่ากำลังการพองตัวสูงกว่า สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 (804S, 804WF และ 804SWF) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเม็ดสตาร์ชข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 มีความแข็งแรงกว่า ดังนั้นจึงมีการพองตัวต่ำกว่าเม็ดสตาร์ชข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 นอกจากนี้ในแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 (804WF และ 804SWF) มีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงกว่าแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 (439WF และ 439SWF) ดังแสดงในตารางที่ 8 ซึ่งไขมัน

สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมิโลส (amylose-lipid complex) และมีผลยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช (กถำณรงค์และเกื้อกุล, 2543; Kim and Seib, 1993) สำหรับโปรตีนก็มีผลยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชเช่นกัน เนื่องจากโปรตีนที่ติดอยู่บนผิวเม็ดสตาร์ชจะไปขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำลดลง และพองตัวได้ต่ำ (กถำณรงค์และเกื้อกุล, 2543)

ตารางที่ 11 ร้อยละการละลายของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

ตัวอย่าง	ร้อยละการละลาย				
	55 °C	65 °C	75 °C	85 °C	95 °C
439S	0.85±0.05 e	0.85±0.04 e	5.78±0.25 c	14.93±0.57 b	22.63±0.29 b
804S	0.83±0.03 e	0.91±0.04 e	4.90±0.21 d	13.47±0.82 c	20.43±0.40 c
439WF	3.01±0.05 b	3.43±0.15 b	8.03±0.06 a	16.56±0.48 a	23.90±0.75 a
804WF	4.16±0.07 a	4.05±0.04 a	6.80±0.27 b	13.49±0.14 c	20.76±0.31 c
439SWF	1.54±0.10 d	1.44±0.08 d	4.60±0.19 d	10.76±0.53 d	18.85±0.75 d
804SWF	2.79±0.12 c	2.58±0.02 c	4.16±0.01 e	7.93±0.30 e	13.42±0.49 e

หมายเหตุ - อักษร a-e หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันมีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

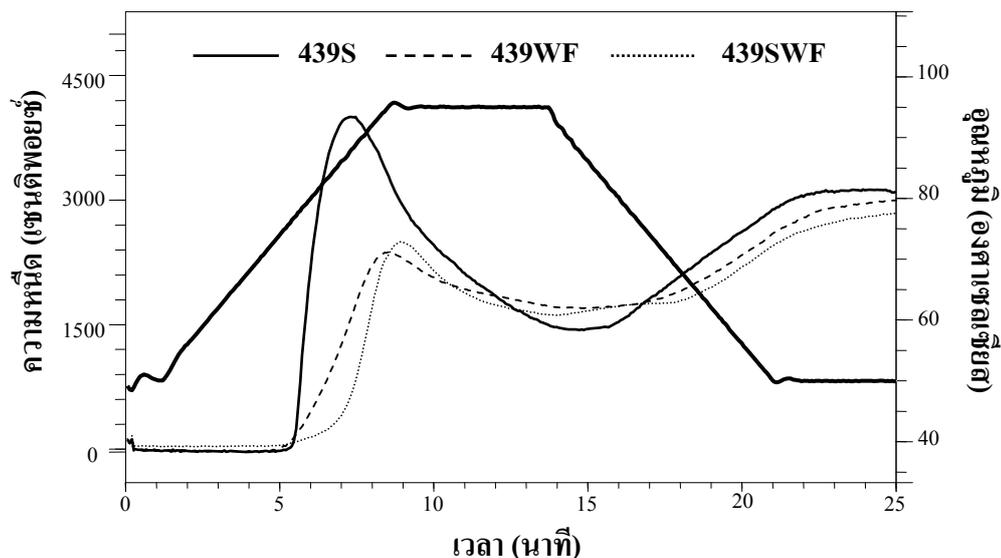
เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่า มีแนวโน้มเหมือนค่ากำลังการพองตัว โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างจะมีค่าร้อยละการละลายสูงขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างระหว่างพันธุ์ KU439 และ KU 804 พบว่า 439S มีค่าร้อยละการละลายสูงกว่า 804S อาจเนื่องมาจาก 439S มีการพองตัวสูงกว่า 804S (ดังแสดงในตารางที่ 10) จึงอาจทำให้โมเลกุลของแอมิโลสมีโอกาสดูดออกมาจากเม็ดสตาร์ชในระหว่างการพองตัวได้มากกว่า ดังนั้นค่าร้อยละการละลายของ 439S จึงสูงกว่า 804S สำหรับค่าร้อยละการละลายของแป้งข้าวฟ่าง (439WF, SWF และ 804WF, SWF) พบว่า ที่อุณหภูมิ 55 และ 65 องศาเซลเซียส แป้งข้าวฟ่าง 804WF และ 804SWF มีค่าร้อยละการละลายสูงกว่า 439WF และ 439SWF แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส ค่าร้อยละการละลายของ 439WF และ 439SWF จะสูงกว่า 804WF และ 804SWF ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าร้อยละการละลายของแป้ง วัดจากปริมาณของของแข็งทั้งหมดที่สามารถละลายน้ำได้ (กถำณรงค์และ

เกือบ 2,543) โดยส่วนที่ละลายออกมา ได้แก่ แอมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชในระหว่างที่เม็ดสตาร์ชมีการพองตัว และส่วนของปริมาณของแข็งอื่นๆ ที่ละลายได้ เช่น โปรตีน และสารประกอบอื่นๆ ที่ละลายน้ำได้ (Unnikrishnan and Bhattacharya, 1981) ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำ (55 และ 65 องศาเซลเซียส) ค่าร้อยละการละลายของ 804WF และ 804SWF ที่สูงกว่า 439WF และ 439SWF อาจเป็นผลมาจากปริมาณโปรตีนใน 804WF และ 804SWF ที่มีมากกว่า 439WF และ 439SWF (ตารางที่ 8) แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิทธิพลจากการหลุดออกของแอมิโลสจะส่งผลมากขึ้น ดังนั้น 439WF และ 439SWF ซึ่งมีกำลังการพองตัวสูงกว่า 804WF และ 804SWF จึงอาจมีปริมาณแอมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดสตาร์ชมากกว่า ส่งผลให้ค่าร้อยละการละลายสูงกว่า

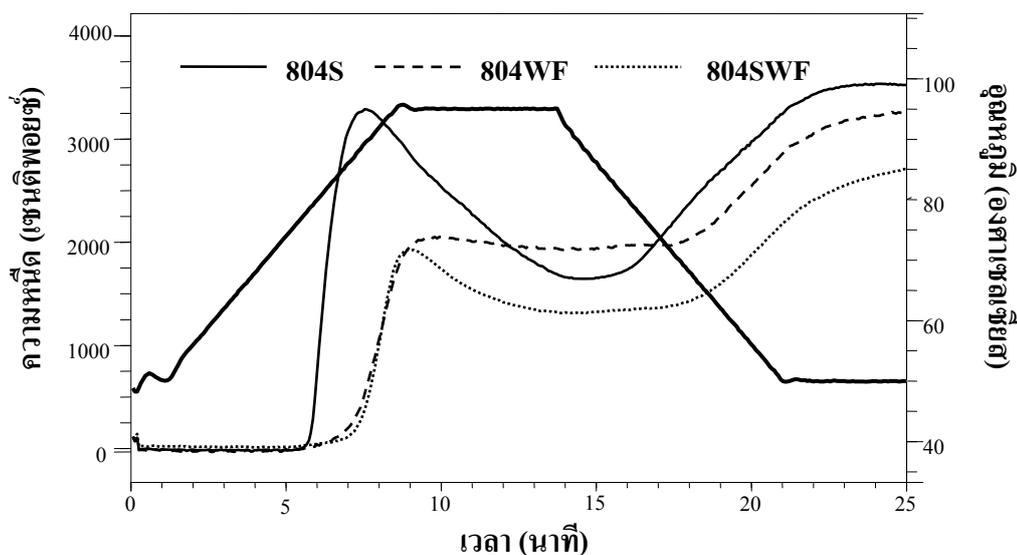
เมื่อพิจารณาผลของการแช่ต่อร้อยละการละลายของแป้งข้าวฟ่าง (ตารางที่ 11) พบว่า การแช่มีผลทำให้ค่าร้อยละการละลายของแป้งข้าวฟ่างลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวฟ่างลดลง เมื่อเมล็ดข้าวฟ่างผ่านกระบวนการแช่

5. การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

ความหนืดจัดเป็นสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชในสถานะที่มีน้ำมากและมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยการให้ความร้อนและการทำให้เย็น การวิเคราะห์ความหนืดของสตาร์ชและแป้งด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer ; RVA) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการประเมินและติดตามพฤติกรรมความหนืดของสตาร์ชและแป้งเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนและทำให้เย็นในสถานะที่มีปริมาณน้ำมากเกินพอ ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ความหนืดเป็นกราฟและแสดงค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Trough viscosity) ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดหรืออาจเรียกว่าค่าความหนืดลดลง (Breakdown) ความหนืดสูงสุดเมื่อแป้งเย็นตัวลง (Final viscosity) และการคืนตัวของแป้ง (Setback from peak) เมื่อนำสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างมาวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้านความหนืดโดยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็วผลการทดลองแสดงในภาพที่ 15-16 และตารางที่ 12



ภาพที่ 15 กราฟแสดงลักษณะการเกิดความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439



ภาพที่ 16 กราฟแสดงลักษณะการเกิดความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804

จากภาพที่ 15-16 และตารางที่ 12 แสดงพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งในการนำสตาร์ชและแป้งไปใช้ประโยชน์ จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางความหนืดระหว่างสตาร์ชข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 และ KU 804 พบว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของ 439S และ 804S มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p \leq 0.05$) โดยที่ 439S และ 804S มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดเท่ากับ 73.53 และ 75.53 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดจะแสดงถึงอุณหภูมิที่ทำให้แป้งเริ่มสุกหรือเริ่มเกิดเจลาคีในเซชัน และมักจะสัมพันธ์กับค่ากำลังการพองตัวและค่าความหนืดสูงสุด โดยสตาร์ชที่สามารถพองตัวได้ดีมักมีแนวโน้มที่จะมีค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดต่ำ และมีค่าความหนืดสูงสุดสูง เนื่องจากสตาร์ชที่พองตัวได้ดีจะสามารถดูดซึมน้ำเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชได้มาก ทำให้สตาร์ชสามารถเกิดการเจลาคีในเซชันได้ง่าย ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณแอมิโลส แอมิโลเพกติน โพรตีน ไขมัน และความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ช เป็นต้น (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543)

จากผลการทดลอง พบว่า 439S ที่มีค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดต่ำกว่า 804S จะมีค่ากำลังการพองตัวและค่าความหนืดสูงสุดสูงกว่า 804S (แสดงในตารางที่ 10 และ 12) โดยที่ค่าความหนืดสูงสุดของ 439S และ 804S เท่ากับ 4052.50 และ 3291.50 เซนติพอยซ์ ตามลำดับ ค่าความหนืดสูงสุดเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงความสามารถในการพองตัวสูงสุดของเม็ดสตาร์ชก่อนที่จะแตกออก ซึ่งการพองตัวของสตาร์ชขึ้นอยู่กับปริมาณแอมิโลส แอมิโลเพกติน โพรตีน ไขมัน และความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ช เป็นต้น (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543) โดยการพองตัวของสตาร์ชจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อสตาร์ชมีปริมาณแอมิโลสสูงขึ้น เนื่องจากเม็ดสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีความแข็งแรงมากกว่า ทำให้พองตัวได้ยากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ แต่จากการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส พบว่า 439S และ 804S มีปริมาณแอมิโลสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยมีปริมาณแอมิโลสร้อยละโดยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 27.76 และ 28.66 ตามลำดับ (แสดงในตารางที่ 9) ดังนั้นลักษณะการพองตัวของสตาร์ชทั้ง 2 พันธุ์ อาจเป็นผลมาจากความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ช โดยที่ 804S อาจมีความแข็งแรงกว่า 439S ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดลดลง (Breakdown) ของสตาร์ชข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์

ความหนืดลดลงของ 804S มีค่าต่ำกว่า 439S แสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ช 804S มีความแข็งแรงกว่า 439S ซึ่งค่าความหนืดลดลงเป็นค่าที่สามารถบ่งบอกถึงความคงทนต่อความร้อนและแรงเฉือนของเม็ดสตาร์ชได้ สตาร์ชที่มีความแข็งแรงมากจะมีค่าความหนืดลดลงต่ำกว่าสตาร์ชที่มีความแข็งแรงน้อย และเมื่อพิจารณาถึงค่าความหนืดสุดท้ายซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการบอกคุณภาพของแป้งเมื่อผ่านการให้ความร้อนและทำให้เย็นตัว (Newport Scientific, 1995) พบว่า 439S มีค่าความหนืดสุดท้ายต่ำกว่า 804S ค่าความหนืดสุดท้ายของ 439S และ 804S เท่ากับ 3050.00 และ 3525.50 เซนติพอยซ์ ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วค่าความหนืดสุดท้ายมักจะแปรผันตรงกับค่าการคืนตัวหรือค่าเซตแบค (setback from trough) ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแอมิโลส

และแอมิโลเพกตินเมื่อทำการลดอุณหภูมิลง หรืออาจเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ซึ่งจะทำให้ความหนืดของสารละลายแป้งเปียกสูงขึ้น จากผลการทดลองพบว่า 439S มีค่าการคืนตัวต่ำกว่า 804S ซึ่ง 439S และ 804S มีค่าการคืนตัวเท่ากับ 1652.00 และ 1880.50 เซนติพอยซ์ ตามลำดับ โดยการคืนตัวของแป้งมีความสอดคล้องกับปริมาณแอมิโลสของแป้งแต่ละชนิด แป้งที่มีปริมาณแอมิโลสมากมีแนวโน้มเกิดการคืนตัวได้ดี (Chen *et al.*, 1998) เนื่องจากในช่วงของการลดอุณหภูมิโมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่ใกล้กันเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการคูดน้ำเข้ามาอีก (Stephen, 1995) แต่เนื่องจากสตาร์ชข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ มีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกัน ดังนั้นการที่ 804S มีการคืนตัวสูงกว่า 439S อาจเป็นเพราะในช่วงการลดอุณหภูมิลงจะมีการจัดเรียงตัวของสายแอมิโลสเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติ และมีเศษชิ้นส่วนของเม็ดสตาร์ชที่แตกออก (starch remnant) ฝังตัวอยู่ในโครงสร้าง 3 มิติ ซึ่งเศษชิ้นส่วนของเม็ดสตาร์ชดังกล่าวอาจมีส่วนช่วยส่งเสริมให้โครงสร้างสามมิตินั้นมีความแข็งแรงมากขึ้น (Hermansson and Svegmak, 1996) 804S ที่เม็ดสตาร์ชมีความคงทนต่อแรงกวนมากกว่า 439S จึงอาจมีเศษชิ้นส่วนของเม็ดสตาร์ชที่แตกออกหลงเหลือมากกว่า จึงทำให้เจลแป้งเปียกของ 804S มีความแข็งแรงกว่าเจลแป้งเปียกของ 439S

ในกระบวนการแปรรูปอาหารส่วนใหญ่มักมีการใช้ประโยชน์ทั้งในรูปของสตาร์ชและแป้ง ซึ่งคุณสมบัติทางความหนืดของแป้งนอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของสตาร์ชแล้วองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ยังส่งผลต่อสมบัติทางความหนืดของแป้งด้วย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชและแป้งของข้าวฟ่างพันธุ์เดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 15-16 และตารางที่ 12 พบว่า แป้งข้าวฟ่างจะมีสมบัติทางความหนืดแตกต่างจากสตาร์ช โดยแป้งข้าวฟ่างจะมีค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัวต่ำกว่าสตาร์ช ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแป้งมีองค์ประกอบของโปรตีน ไขมัน เกล็ด และเส้นใยหยาบสูงกว่าสตาร์ช ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อสมบัติทางความหนืดของสตาร์ช โดยเฉพาะโปรตีนและไขมันที่มีผลในการยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช และเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ช (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543; Kim and Seib, 1993) นอกจากนี้ยังมีผลในการขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลสเป็นร่างแหสามมิติ ดังนั้นจึงทำให้ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัวของแป้งต่ำกว่าสตาร์ช

และเมื่อพิจารณาสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ ทั้งแบบที่สกัดจากเมล็ดที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ (439WF และ 804WF) และแบบที่สกัดจากเมล็ดที่ผ่านกระบวนการแช่ (439SWF และ 804SWF) พบว่า สมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับสตาร์ชข้าวฟ่าง โดยที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธุ์ของแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 ชนิด แป้งข้าวฟ่าง

พันธุ์ KU 439 (439WF และ 439SWF) จะมีค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดลดลงสูงกว่า แต่จะมีค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดและค่าการคืนตัวต่ำกว่าแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 (804WF และ 804SWF)

เมื่อพิจารณาผลของการแช่เมล็ดต่อสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง พบว่า การแช่เมล็ดมีผลทำให้แป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU439 มีค่าความหนืดสูงสุดสูงขึ้น แต่มีผลทำให้แป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU804 มีค่าความหนืดสูงสุดลดลง ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดสูงสุดในแป้งข้าวฟ่าง 439SWF อาจเนื่องมาจากการแช่เมล็ดด้วยสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์และกรดแลคติกก่อนนำมาสกัดเป็นแป้ง มีผลทำให้ปริมาณโปรตีนของแป้งข้าวฟ่างลดลง เม็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 8 และภาพที่ 13 เม็ดสตาร์ชจึงสามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวฟ่างที่พบว่า ปริมาณโปรตีนมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกับค่าความหนืดสูงสุด ($r = -0.741$) ดังแสดงในตารางผนวกที่ จ1 ดังนั้นแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 จึงมีค่าความหนืดสูงสุดสูงขึ้นเมื่อเมล็ดผ่านกระบวนการแช่ แต่สำหรับแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ถึงแม้ว่าการแช่เมล็ดข้าวฟ่างมีผลทำให้ปริมาณ โปรตีนในแป้งข้าวฟ่างลดลง และเม็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวมากขึ้นเหมือนดังเช่นแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 แต่กลับมีค่าความหนืดสูงสุดลดลงเมื่อเมล็ดผ่านกระบวนการแช่ อาจเนื่องมาจากเมล็ดข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 เมื่อผ่านกระบวนการแช่แล้ว เมล็ดจะมีความเปราะมาก ทำให้เมื่อขัดสีเปลือกออก เมล็ดจึงแตกหักง่าย ไม่สามารถการขัดสีเปลือกออกได้หมด ดังนั้นเมื่อนำเมล็ดมาสกัดเป็นแป้งองค์ประกอบทางเคมีที่ติดมากับเปลือก เช่น โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบ จึงปนมาอยู่ในแป้งจำนวนมาก ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้มีผลยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543; Kim and Seib, 1993) ดังนั้นจึงทำให้ 804SWF มีความหนืดสูงสุดต่ำกว่า 804WF

เมื่อพิจารณาผลของการแช่เมล็ดข้าวฟ่างต่อค่าความหนืดลดลงของแป้งข้าวฟ่าง พบว่า การแช่มีผลทำให้แป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ มีค่าความหนืดลดลงสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวฟ่างมีความคงทนต่อแรงกวนต่ำลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการแช่เมล็ดมีผลทำให้เม็ดสตาร์ชในแป้งข้าวฟ่างทั้งพันธุ์ KU 439 และ KU 804 มีการกระจายตัวดีขึ้นและมีปริมาณ โปรตีนที่ล้อมรอบเม็ดสตาร์ชลดลง จึงทำให้เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำและแตกออกได้ง่ายขึ้น ค่าความหนืดลดลงจึงสูงขึ้น โดยพบว่าปริมาณโปรตีนมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกับค่าความหนืดลดลง ($r = -0.981$) ดังแสดงในตารางผนวกที่ จ1

ตารางที่ 12 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มเกิด	ค่าความหนืด (เซนติพอยซ์)				
	ความหนืด (°C)	ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง	ความหนืดสุดท้าย	ค่าการกินตัว
439S	73.53±0.04 c	4052.50±70.00 a	1398.00±52.33 d	2654.50±122.33 a	3050.00±69.30 c	1652.00±16.97 b
804S	75.53±0.04 b	3291.50±3.54 b	1645.00±1.41 bc	1646.50±4.95 b	3525.50±0.71 a	1880.50±2.12 a
439WF	71.35±0.21 d	2362.00±16.97 d	1680.00±18.38 b	682.00±1.41 d	2967.50±37.48 d	1287.50±19.09 e
804WF	75.55±1.13 b	2052.50±9.19 e	1922.00±1.41 a	130.50±7.78 e	3255.00±0.00 b	1333.00±1.41 d
439SWF	74.15±0.28 bc	2478.50±27.58 c	1600.00±12.73 c	878.50±14.85 c	2846.00±9.90 e	1246.00±22.63 f
804SWF	78.00±1.13 a	1924.00±2.83 f	1317.00±8.49 e	607.00±11.31 d	2720.00±14.14 f	1403.00±5.66 c

หมายเหตุ - อักษร a-f หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันมีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของการแช่เมล็ดต่อค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งข้าวฟ่าง พบว่าการแช่เมล็ดมีผลทำให้ค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่เมล็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวและพองตัวได้มากขึ้น เม็ดสตาร์ชมีความคงทนต่อแรงกดดันต่ำลง ด้วยเหตุนี้จึงอาจทำให้แป้งข้าวฟ่าง 439SWF และ 804SWF มีเศษชิ้นส่วนของเม็ดสตาร์ชที่หลงเหลือและช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างร่างแหน้อยกว่า 439WF และ 804WF ดังนั้นค่าความหนืดสุดท้ายของ 439SWF และ 804SWF จึงต่ำกว่า 439WF และ 804WF นอกจากนี้เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณองค์ประกอบทางเคมีกับสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง พบว่าปริมาณเส้นใยหยาบมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกับค่าความหนืดสุดท้าย ($r = -0.966$) ดังแสดงในตารางผนวกที่ จ1 ซึ่งเส้นใยหยาบอาจไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเอมิโลส ดังนั้นจึงทำให้แป้งข้าวฟ่างซึ่งมีปริมาณเส้นใยหยาบสูงขึ้นเมื่อเมล็ดข้าวฟ่างผ่านกระบวนการแช่มีค่าความหนืดสุดท้ายลดลง

6. สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

จากการวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชัน ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิและปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำให้สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ ในสถานะที่มีน้ำมากเกินไป โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิให้คงที่ ผลที่ได้จะเป็นกราฟเส้นโค้งของอุณหภูมิ 3 ค่า คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตินในเซชัน (Onset temperature; T_o) อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชันสูงสุด (Peak temperature; T_p) และอุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (Conclusion temperature; T_c) และค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (Enthalpy of gelatinization; ΔH) ซึ่งกระบวนการเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชและแป้งเป็นกระบวนการดูดความร้อน (Endothermic enthalpy) ผลการวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างแสดงในตารางที่ 13-14

เมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชันที่อยู่ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้น (T_o) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชัน พบว่า ช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชันของ 439S และ 804S ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 13 โดยช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (T_o - T_p - T_c) ของ 439S และ 804S เท่ากับ 74.77-77.26-81.76 และ 74.65-77.57-81.45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชันของ 439S และ 804S เท่ากับ 13.49 และ 12.85 จูลต่อกรัม น้ำหนักตัวอย่างแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 13 สมบัติการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชข้าวฟ่าง

ตัวอย่าง	To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	ΔH (J/g)
439S	74.77±0.37 ns	77.26±0.59 ns	81.76±0.85 ns	13.49±0.76 ns
804S	74.65±1.06 ns	77.57±0.78 ns	81.45±0.89 ns	12.85±0.69 ns

หมายเหตุ - อักษร ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

- To (°C) คือ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (Onset temperature)
- Tp (°C) คือ อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันสูงสุด (Peak temperature)
- Tc (°C) คือ อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (Conclusion temperature)
- ΔH (จูล/กรัมน้ำหนักตัวอย่างแห้ง) คือ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (Enthalpy)

สำหรับแป้งข้าวฟ่าง 439WF และ 804WF พบว่า ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งข้าวฟ่างทั้งสองพันธุ์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (To-Tp-Tc) ของ 439WF และ 804WF เท่ากับ 70.89-74.30-78.95 และ 70.84-75.22-79.72 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่ 439WF มีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันสูงกว่า 804WF ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันจะคิดเป็นหน่วยจูลต่อหนึ่งกรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ไม่ได้คิดในฐานน้ำหนักแห้งของสตาร์ช ดังนั้น 439WF ที่มีองค์ประกอบของโปรตีน ไขมัน และเถ้าน้อยกว่า 804WF จึงมีปริมาณสตาร์ชในตัวอย่างมากกว่า ดังนั้น 439WF จึงมีค่าพลังงานในการเกิดเจลลาติโนเซชันสูงกว่า 804WF ดังแสดงในตารางที่ 14

เมื่อพิจารณาผลของการแช่ต่อสมบัติการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งข้าวฟ่าง พบว่า การแช่เมล็ดข้าวฟ่างไม่มีผลต่อช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชัน แต่มีผลต่อค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งข้าวฟ่าง โดยที่การแช่เมล็ดข้าวฟ่างมีผลทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งข้าวฟ่างสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการแช่มีผลทำให้องค์ประกอบของโปรตีนในแป้งข้าวฟ่างลดลงจึงทำให้มีปริมาณสตาร์ชในตัวอย่างมากขึ้น ดังนั้นแป้งข้าวฟ่าง 439SWF และ 804SWF จึงต้องใช้พลังงานในการเกิดเจลลาติโนเซชันสูงกว่า 439WF และ 804WF

ตารางที่ 14 สมบัติการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งข้าวฟ่าง

ตัวอย่าง	To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	ΔH (J/g)
439WF	70.89±1.72 ns	74.30±1.38 ns	78.95±1.22 ns	11.17±3.28 ab
804WF	70.84±0.55 ns	75.22±0.52 ns	79.72±0.74 ns	9.07±1.76 b
439SWF	71.67±0.15 ns	74.54±0.27 ns	78.73±0.32 ns	13.66±0.61 a
804SWF	72.33±0.47 ns	75.69±0.25 ns	79.75±0.31 ns	11.64±0.24 ab

- หมายเหตุ - อักษร a-b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันมีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
- อักษร ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)
 - To (°C) คือ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (Onset temperature)
 - Tp (°C) คือ อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันสูงสุด (Peak temperature)
 - Tc (°C) คือ อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (Conclusion temperature)
 - ΔH (จูล/กรัม น้ำหนักตัวอย่างแห้ง) คือ พลังงานที่ใช้ในการเจลลาติโนเซชัน (Enthalpy)

7. สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสตาร์ช ได้แก่ แอมิโลส และแอมิโลเพกติน เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ภายหลังการเกิดเจลลาติโนเซชันและอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจากการศึกษาของ Goodfellow and Wilson (1990) พบว่า เกลียวม้วนของแอมิโลสสามารถเกิดการจัดเรียงตัวได้เร็วกว่าการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกติน ซึ่งสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันนี้สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง DSC ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 15-16

จากผลการทดลองจะสังเกตเห็นได้ว่า อุณหภูมิและค่าพลังงานของการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่อีกครั้งของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกตินภายหลังการเกิดเจลลาติโนเซชัน หรือที่เรียกว่าเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ มีค่าต่ำกว่า อุณหภูมิและค่าพลังงานของเจลลาติโนเซชัน เนื่องจากเมื่อโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถูกทำให้สลายหรือแยกออกจากกันไปแล้วในช่วงการเกิดเจลลาติโนเซชัน โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน

จะไม่สามารถกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ให้ได้โครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบอย่างสมบูรณ์ ถึงแม้ว่าจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานานก็ตาม (Takaya *et al.*, 2000)

จากตารางที่ 15 เมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลเอมิโลสและเอมิโลเพกตินในเจลสตาร์ชข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ พบว่า ช่วงอุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของ 439S และ 804S ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดย 439S และ 804S มีช่วงอุณหภูมิในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (T_o - T_p - T_c) เท่ากับ 41.86-51.85-62.37 และ 43.84-52.12-64.00 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกจากรีโทรเกรเดชันเท่ากับ 6.01 และ 5.80 จูลต่อกรัมน้ำหนักตัวอย่างแห้ง ($p>0.05$) ตามลำดับ

ตารางที่ 15 สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวฟ่าง

ตัวอย่าง	T_o ($^{\circ}C$)	T_p ($^{\circ}C$)	T_c ($^{\circ}C$)	ΔH (J/g)
439S	41.86±0.69 b	51.85±0.39 ns	62.37±0.80 b	6.01±0.71 ns
804S	43.84±1.83 a	52.12±0.86 ns	64.00±0.42 a	5.80±0.16 ns

- หมายเหตุ - อักษร a-b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันมีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)
- อักษร ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)
 - T_o ($^{\circ}C$) คือ อุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายโครงสร้างผลึก (Onset temperature)
 - T_p ($^{\circ}C$) คือ อุณหภูมิในการสลายโครงสร้างผลึกสูงสุด (Peak temperature)
 - T_c ($^{\circ}C$) คือ อุณหภูมิสุดท้ายในการสลายโครงสร้างผลึก (Conclusion temperature)
 - ΔH (จูล/กรัมน้ำหนักตัวอย่างแห้ง) คือ พลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Enthalpy)

เมื่อพิจารณาผลของการแช่เมล็ดข้าวฟ่างต่อสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 พันธุ์ พบว่า การแช่ไม่มีผลต่อช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน ดังแสดงในตารางที่ 16 โดยที่ 439WF และ 804WF มีช่วงอุณหภูมิการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (T_o - T_p - T_c) เท่ากับ 46.50-55.97-64.27 และ 46.86-56.31-64.59

องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชันเท่ากับ 4.83 และ 4.88 จูลต่อกรัมน้ำหนักตัวอย่างแห้งตามลำดับ สำหรับ 439SWF และ 804SWF พบว่า มีช่วงอุณหภูมิในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (T_o - T_p - T_c) เท่ากับ 45.36-55.13-65.27 และ 46.01-55.85-65.40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชันเท่ากับ 6.11 และ 4.98 จูลต่อกรัมน้ำหนักตัวอย่างแห้ง ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการแช่มีผลทำให้องค์ประกอบของโปรตีนในแป้งข้าวฟ่างลดลงจึงทำให้ในตัวอย่างมีปริมาณสตาร์ชมากขึ้น ดังนั้นค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวฟ่างสูงขึ้นเมื่อเมล็ดผ่านแช่

ตารางที่ 16 สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวฟ่าง

ตัวอย่าง	T_o ($^{\circ}C$)	T_p ($^{\circ}C$)	T_c ($^{\circ}C$)	ΔH (J/g)
439WF	46.50±1.23 ns	55.97±0.84 ab	64.27±1.32 ns	4.83±0.23 ns
804WF	46.86±0.28 ns	56.31±0.36 a	64.59±0.51 ns	4.88±0.28 ns
439SWF	45.36±1.19 ns	55.13±0.70 b	65.27±2.02 ns	6.11±1.14 ns
804SWF	46.01±0.47 ns	55.85±0.17 ab	65.40±1.45 ns	4.98±0.64 ns

- หมายเหตุ - อักษร ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)
- อักษร a-b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันมีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)
 - T_o ($^{\circ}C$) คือ อุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายโครงสร้างผลึก (Onset temperature)
 - T_p ($^{\circ}C$) คือ อุณหภูมิในการสลายโครงสร้างผลึกสูงสุด (Peak temperature)
 - T_c ($^{\circ}C$) คือ อุณหภูมิสุดท้ายในการสลายโครงสร้างผลึก (Conclusion temperature)
 - ΔH (จูล/กรัมน้ำหนักตัวอย่างแห้ง) คือ พลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Enthalpy)

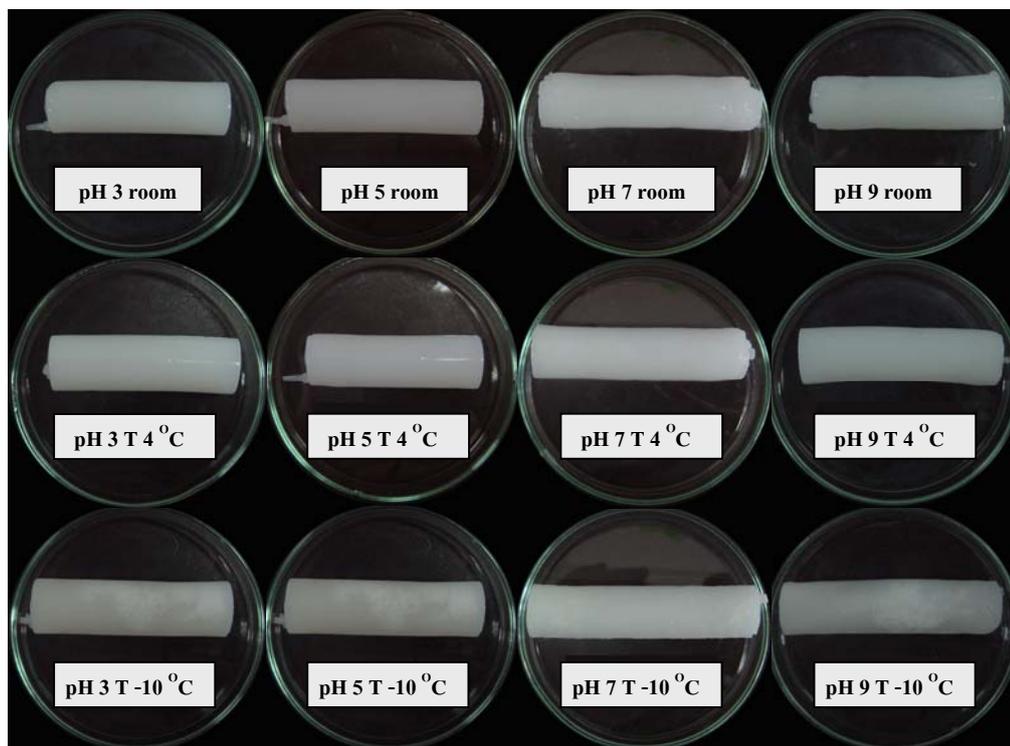
8. การศึกษาผลพืเอชต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

การศึกษาผลของพีเอชต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง เจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างถูกเตรียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง ที่

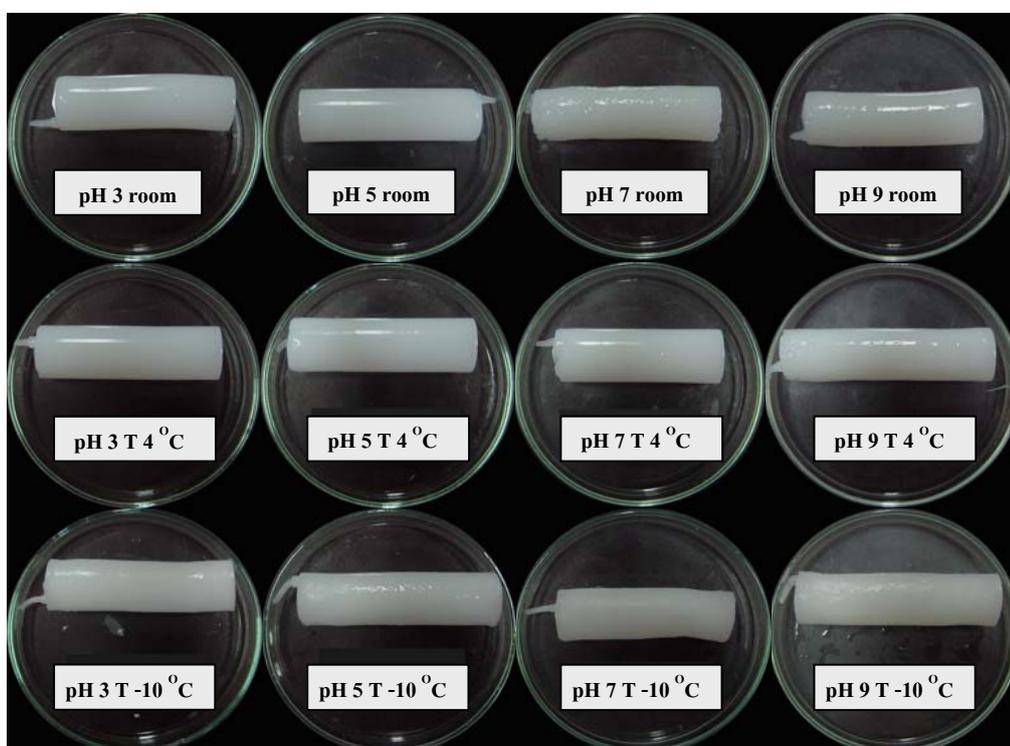
พีเอช 3, 5, 7 และ 9 โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyser; RVA) และเจลที่เตรียมไว้จะถูกเก็บไว้ที่ 3 อุณหภูมิ คือ อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27-30 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิ 4 และ -10 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 15 ชั่วโมง ก่อนนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกลโดยการวัดค่าแรงกด (Compressive test) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyser) นอกจากนี้ ได้ศึกษาผลของพีเอชต่อสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง และการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ได้ถูกนำมาพิจารณาประกอบด้วย

จากการวัดพีเอชของสารละลายสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างในน้ำกลั่น พบว่า น้ำแป้งมีพีเอชประมาณ 5.0-5.5 ดังนั้นการเตรียมสารละลายสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่พีเอช 5 จึงเติมกรดไฮโดรคลอริกลงไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจถือได้ว่าที่พีเอช 5 นี้สารละลายสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างมีสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะปกติที่ไม่มีการปรับพีเอช

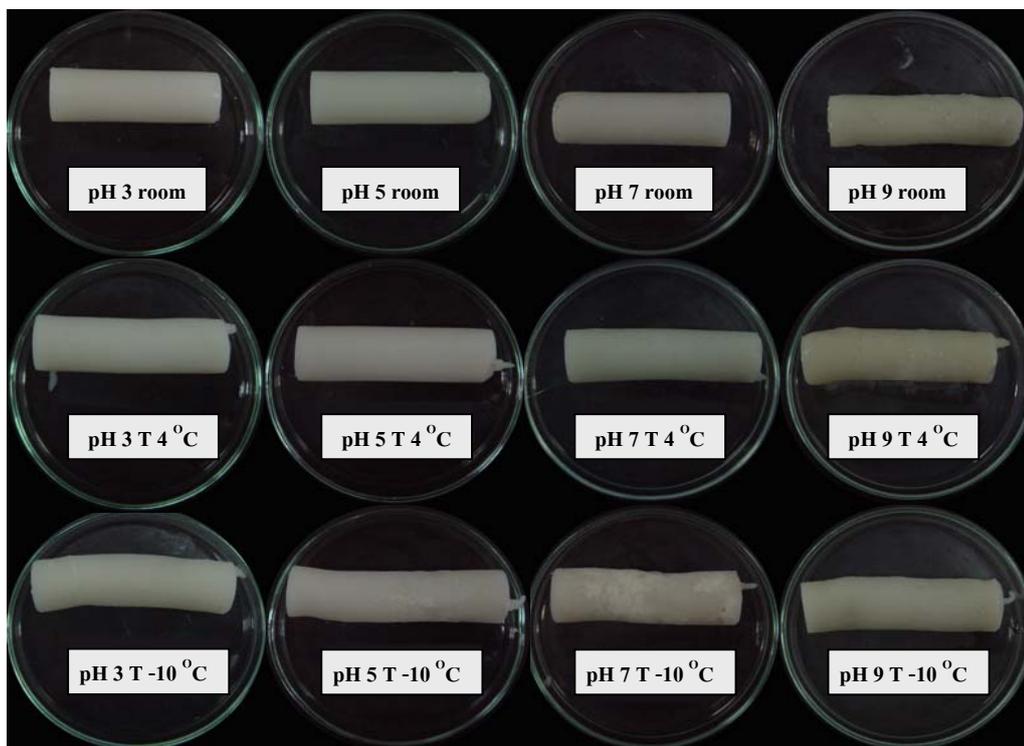
เมื่อพิจารณาลักษณะเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างแสดงในภาพที่ 17-22 พบว่า เจลที่เตรียมที่พีเอช 5 มีความแน่นเนื้อและคงตัวมากที่สุด ผิวเจลลื่นเป็นมันวาว ส่วนเจลที่เตรียมที่พีเอช 3 มีความแน่นเนื้อและคงตัวต่ำกว่าเจลที่พีเอช 5 เล็กน้อย แต่เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 7 และ 9 พบว่า เจลมีลักษณะนุ่มลงอย่างเห็นได้ชัด ผิวเจลเหนียวติดมือ และในบางตัวอย่าง เช่น 439WF และ 804SWF เจลมีลักษณะนุ่มและจนไม่สามารถตัดเป็นแท่งเจลได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเจลของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง พบว่า เจลสตาร์ชมีสีขาวขุ่น มีความยืดหยุ่นและแน่นเนื้อมากกว่าเจลแป้งข้าวฟ่าง ดังแสดงในภาพที่ 17 และ 18 ส่วนเจลแป้งข้าวฟ่างมีลักษณะนุ่มกว่า และมีความยืดหยุ่นต่ำกว่าเจลสตาร์ช สีของเจลแป้งข้าวฟ่างจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพีเอช โดยเจลที่เตรียมที่พีเอช 3 มีสีชมพูอมส้ม ในขณะที่เจลเตรียมที่พีเอช 5 จะมีสีเหลืองอ่อน ส่วนที่พีเอช 7 และ 9 เจลมีสีเขียวคล้ำ ดังแสดงในภาพที่ 19-22 ทั้งนี้เนื่องจากในแป้งข้าวฟ่างมีรงควัตถุจำพวกแอนโทไซยานินอยู่ ซึ่งจะเปลี่ยนสีตามพีเอช (Awika and Rooney, 2004) และเมื่อพิจารณาลักษณะเจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิต่างๆ นาน 15 ชั่วโมง พบว่า เจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีลักษณะเหมือนเจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะมีความแน่นเนื้อมากกว่าเล็กน้อย ส่วนเจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะคล้ายฟองน้ำที่สามารถดูดซับน้ำไว้ภายในได้ โดยเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดซับน้ำไว้ได้ดี ไม่มีน้ำออกมาจากเจล (syneresis)



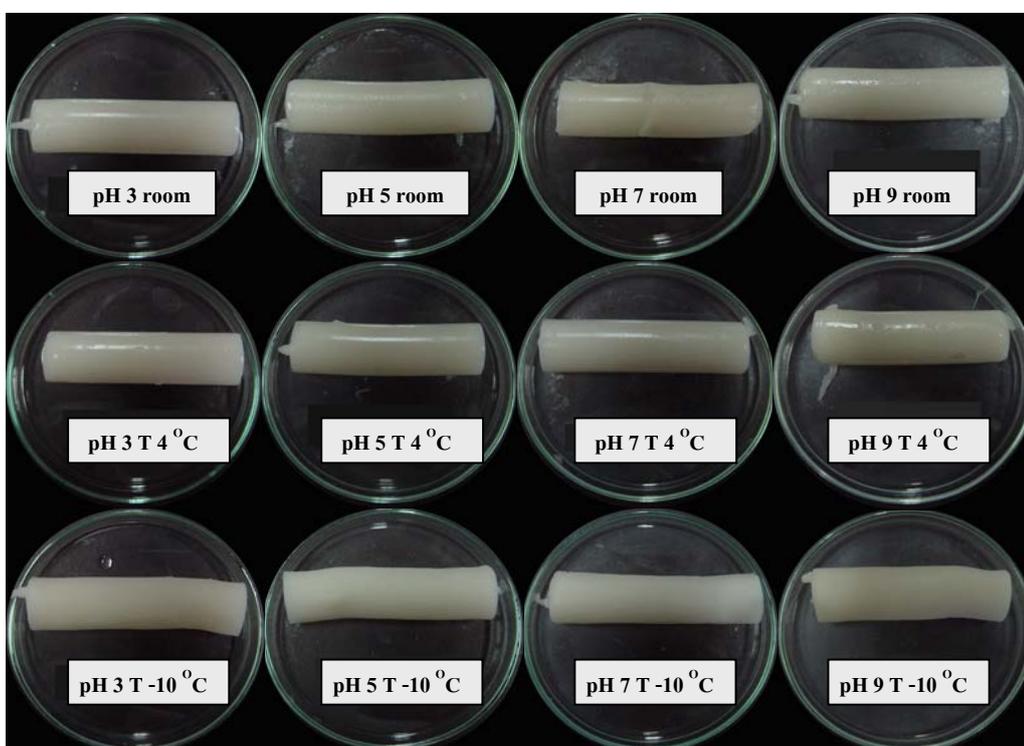
ภาพที่ 17 ลักษณะเจลสตาร์ชข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 (439S) ที่พีเอชต่างๆ



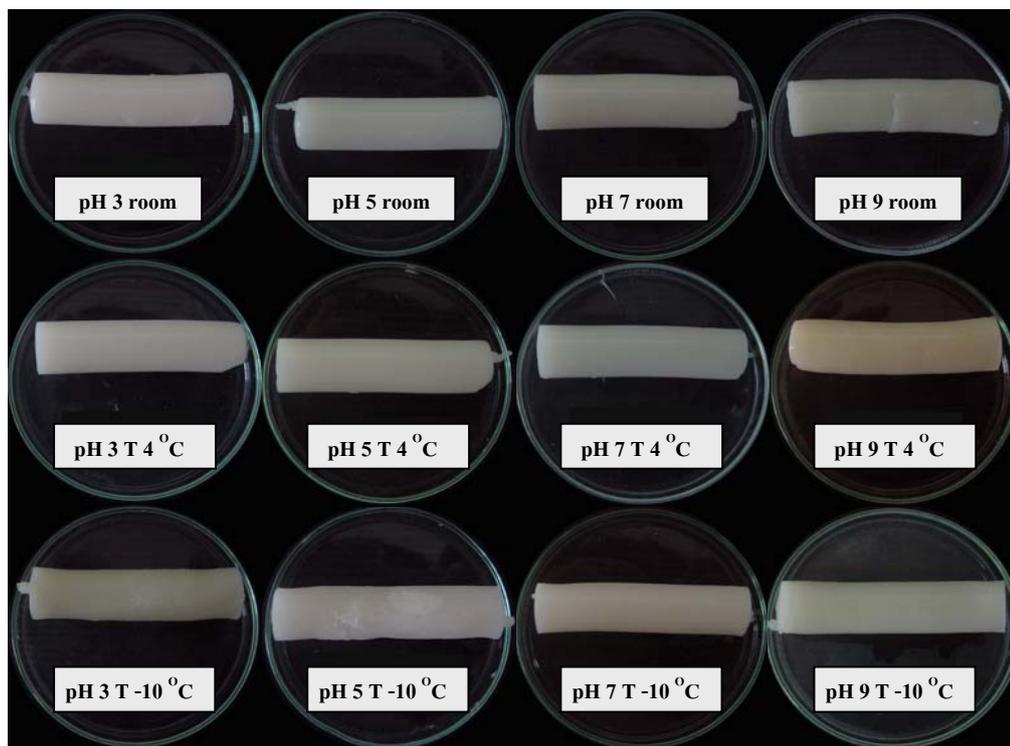
ภาพที่ 18 ลักษณะเจลสตาร์ชข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 (804S) ที่พีเอชต่างๆ



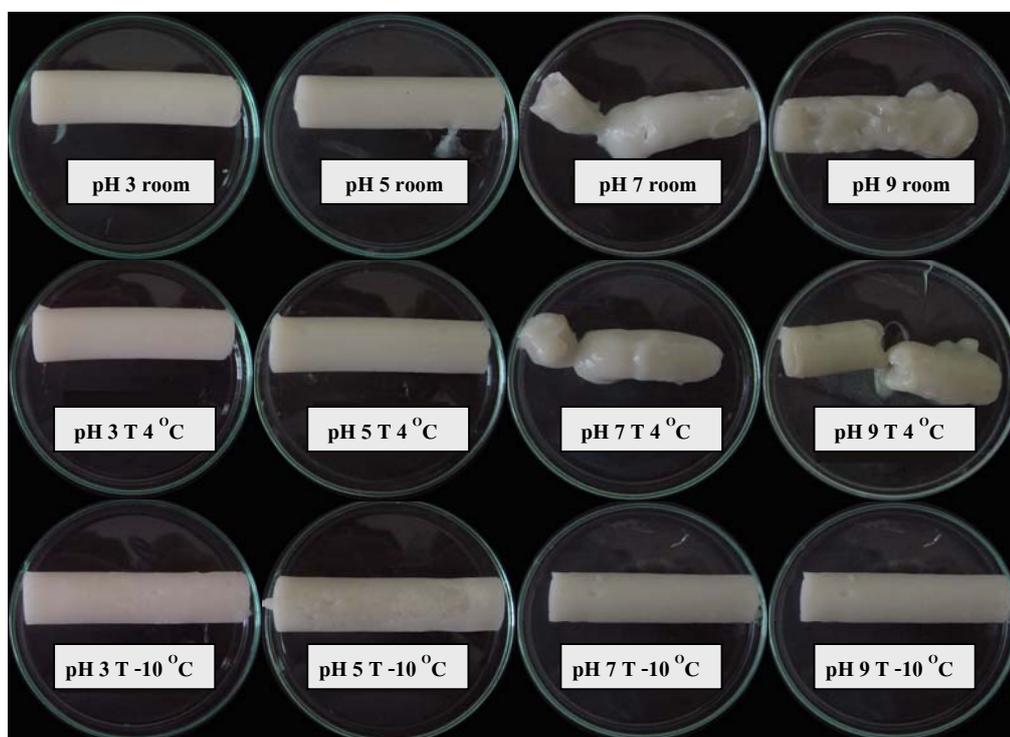
ภาพที่ 19 ลักษณะเจลแป้งข้าวฟ่างที่พันธุ์ KU 439 (439WF) ที่พีเอชต่างๆ



ภาพที่ 20 ลักษณะเจลแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 (804WF) ที่พีเอชต่างๆ



ภาพที่ 21 ลักษณะเจลแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 (439SWF) ที่พีเอชต่างๆ



ภาพที่ 22 ลักษณะเจลแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 (804SWF) ที่พีเอชต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลของพีเอชต่อสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง พบว่า พีเอชไม่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด แต่มีผลต่อความหนืดสูงสุด ความหนืดลดลง และค่าการคืนตัวของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง โดยความหนืดสูงสุดและค่าการคืนตัวของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อพีเอชสูงขึ้น แต่มีความหนืดลดลงต่ำสุดที่พีเอช 5 รองลงมาคือ พีเอช 3, 7 และ 9 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 17-18 และภาพที่ 23

จากตารางที่ 17-18 และภาพที่ 23 เมื่อพิจารณาผลของพีเอชต่อค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง พบว่า สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างมีแนวโน้มของค่าความหนืดสูงสุดสูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างอยู่ในสภาวะกรด (พีเอช 3) กรดสามารถเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชและทำการไฮโดรไลซ์โมเลกุลเอมิโลสและเอมิโลเพกตินที่พันธะ α -D-(1 \rightarrow 4) ไกลโคซิดิกภายในเม็ดสตาร์ชได้ โดยจะไฮโดรไลซ์ที่บริเวณส่วนอสัณฐานก่อน ทำให้โครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงลดลง สามารถแตกหักได้ง่าย เม็ดสตาร์ชมีการพองตัวลดลง (Wurzburg, 1989) ดังนั้นที่พีเอช 3 สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างจึงมีค่าความหนืดสูงสุดต่ำกว่าสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมที่พีเอช 5 สำหรับในสภาวะด่าง (พีเอช 7 และ 9) การที่สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างมีค่าความหนืดสูงสุดสูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับพีเอช มีความสามารถในการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายเอมิโลเพกติน ทำให้เกลียวคู่ (double helix) ของสายเอมิโลเพกตินคลายเกลียวออก ส่งผลให้โมเลกุลเอมิโลเพกตินสามารถจับกับน้ำได้มากขึ้น เม็ดสตาร์ชมีการพองตัวมากขึ้น (Roberts and Cameron, 2002) ดังนั้นสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างจึงมีค่าความหนืดสูงสุดสูงขึ้น เมื่อพีเอชของสารละลายสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของพีเอชต่อค่าความหนืดลดลงของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง พบว่า ค่าความหนืดลดลงของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างมีแนวโน้มต่ำสุดที่พีเอช 5 และจะสูงขึ้นที่พีเอช 3, 7 และ 9 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างเมื่ออยู่ในสภาวะกรด (พีเอช 3) โครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ชจะถูกทำลายโดยกรด เนื่องจากเกิดการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของสตาร์ชซึ่งจะเกิดที่บริเวณส่วนอสัณฐานก่อน ทำให้โครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงลดลง สามารถแตกหักได้ง่าย โดยจะมีการแตกหักตามแนวรัศมี (radial fissure) (Wurzburg, 1989) ดังนั้นที่พีเอช 3 สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างจึงมีค่าความหนืดลดลงสูงกว่าสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมที่พีเอช 5 สำหรับในสภาวะด่าง (พีเอช 7 และ 9) การที่สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างมีค่าความหนืดลดลงสูงกว่าสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมที่พีเอช 3 และ 5 และมีค่าความหนืดลดลงสูงขึ้น เมื่อพีเอชสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากการที่เม็ดสตาร์ชมีการพองตัวมากขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น ทำให้เม็ดสตาร์ช

มีความคงทนต่อแรงเฉือนต่ำลง (Roberts and Cameron, 2002) ดังนั้นสตา์ชและแป้งข้าวฟ่างจึงมีค่าความหนืดลดลงสูงขึ้น เมื่อพีเอชมีความเป็นด่างสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของพีเอชต่อค่าการคืนตัวของสตา์ชและแป้งข้าวฟ่าง พบว่า ค่าการคืนตัวของสตา์ชและแป้งข้าวฟ่างมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อสตา์ชและแป้งข้าวฟ่างอยู่ในสภาวะกรด (พีเอช 3) ปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์โมเลกุลภายในเม็ดสตา์ชยังคงดำเนินอยู่ในขณะที่ให้ความร้อนแก่เม็ดสตา์ช ทำให้โมเลกุลเอมิโลสและเอมิโลเพกตินมีโอกาสถูกกรดไฮโดรไลซ์ให้เป็นสายสั้นๆ ได้ ส่งผลให้เมื่อทำการลดอุณหภูมิลงการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแหของโมเลกุลเอมิโลสอาจมีความไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากโมเลกุลเอมิโลสมีสายสั้น ดังนั้นค่าการคืนตัวของสตา์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมที่พีเอช 3 จึงต่ำกว่าสตา์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมที่พีเอช 5 สำหรับในสภาวะด่าง (พีเอช 7 และ 9) การที่สตา์ชและแป้งข้าวฟ่างมีค่าการคืนตัวสูงกว่าสตา์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมที่พีเอช 3 และ 5 และมีค่าการคืนตัวสูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้นนั้น อาจเนื่องมาจากเมื่อสตา์ชและแป้งข้าวฟ่างอยู่ในสภาวะที่เป็นด่างมากขึ้น เม็ดสตา์ชจะมีการพองตัวและแตกออกได้มาก ดังนั้น โมเลกุลเอมิโลสและเอมิโลเพกตินจึงมีโอกาสหลุดออกจากเม็ดสตา์ชและเกิดการรีโทรเกรเดชันได้มากขึ้น ดังนั้นค่าการคืนตัวของสตา์ชและแป้งข้าวฟ่างในสภาวะด่างจึงสูงขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น

การศึกษาผลของพีเอชต่อสมบัติทางกลของเจลสตา์ชและแป้งข้าวฟ่าง ด้วยวิธีการวัดค่าแรงกดแบบ Single hardness โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส แสดงผลเป็นค่าความเค้น (stress; σ) และค่าความเครียด (strain; ϵ) ณ จุดที่เจลเริ่มแตก ซึ่งสัมพันธ์กับค่าแรงกดและค่าระยะทางการกด ณ จุดที่เจลเริ่มแตก ตามลำดับ ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดนี้สามารถใช้บ่งบอกได้ว่าเจลมีลักษณะเช่นไร โดยที่เจลที่มีค่าความเค้นและความเครียดสูงจะมีลักษณะแข็งและยืดหยุ่น (tough) เจลที่มีค่าความเค้นสูงแต่มีความเครียดต่ำจะมีลักษณะแข็งแต่เปราะ (brittle) เจลที่ความเค้นต่ำแต่มีความเครียดสูงจะมีลักษณะนุ่มแต่ยืดหยุ่น (rubbery) ส่วนเจลที่มีค่าความเค้นและความเครียดต่ำจะมีลักษณะนุ่มและไม่เกาะกัน (mushy) ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 19-20

ตารางที่ 17 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 ที่พีเอชต่างๆ

ตัวอย่าง	พีเอช	อุณหภูมิเริ่มเกิด	ค่าความหนืด (เซนติพอยซ์)				
		ความหนืด (°C)	ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง	ความหนืดสุดท้าย	ค่าการคืนตัว
439S	3	75.53±0.06 c	3777.67±53.46 h	1247.33±53.45 f	2530.33±31.66 c	2486.67±65.61 f	1239.33±35.92 f
	5	75.57±0.03 abc	3985.00±47.15 ef	2517.00±100.24 b	1468.00±108.25 e	4518.33±90.79 cd	2001.33±17.04 cde
	7	75.58±0.03 abc	4543.67±19.22 c	1605.33±25.11 de	2938.33±24.01 b	3421.33±33.20 e	1816.00±36.66 de
	9	75.58±0.03 abc	4825.00±175.17 b	1433.67±29.37 ef	3391.33±146.32 a	3349.67±43.25 e	1916.00±57.47 cde
439WF	3	75.57±0.06 abc	3857.00±30.45 gh	2062.67±96.72 c	1794.33±103.52 d	4869.00±104.50 bc	2806.33±76.59 b
	5	75.55±0.00 bc	3992.33±8.39 ef	2905.33±64.93 a	1087.00±63.21 f	5868.67±48.52 a	2963.33±113.00 b
	7	75.55±0.00 bc	4046.00±44.91 e	3044.00±60.01 a	1002.00±21.52 f	5193.00±546.84 b	2149.00±604.65 cd
	9	75.53±0.03 c	4023.67±75.98 ef	1996.00±398.45 c	2027.67±469.65 d	6190.67±729.59 a	4194.67±343.08 a
439SWF	3	75.55±0.00 bc	3910.33±30.17 fg	1929.67±109.66 c	1980.67±126.75 d	3663.67±139.03 e	1734.00±37.64 e
	5	75.62±0.03 a	4364.33±11.37 d	2558.67±40.62 b	1805.67±32.87 d	4687.00±71.36 cd	2128.33±35.92 cd
	7	75.57±0.03 abc	4615.33±50.84 c	1997.67±53.35 c	2617.67±96.66 c	4288.33±63.31 d	2290.67±11.68 c
	9	75.60±0.00 ab	4942.67±88.12 a	1690.33±14.47 d	3252.33±102.58 a	3744.00±75.15 e	2053.67±66.43 cde

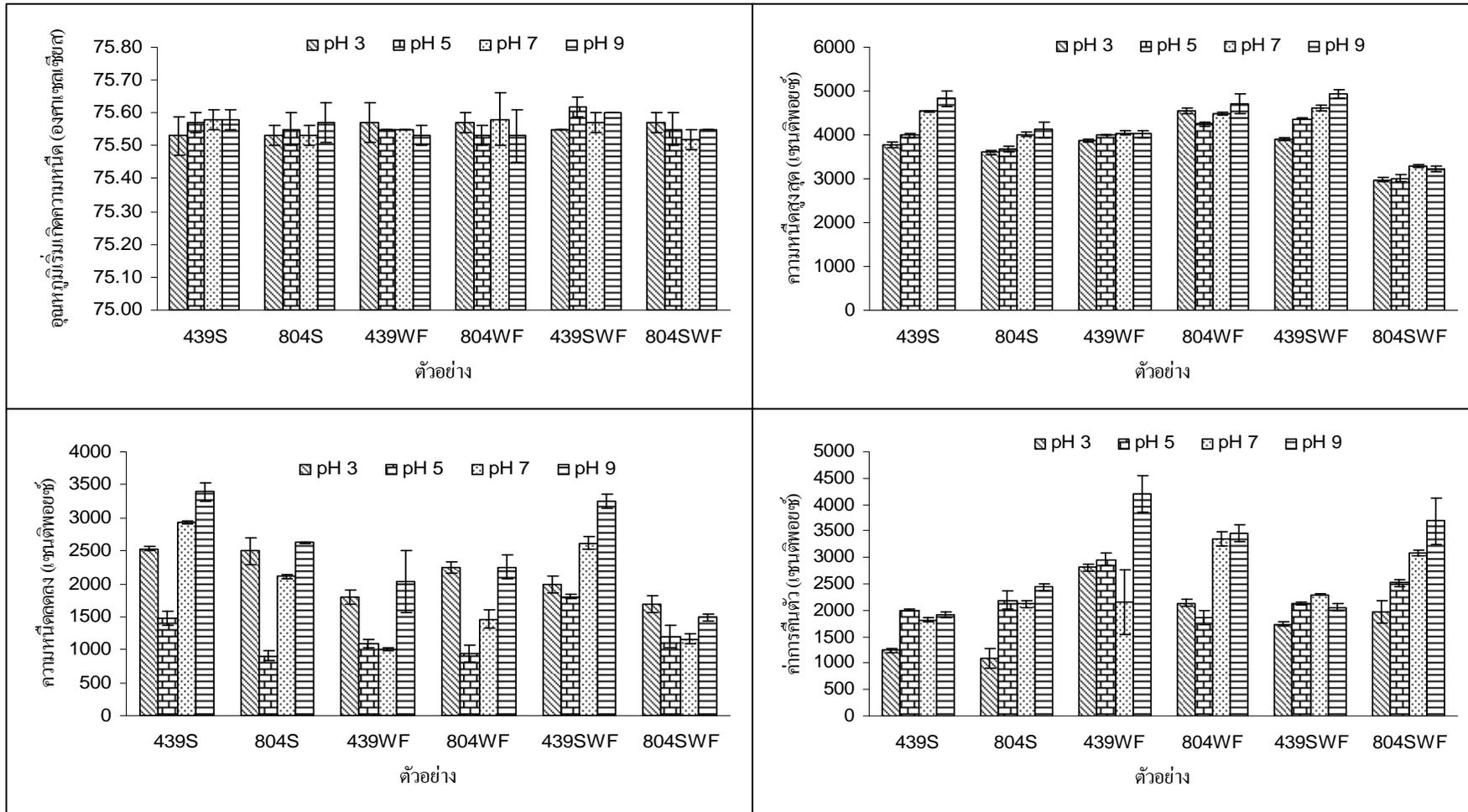
หมายเหตุ - อักษร a-h หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันมีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 18 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ที่พีเอชต่างๆ

ตัวอย่าง	พีเอช	อุณหภูมิเริ่มเกิด ความหนืด (°ซ)	ค่าความหนืด (เซนติพอยซ์)				
			ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง	ความหนืดสุดท้าย	ค่าการคืนตัว
804S	3	75.53±0.03 ns	3600.67±49.14 e	1106.67±246.42 i	2494.00±197.71 a	2204.33±436.86 h	1097.67±191.46 g
	5	75.55±0.05 ns	3670.00±57.24 e	2761.33±34.53 c	908.67±72.15 f	4954.33±154.95 d	2193.00±170.07 ef
	7	75.53±0.03 ns	4014.00±41.62 d	1902.33±18.77 fg	2111.67±34.70 b	4017.00±80.80 ef	2114.67±75.20 ef
	9	75.57±0.06 ns	4123.33±178.69cd	1494.67±166.90 h	2628.67±12.34 a	3932.33±169.67 f	2437.67±59.34 de
804WF	3	75.57±0.03 ns	4546.33±59.07 b	2301.67±132.83 de	2244.67±90.05 b	4442.33±205.46 e	2140.67±76.04 ef
	5	75.53±0.03 ns	4256.33±47.26 c	3314.00±87.11 a	942.33±131.00 f	5171.67±68.97 cd	1857.67±137.23 f
	7	75.58±0.08 ns	4477.67±33.29 b	3014.67±123.65 b	1463.00±134.36 d	6361.00±10.54 a	3346.33±134.19 bc
	9	75.53±0.08 ns	4709.00±223.62 a	2458.33±207.70 d	2250.67±185.99 b	5912.00±339.24 b	3453.67±158.53 ab
804SWF	3	75.57±0.03 ns	2983.67±39.26 g	1291.67±142.58 hi	1692.00±123.50 c	3258.33±354.03 g	1966.67±215.87 f
	5	75.55±0.05 ns	3004.00±78.31 g	1808.00±116.76 g	1196.00±178.96 e	4329.33±93.85 ef	2521.33±67.57 d
	7	75.52±0.03 ns	3289.67±41.04 f	2125.33±79.95 ef	1164.33±75.75 e	5211.00±30.81 cd	3085.67±49.90 c
	9	75.55±0.00 ns	3229.00±57.66 f	1738.67±36.30 g	1490.33±60.35 cd	5428.33±463.99 c	3689.67±441.27 a

หมายเหตุ - อักษร a-i หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันมีตัวอักษรต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- อักษร ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 และ KU 804 ที่พีเอชต่างๆ

จากผลการทดลอง พบว่า ผลของพีเอชต่อค่าความเค้นและความเครียดของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างมีแนวโน้มคล้ายกันในทุกตัวอย่าง โดยที่เจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมที่พีเอช 5 จะมีค่าความเค้นสูงสุด รองลงมา คือ พีเอช 3, 7 และ 9 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความเครียดของเจลทุกพีเอชมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าในตัวอย่างชนิดเดียวกันเมื่อปรับพีเอชของสารละลายน้ำแป้งมีผลทำให้เจลที่ได้มีความแข็งแตกต่างกัน โดยเจลที่เตรียมที่พีเอช 5 จะมีความแข็งสูงสุด รองลงมา คือ เจลที่เตรียมที่พีเอช 3, 7 และ 9 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 18 และ 19 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างเมื่ออยู่ในสภาวะกรด (พีเอช 3) โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินอาจถูกไฮโดรไลซ์ให้เป็นสายสั้นๆ ส่งผลให้การสานตัวเป็นโครงสร้างร่างแหของแอมิโลสมีความไม่ต่อเนื่อง ทำให้โครงสร้างเจลที่ได้มีความแข็งแรงต่ำกว่าเจลที่เตรียมที่พีเอช 5 ฉะนั้นค่าความเค้นของเจลที่เตรียมที่พีเอช 3 จึงต่ำกว่าเจลที่เตรียมที่พีเอช 5 สำหรับเจลที่เตรียมในสภาวะด่าง (พีเอช 7 และ 9) พบว่า เมื่อพีเอชของสารละลายน้ำแป้งสูงขึ้น เจลที่ได้จะมีค่าความเค้นลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในสภาวะด่างการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินจะชะลอตัวลง (Roberts and Cameron, 2002) ดังนั้น โครงสร้างเจลที่ได้จึงอาจไม่แข็งแรง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลสตาร์ชและเจลแป้งข้าวฟ่าง พบว่า เจลสตาร์ชมีแนวโน้มของค่าความเค้นสูงกว่าเจลแป้งข้าวฟ่าง แต่ค่าความเครียดค่อนข้างใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเจลสตาร์ชและเจลแป้งข้าวฟ่างมีความยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน แต่เจลสตาร์ชมีความแข็งมากกว่าเจลแป้งข้าวฟ่าง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในแป้งมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน และเส้นใยหยาบ เป็นต้น ซึ่งอาจไปขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างร่างแหของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ดังนั้นจึงทำให้โครงสร้างของเจลแป้งมีความแข็งแรงน้อยกว่าเจลสตาร์ช

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง พบว่า เมื่อเก็บเจลไว้ที่อุณหภูมิต่ำลงเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างจะมีค่าความเค้นสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บเจลลงจะเป็นการเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง ซึ่งจะทำให้เจลมีความแข็งและแน่นเนื้อมากขึ้น เมื่อพิจารณาเจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส พบว่า เจลมีค่าความเค้นสูงกว่าเจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แต่มีค่าความเครียดต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส มีลักษณะแข็งแต่เปราะ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเจลที่สังเกตด้วยสายตา พบว่า เจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ และมีความแข็งมากกว่าเจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

เมื่อตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างของเจดสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมในสภาวะที่เอชต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยใช้เจดสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 (439S และ 439WF) ที่เตรียมที่พีเอช 3, 5 และ 9 และเก็บเจลไว้อุณหภูมิห้องเป็นตัวแทนในการศึกษาผลของพีเอชต่อลักษณะ โครงสร้างเจดสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง เนื่องจากพีเอชมีผลต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU439 และ KU 804 เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 24 และ 25 จากภาพแสดงให้เห็นว่าเจดสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมในสภาวะที่มีพีเอชต่างกัน มีลักษณะ โครงสร้างของเจดแตกต่างกันอย่างชัดเจน และลักษณะ โครงสร้างมีความสอดคล้องกับค่าความเค้นของเจดสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่พีเอชต่างๆ โดยที่เจดสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมที่พีเอช 5 ซึ่งมีค่าความเค้นสูงสุด เมื่อตรวจสอบโครงสร้างเจดพบว่า โครงสร้างเจดมีลักษณะเป็นร่างแหที่แข็งแรงและต่อเนื่อง เส้นใยร่างแหมีขนาดใหญ่และสานตัวกันอย่างหนาแน่น ภายใน โครงสร้างเจดมีช่องว่างเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 24 (ข,จ) และ 25 (ข,จ) ส่วนเจดที่เตรียมที่พีเอช 3 ซึ่งมีค่าความเค้นรองลงมาจากเจดที่เตรียมที่พีเอช 5 พบว่า โครงสร้างเจดมีลักษณะคล้ายรวงผึ้ง เส้นใยร่างแหมีขนาดบางและไม่ต่อเนื่องภายในโครงสร้างมีช่องว่างขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก ดังแสดงในภาพที่ 24 (ก,ง) และ 25 (ก,ง) แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างเจดที่เตรียมที่พีเอช 3 นี้มีความแข็งแรงน้อยกว่าเจดที่เตรียมที่พีเอช 5 สำหรับเจดที่เตรียมที่พีเอช 9 ซึ่งมีค่าความเค้นต่ำสุด พบว่า โครงสร้างเจดมีลักษณะเป็นพื้นเรียบไม่ปรากฏเส้นใยที่สานตัวเป็น โครงสร้างร่างแห ดังแสดงในภาพที่ 24 (ค,ฉ) และ 25 (ค,ฉ) ด้วยเหตุนี้จึงอาจทำให้เจดที่ได้มีโครงสร้างไม่แข็งแรง มีค่าความเค้นต่ำสุด และในบางตัวอย่างเจดมีลักษณะนิ่มละ ไม่สามารถเกิดโครงสร้างเจดได้

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างระหว่างเจดสตาร์ชและเจดแป้งข้าวฟ่างที่พีเอชต่างๆ พบว่า ที่พีเอชเดียวกันถึงแม้ว่าเจดสตาร์ชและเจดแป้งข้าวฟ่างจะมีลักษณะ โครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน แต่ก็มีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย โดยที่พีเอช 3 และ 5 จะสังเกตเห็นได้ว่า ภายใน โครงสร้างของเจดสตาร์ชมีช่องว่างขนาดเล็กกว่าเจดแป้ง และมีการสานตัวเป็น โครงสร้างร่างแหที่หนาแน่นกว่า ดังแสดงในภาพที่ 24-25 (ก,ง) และ 24-25 (ข,จ) ส่วนที่พีเอช 9 พบว่า โครงสร้างเจดสตาร์ชมีลักษณะเป็นพื้นผิวที่เรียบและแน่นกว่าเจดแป้งข้าวฟ่าง ดังแสดงในภาพที่ 24-25 (ค,ฉ) ด้วยลักษณะ โครงสร้างที่แตกต่างกันเช่นนี้ จึงอาจทำให้ลักษณะเจดและค่าความเค้นระหว่างเจดสตาร์ชและเจดแป้งข้าวฟ่างมีความแตกต่างกัน โดยที่เจดสตาร์ชซึ่งมีลักษณะที่แน่นเนื้อกว่า และมีค่าความเค้นสูงกว่าเจดแป้งข้าวฟ่าง จะพบว่า โครงสร้างเจดมีการสานตัวเป็นร่างแหที่หนาแน่นกว่า และมีช่องว่างขนาดเล็กกว่าเจดแป้งข้าวฟ่าง

ตารางที่ 19 ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดที่เจลเริ่มแตกของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 ที่พีเอชต่างๆ

สภาวะเก็บ	พีเอช	439S		439WF		439SWF	
		ความเค้น (kPa)	ความเครียด	ความเค้น (kPa)	ความเครียด	ความเค้น (kPa)	ความเครียด
อุณหภูมิห้อง	3	5.69±0.76 i	0.70±0.05 bc	2.67±0.05 ef	0.65±0.01 b	6.21±0.20 e	0.84±0.05 c
	5	7.06±1.38 h	0.74±0.02 bc	3.79±0.15 cde	0.74±0.01 a	8.94±0.96 d	0.89±0.01 bc
	7	5.09±0.19 i	0.73±0.11 bc	1.42±0.14 f	0.59±0.02 b	6.46±1.57 e	0.93±0.00 b
	9	4.47±0.09 i	0.69±0.04 bc	**	**	3.70±0.33 f	0.92±0.04 bc
4 °C	3	11.55±0.47 f	0.87±0.00 a	3.09±0.00 de	0.66±0.01 ab	8.79±1.43 d	1.03±0.01 a
	5	14.58±0.05 e	0.75±0.02 bc	4.21±0.46 cd	0.63±0.01 b	10.68±0.22 d	0.88±0.07 bc
	7	9.12±0.01 g	0.76±0.00 b	1.75±0.01 f	0.45±0.01 c	6.09±0.64 e	0.76±0.00 d
	9	8.15±0.01 gh	0.66±0.02 c	**	**	3.69±0.32 f	0.85±0.04 c
-10°C	3	28.38±0.04 b	0.37±0.00 d	6.18±0.51 b	0.45±0.06 c	19.68±0.01 b	0.39±0.00 e
	5	34.37±0.05 a	0.39±0.00 d	10.69±1.66 a	0.45±0.11 c	24.20±1.82 a	0.39±0.04 e
	7	21.69±0.92 c	0.27±0.03 e	4.61±0.00 c	0.64±0.00 b	17.76±0.00 b	0.39±0.00 e
	9	18.15±0.13 d	0.23±0.01 e	3.82±0.65 cde	0.29±0.00 d	12.82±0.27 c	0.25±0.01 f

หมายเหตุ - อักษร a-i หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

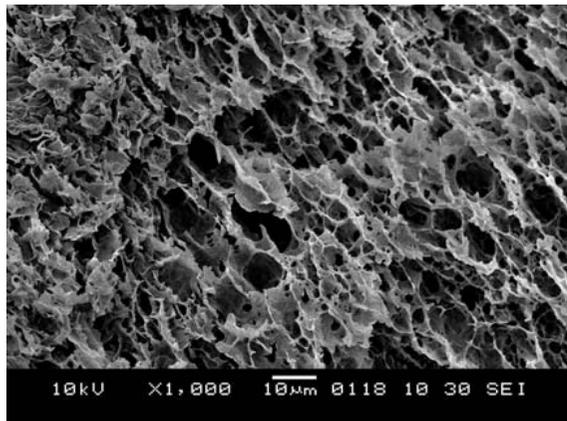
- ** หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ เนื่องจากเจลมีลักษณะนุ่มและ

ตารางที่ 20 ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดที่เจลเริ่มแตกของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ที่พีเอชต่างๆ

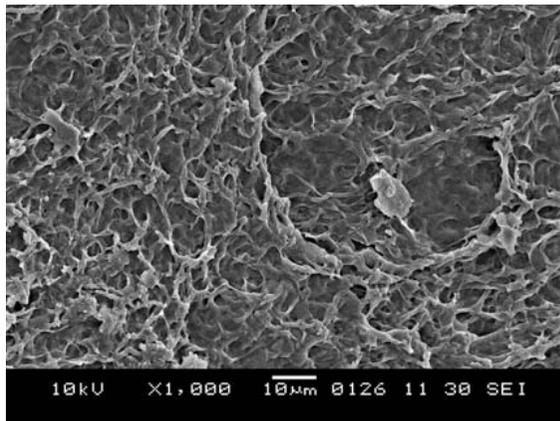
สภาวะเก็บ	พีเอช	804S		804WF		804SWF	
		ความเค้น (kPa)	ความเครียด	ความเค้น (kPa)	ความเครียด	ความเค้น (kPa)	ความเครียด
อุณหภูมิห้อง	3	8.80±0.02 fg	1.02±0.08 a	2.92±0.13 fg	0.98±0.04 a	1.50±0.18 d	0.35±0.01 d
	5	13.31±1.37 de	0.98±0.03 a	6.49±0.12 d	0.90±0.02 ab	2.13±0.10 cd	0.50±0.00 bc
	7	7.38±1.93 fg	0.94±0.02 ab	2.33±0.00 fg	0.55±0.01 cd	**	**
	9	5.80±0.62 g	0.78±0.09 c	1.43±0.42 g	0.42±0.16 de	**	**
4 °C	3	10.74±0.18 ef	0.73±0.02 c	4.73±0.01 e	0.97±0.01 ab	1.60±0.26 d	0.39±0.03 cd
	5	14.72±3.35 d	0.96±0.00 a	6.80±0.00 d	0.82±0.01 b	2.35±0.02 bc	0.59±0.00 ab
	7	9.43±0.00 efg	0.79±0.00 c	3.35±0.31 ef	0.60±0.09 c	**	**
	9	7.62±0.08 fg	0.82±0.16 bc	2.70±0.01 fg	0.55±0.06 cd	**	**
-10 °C	3	26.97±0.89 ab	0.33±0.00 d	15.85±0.56 b	0.41±0.10 de	2.91±0.62 ab	0.28±0.03 d
	5	29.82±2.19 a	0.37±0.01 d	20.83±0.03 a	0.40±0.02 de	3.45±0.51 a	0.49±0.08 bc
	7	22.02±1.88 c	0.32±0.03 d	12.71±2.06 c	0.38±0.03 e	1.94±0.55 cd	0.62±0.06 a
	9	23.38±2.98 bc	0.26±0.03 d	7.24±1.08 d	0.54±0.06 cd	1.62±0.33 cd	0.48±0.16 bc

หมายเหตุ - อักษร a-g หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05)

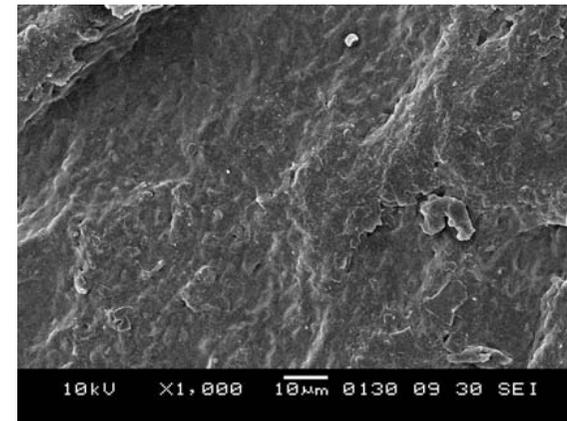
- ** หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ เนื่องจากเจลมีลักษณะนุ่มและ



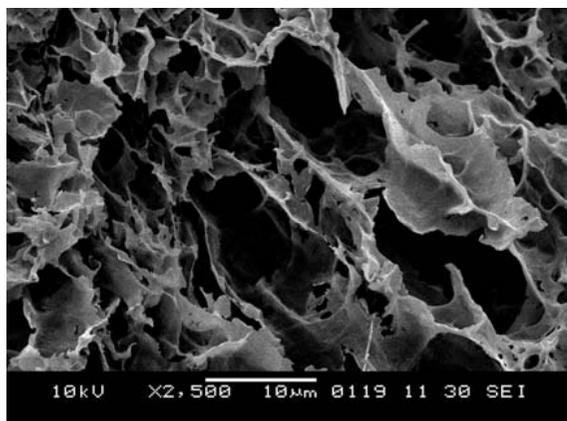
ก. pH3



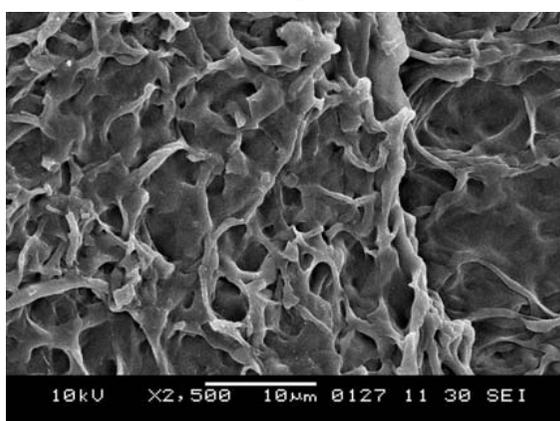
ข. pH 5



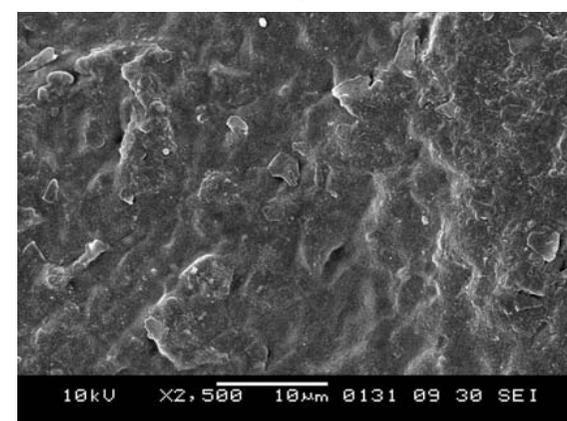
ค. pH 9



ง. pH3

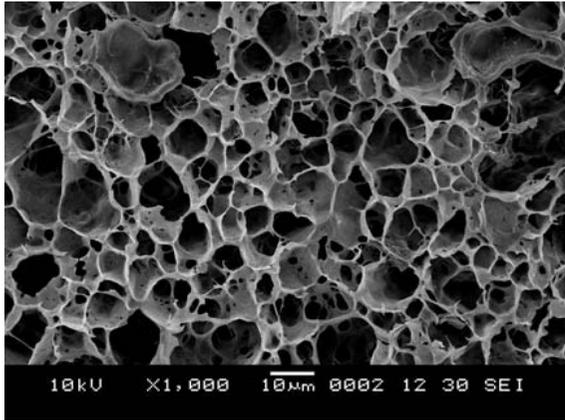


จ. pH 5

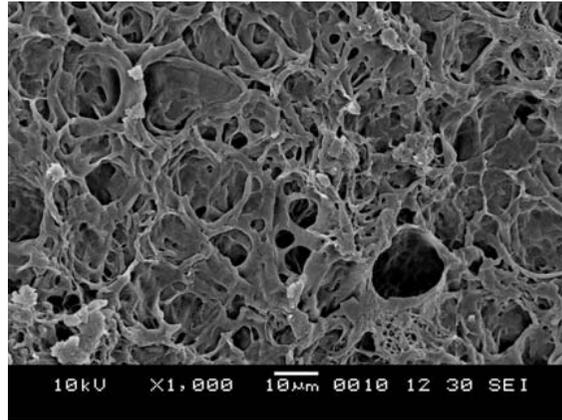


ฉ. pH 9

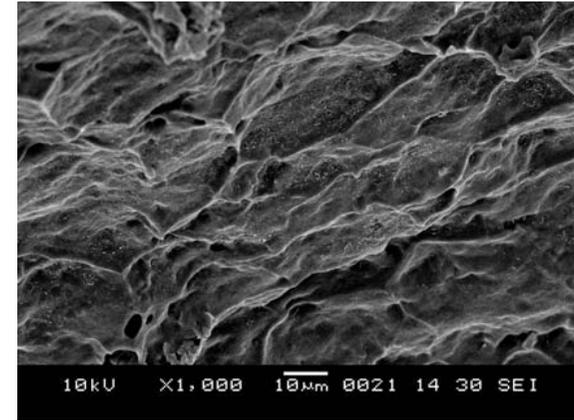
ภาพที่ 24 ลักษณะโครงสร้างของเจลสตาร์ชข้าวฟ่างพันธุ์ KU439 (439S) ที่เตรียมที่พีเอช 3, 5 และ 9 ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 1,000 (ก-ค) และ 2,500 (ง-ฉ) เท่า



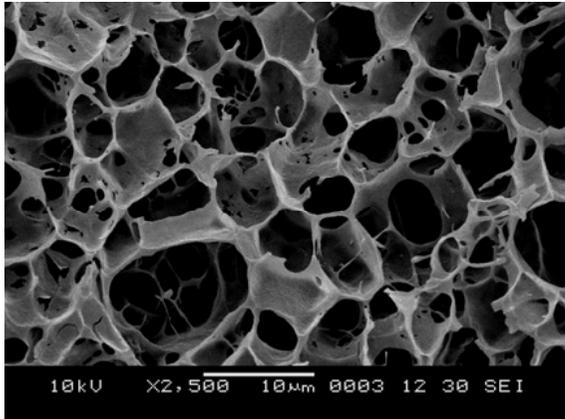
ก. pH3



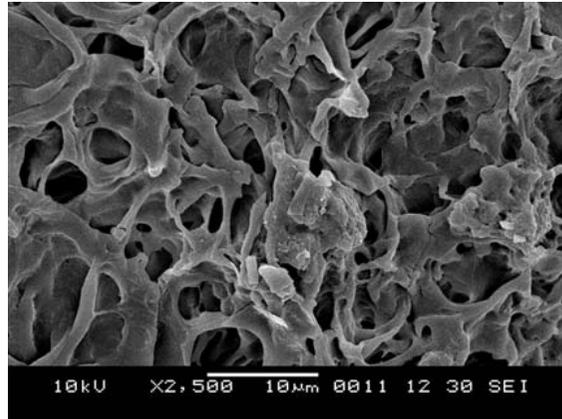
ข. pH 5



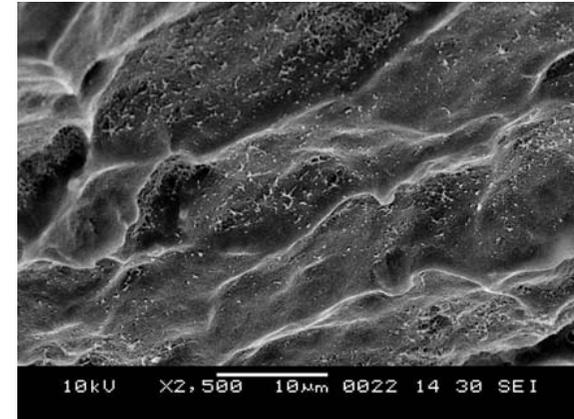
ค. pH 9



ง. pH3



จ. pH 5



ฉ. pH 9

ภาพที่ 25 ลักษณะ โครงสร้างของเจลแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU439 (439WF) ที่เตรียมที่พีเอช 3, 5 และ 9 ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 1,000 (ก-ค) และ 2,500 (ง-ฉ) เท่า

9. การศึกษาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อคุณสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

การศึกษาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง เจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างถูกเตรียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักสตาร์ชแห้ง ในสารละลายน้ำกลั่นและสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 และ 1.0 โมลาร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความเหนียวแบบรวดเร็ว เจลที่เตรียมได้จะถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27-30 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิ 4 และ -10 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 15 ชั่วโมง ก่อนนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกลโดยการวัดค่าแรงกด (Compressive test) แบบ Single hardness ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analysis) นอกจากนี้พฤติกรรมการณ์เปลี่ยนแปลงความเหนียวของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่ได้จากการเตรียมเจลด้วยเครื่อง RVA ถูกนำมาพิจารณาประกอบกับการศึกษาสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างด้วย

เมื่อพิจารณาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อพฤติกรรมการณ์เปลี่ยนแปลงความเหนียวของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความเหนียวและค่าความเหนียวสูงสุดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนค่าความเหนียวลดลงและค่าการคืนตัวมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในตารางที่ 21-22 และภาพที่ 26 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในพฤติกรรมการณ์เกิดความเหนียวดังกล่าว อาจเป็นผลมาจากอิทธิพลของโซเดียมไอออน (Na^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ที่มีผลต่อสตาร์ชและโครงสร้างของน้ำ (Jane and Ames, 1993) โดยที่ความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่ำกว่า 2 โมลาร์ เกลือโซเดียมคลอไรด์จะมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลในเซชันของสตาร์ชสูงขึ้น และเม็ดสตาร์ชมีความคงทนต่อแรงกวนได้มากขึ้น (Evans and Haisman, 1982; Oosten, 1982; Maaurf *et al.*, 2001)

การศึกษาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง ด้วยวิธีการวัดค่าแรงกดแบบ Single hardness โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส แสดงผลเป็นค่าความเค้น (stress; σ) และความเครียด (strain; ϵ) ณ จุดที่เจลเริ่มแตก ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าแรงกดและค่าระยะทางการกด ณ จุดที่เจลเริ่มแตก ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 23-24

ตารางที่ 21 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 ที่ความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ระดับต่างๆ

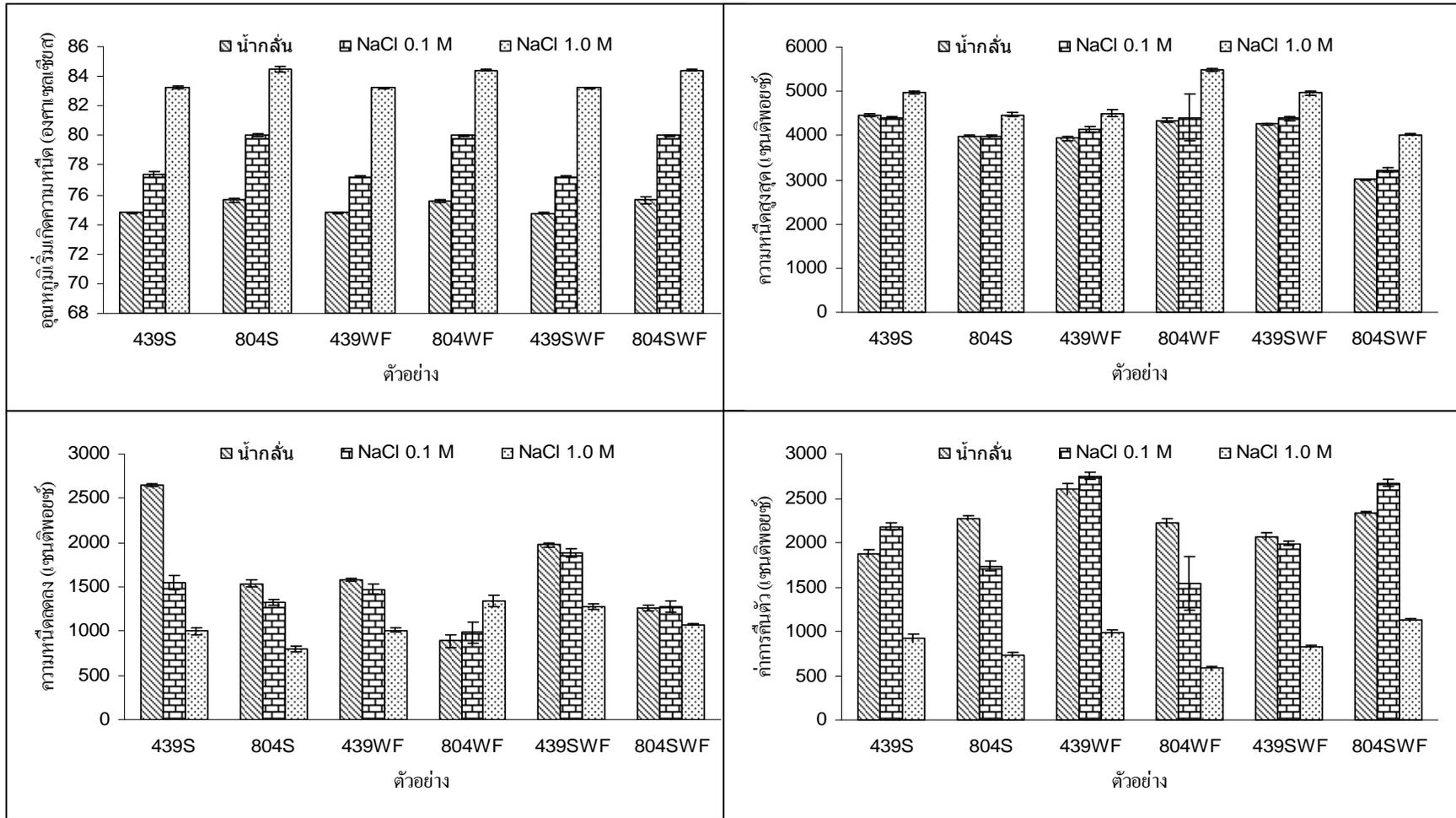
ตัวอย่าง	ความเข้มข้น NaCl (M)	อุณหภูมิเริ่มเกิด ความหนืด (°C)	ค่าความหนืด (เซนติพอยซ์)				
			ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง	ความหนืดสุดท้าย	ค่าการคืนตัว
439S	น้ำกลั่น	74.80±0.03 d	4450.67±34.12 bc	1804.83±33.74 i	2645.83±20.25 a	3683.17±76.33 g	1878.33±44.97 f
	0.1	77.38±0.22 b	4408.83±15.00 c	2864.00±76.47 d	1544.83±75.58 d	5043.50±90.51 b	2179.50±35.15 c
	1.0	83.25±0.10 a	4968.00±25.56 a	3972.83±44.08 a	998.50±33.43 g	4887.67±32.97 c	914.83±47.91 h
439WF	น้ำกลั่น	74.80±0.03 d	3934.83±45.15 f	2355.00±41.91 g	1579.83±13.53 d	4959.17±92.58 c	2604.17±60.35 b
	0.1	77.21±0.06 c	4139.33±79.12 e	2664.83±79.53 e	1474.50±59.75 e	5414.50±89.43 a	2749.67±41.74 a
	1.0	83.24±0.04 a	4500.33±85.91 b	3771.83±41.41 b	1011.17±29.38 g	4752.00±77.72 d	980.17±43.38 g
439SWF	น้ำกลั่น	74.77±0.03 d	4253.67±28.27 d	2279.67±28.68 h	1974.00±26.26 b	4350.33±64.49 f	2070.67±40.41 d
	0.1	77.23±0.03 c	4388.83±50.39 c	2510.67±37.76 f	1878.17±46.04 c	4500.83±29.84 e	1990.17±27.32 e
	1.0	83.23±0.04 a	4958.00±52.65 a	3679.33±58.54 c	1278.67±31.32 f	4500.50±45.56 e	821.17±28.03 i

หมายเหตุ - อักษร a-i หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันมีตัวอักษรต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 22 สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ที่ความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ระดับต่างๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น NaCl (M)	อุณหภูมิเริ่มเกิด ความหนืด (°C)	ค่าความหนืด (เซนติพอยซ์)				
			ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง	ความหนืดสุดท้าย	ค่าการคืนตัว
804S	น้ำกลั่น	75.65±0.15 c	3983.33±14.18 c	2444.00±36.83 e	1539.33±38.11 a	4717.50±44.09 bc	2273.50±24.31 b
	0.1	80.03±0.05 b	3980.50±15.59 c	3025.00±33.07 d	1325.67±28.71 bc	4759.00±42.02 bc	1734.00±53.50 c
	1.0	84.50±0.18 a	4475.33±49.25 b	3677.67±59.88 b	797.67±28.06 g	4415.50±54.96 d	737.83±19.95 f
804WF	น้ำกลั่น	75.58±0.07 c	4344.17±40.33 b	3457.00±43.58 c	887.17±70.73 f	5678.33±28.42 a	2221.33±49.85 b
	0.1	79.99±0.06 b	4410.83±520.17 b	3426.50±414.40 c	984.33±120.65 e	4970.50±705.94 b	1544.00±298.92 d
	1.0	84.43±0.03 a	5494.50±34.35 a	4155.67±43.77 a	1338.83±68.85 b	4735.33±20.39 bc	579.67±28.39 g
804SWF	น้ำกลั่น	75.63±0.21 c	3008.83±17.01 d	1748.17±11.30 g	1260.67±27.44 c	4076.00±12.57 e	2327.83±18.41 b
	0.1	80.01±0.04 b	3216.67±48.41 d	1939.17±52.53 f	1277.50±56.90 bc	4613.00±68.86 cd	2673.83±43.43 a
	1.0	84.43±0.03 a	4023.00±27.61 c	2952.60±22.20 d	1070.40±7.44 d	4082.00±27.76 e	1129.40±19.58 e

หมายเหตุ - อักษร a-g หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันมีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 และ KU 804 ที่ความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ระดับต่างๆ

จากผลการทดลองในตารางที่ 23-24 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลสตาร์ชและเจลแป้งข้าวฟ่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่า เจลสตาร์ชและเจลแป้งข้าวฟ่างมีความเครียดสูงใกล้เคียงกัน แต่เจลสตาร์ชมีค่าความเค้นสูงกว่าเจลแป้งข้าวฟ่าง แสดงให้เห็นว่าเจลสตาร์ชมีลักษณะแข็งกว่าเจลแป้งข้าวฟ่าง และเมื่อพิจารณาเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส พบว่า เจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างมีความเครียดค่อนข้างต่ำใกล้เคียงกัน แต่เจลสตาร์ชมีค่าความเค้นสูงกว่าเจลแป้งข้าวฟ่าง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเก็บเจลไว้ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส เจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างจะมีลักษณะที่แตกหักได้ง่ายเหมือนกัน แต่เจลสตาร์ชมีความแข็งมากกว่าเจลแป้งข้าวฟ่าง

เมื่อพิจารณาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อลักษณะเจลสตาร์ชข้าวฟ่าง (439S และ 804S) ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่า เจลสตาร์ชที่เตรียมในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ มีค่าความเค้นสูงกว่าเจลสตาร์ชที่เตรียมในสารละลายน้ำกลั่น ในขณะที่ค่าความเครียดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็น 0.1 โมลาร์ มีผลทำให้เจลสตาร์ชมีลักษณะที่แข็งมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็น 1.0 โมลาร์ พบว่า เจลสตาร์ชมีค่าความเค้นและความเครียดลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็น 1.0 โมลาร์ เจลจะมีลักษณะนิ่มและไม่เกาะกันมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถทนต่อแรงกวนได้มากขึ้น ดังนั้นเจลที่เตรียมในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่างกันจะมีสัดส่วนของปริมาณเม็ดสตาร์ชที่ไม่แตกต่อปริมาณแอมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดสตาร์ชแตกต่างกัน ส่งผลให้โครงสร้างเจลที่ได้มีความแตกต่างกัน เจลสตาร์ชที่เตรียมในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ เม็ดสตาร์ชสามารถทนต่อแรงกวนได้มากกว่าเม็ดสตาร์ชของเจลที่เตรียมในสารละลายน้ำกลั่น ดังนั้นโครงสร้างของเจลที่เตรียมในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ จึงมีปริมาณเม็ดสตาร์ชที่ไม่แตกออกฝังตัวอยู่ในโครงสร้างร่างแหของแอมิโลสมากกว่าเจลที่เตรียมในสารละลายน้ำกลั่น ซึ่งการฝังตัวของเม็ดสตาร์ชในโครงสร้างร่างแหของแอมิโลสนี้จะช่วยส่งเสริมให้โครงสร้างเจลมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นเจลสตาร์ชที่เตรียมในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ จึงมีลักษณะที่แข็งมากกว่าเจลสตาร์ชที่เตรียมในสารละลายน้ำกลั่น แต่เมื่อเตรียมเจลสตาร์ชในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เม็ดสตาร์ชมีความทนต่อแรงกวนมากขึ้น ดังนั้นจึงอาจทำให้เจลมีปริมาณเม็ดสตาร์ชที่ไม่แตกออกมากขึ้น ในขณะที่มีปริมาณแอมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดสตาร์ชลดลง ดังนั้นโครงสร้างร่างแหของเจลที่เกิดขึ้นอาจไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากมีปริมาณแอมิโลสหลุดออกมาน้อย ดังนั้นเจลที่ได้จึงมีลักษณะที่นิ่มและไม่เกาะกันมากขึ้น (หรือมีความแข็งและความ

สตาร์ช ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้สามารถขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็น โครงสร้างร่างแหของ โมเลกุล แอมิโลส ทำให้โครงสร้างร่างแหมีความไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นถึงแม้ว่าจะมีปริมาณเม็ดสตาร์ชที่ไม่แตก ออกหลงเหลืออยู่มากขึ้น ก็อาจไม่สามารถช่วยเสริมความแข็งแรงของ โครงสร้างเจลได้เลย เนื่องจากโครงสร้างร่างแหมีความไม่ต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง พบว่า เจลสตาร์ช และแป้งข้าวฟ่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีค่าความเครียดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่เจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีค่าความเค้นสูงกว่าเจลที่ เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง แสดงให้เห็นว่าเจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีความแข็งกว่าเจลที่ เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเก็บเจลไว้ที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของ โมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ทำให้เจลมีความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเจลที่เก็บไว้ ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส พบว่า เจลมีค่าความเค้นสูงกว่าและมีค่าความเครียดต่ำกว่าเจลที่เก็บ ไว้ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เก็บไว้ ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส มีลักษณะที่แข็งแต่เปราะมากกว่าเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เก็บไว้ ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเจลที่สังเกตด้วยสายตา พบว่า เจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ และมีความแข็งแรงมากกว่าเจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ ห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 23 ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดที่เจลเริ่มแตกของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 ที่ความเข้มข้นเกลือ โซเดียมคลอไรด์ต่างๆ

สภาวะเก็บ	NaCl	439S		439WF		439SWF	
	(M)	ความเค้น (kPa)	ความเครียด	ความเค้น (kPa)	ความเครียด	ความเค้น (kPa)	ความเครียด
อุณหภูมิห้อง	น้ำกลั่น	11.31±0.46 e	0.85±0.04 a	4.20±0.28 b	0.75±0.05 a	11.02±1.62 bc	0.84±0.03 a
	0.1	17.25±0.42 cd	0.90±0.04 a	3.64±0.37 b	0.63±0.00 b	12.18±0.32 bc	0.87±0.02 a
	1.0	10.42±2.48 e	0.52±0.07 b	**	**	2.68±0.10 d	0.26±0.01 f
4 °C	น้ำกลั่น	13.57±1.35 de	0.81±0.04 a	4.59±0.64 b	0.72±0.03 a	10.98±1.35 bc	0.75±0.02 b
	0.1	20.56±0.83 c	0.87±0.05 a	3.49±0.77 b	0.56±0.05 c	13.74±0.09 b	0.84±0.01 a
	1.0	11.38±0.17 e	0.54±0.00 b	**	**	9.89±1.93 c	0.50±0.06 d
-10 °C	น้ำกลั่น	29.55±5.20 b	0.34±0.04 c	13.30±1.23 a	0.51±0.04 cd	28.19±0.07 a	0.42±0.04 e
	0.1	35.16±3.89 a	0.46±0.02 b	11.33±3.40 a	0.39±0.01 e	11.45±2.88 bc	0.58±0.06 c
	1.0	10.31±0.42 e	0.51±0.03 b	3.87±1.27 b	0.48±0.01 d	2.07±0.18 d	0.35±0.02 e

หมายเหตุ - อักษร a-f หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- ** หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ เนื่องจากเจลมีลักษณะนิ่มและ

ตารางที่ 24 ค่าความเค้นและความเครียด ณ จุดที่เจลเริ่มแตกของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 ที่ความเข้มข้นเกลือ โซเดียมคลอไรด์ต่างๆ

สภาวะเก็บ	NaCl	804S		804WF		804SWF	
	(M)	ความเค้น (kPa)	ความเครียด	ความเค้น (kPa)	ความเครียด	ความเค้น (kPa)	ความเครียด
อุณหภูมิห้อง	น้ำกลั่น	11.87±0.17 c	0.97±0.04 a	2.51±0.25 e	0.50±0.03 ab	2.26±0.01 b	0.44±0.02 b
	0.1	16.06±0.58 b	0.86±0.01 b	4.35±0.22 d	0.51±0.02 ab	1.94±0.26 b	0.39±0.01 b
	1.0	6.86±0.00 d	0.43±0.02 d	2.45±0.43 e	0.25±0.03 d	**	**
4 °C	น้ำกลั่น	12.00±1.18 c	0.75±0.02 c	2.85±0.12 e	0.47±0.02 b	1.77±0.01 b	0.40±0.02 b
	0.1	15.58±1.20 bc	0.75±0.07 c	5.62±0.26 c	0.56±0.04 a	1.61±0.02 b	0.38±0.01 b
	1.0	7.96±0.02 d	0.46±0.02 d	2.54±0.10 e	0.29±0.06 d	**	**
-10 °C	น้ำกลั่น	18.54±3.68 b	0.24±0.02 e	8.71±0.88 a	0.40±0.00 c	8.21±1.90 a	0.69±0.25 a
	0.1	26.67±2.80 a	0.40±0.01 d	7.84±0.00 b	0.52±0.00 ab	1.08±0.22 bc	0.34±0.01 b
	1.0	5.70±1.13 d	0.48±0.10 d	1.29±0.25 f	0.31±0.03 d	**	**

หมายเหตุ - อักษร a-f หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- ** หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ เนื่องจากเจลมีลักษณะนิ่มละเอียด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 และ KU 804 พบว่า สตาร์ชข้าวฟ่างทั้งสองพันธุ์มีความบริสุทธิ์สูงและมีปริมาณแอมิโลสไม่แตกต่างกัน อยู่ในช่วงร้อยละ 27.76-28.66 สำหรับแป้งข้าวฟ่าง พบว่า 804F มีปริมาณ โปรตีนและไขมันสูงกว่า 439F โดยปริมาณ โปรตีนและไขมันของ 804F เท่ากับร้อยละ 9.09 และ 0.33 ตามลำดับ และ 439F เท่ากับ ร้อยละ 5.98 และ 0.16 ตามลำดับ เมื่อดูสตาร์ชข้าวฟ่างทั้งสองพันธุ์มีลักษณะกลมหลายเหลี่ยม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-20 ไมโครเมตร สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 มีกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายสูงกว่าสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 เมื่อศึกษาสมบัติทางด้านความหนืด พบว่า สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 439 มีค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดลดลงสูงกว่า แต่มีค่าความหนืดสุดท้ายและค่าการคืนตัวต่ำกว่าพันธุ์ KU 804 นอกจากนี้สมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันและรีโทรเกรเดชันสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างทั้งสองพันธุ์ไม่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันอยู่ในช่วง 74.65-81.76 และ 70.84-79.75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 25

การศึกษาอิทธิพลของการแช่เมล็ดข้าวฟ่างต่อสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งข้าวฟ่าง พบว่า การแช่มีผลทำให้องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้สมบัติอื่นๆ ของแป้งข้าวฟ่างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น สมบัติทางความหนืด เป็นต้น โดยที่การแช่เมล็ดมีผลทำให้เมล็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวมากขึ้น และแป้งข้าวฟ่างมีปริมาณ โปรตีนลดลง แต่มีปริมาณไขมัน ถั่ว และเส้นใยหยาบสูงขึ้น โดยเฉพาะข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 เมื่อนำเมล็ดไปผ่านกระบวนการแช่ เมล็ดจะมีความเปราะมาก ทำให้ไม่สามารถขัดสีเปลือกออกได้หมด ดังนั้นแป้งข้าวฟ่างพันธุ์ KU 804 จึงมีการปนเปื้อนขององค์ประกอบที่ติดมาจากเปลือกมาก จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางความหนืด พบว่า ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง โดยปริมาณโปรตีนมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกับค่าความหนืดสูงสุด ($r = -0.741$) และความหนืดลดลง ($r = -0.981$) ปริมาณถั่วและไขมันมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด ($r = 0.938$ และ

$r = 0.881$ ตามลำดับ) และปริมาณเส้นใยหยาบมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกับค่าความหนืดสุดท้าย ($r = -0.985$)

การศึกษาผลของพีเอชต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง พบว่า พีเอชมีผลต่อพฤติกรรมการเกิดความหนืดของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง โดยในสภาวะกรด (พีเอช 3) เม็ดสตาร์ชมีความคงทนต่อแรงกดดันต่ำลง ดังนั้นจึงทำความหนืดสูงสุดและการคืนตัวมีแนวโน้มลดลง แต่ความหนืดลดลงมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับที่พีเอช 5 สำหรับในสภาวะด่าง (พีเอช 7 และ 9) ด่างมีผลทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวมากขึ้น และสามารถทนต่อแรงเฉือนต่ำลง ดังนั้นจึงทำให้ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดลดลง และค่าการคืนตัวมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อพีเอชสูงขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้มีผลต่อลักษณะ โครงสร้างและสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง โดยเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมที่พีเอช 5 มีความแข็งแรงมากที่สุด รองลงมาคือ เจลที่เตรียมที่พีเอช 3, 7 และ 9 ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะ โครงสร้างเจลที่พบว่า โครงสร้างของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่เตรียมที่พีเอช 5 มีลักษณะเป็นโครงสร้างร่างแหที่ต่อเนื่องและหนาแน่นกว่าเจลที่เตรียมที่พีเอช 3 ซึ่งมีลักษณะ โครงสร้างร่างแหคล้ายรังผึ้ง เส้นใยร่างแหมีขนาดบางและไม่ต่อเนื่อง สำหรับเจลที่เตรียมที่พีเอช 9 พบว่า โครงสร้างมีลักษณะเป็นพื้นเรียบ ไม่ปรากฏโครงสร้างร่างแห

การศึกษาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติทางความหนืดและสมบัติทางกลของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง พบว่า เกลือโซเดียมคลอไรด์มีอิทธิพลต่อสตาร์ชและ โครงสร้างของน้ำ ทำให้เม็ดสตาร์ชมีความคงทนต่อแรงกดดันมากขึ้น ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น สตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างจึงมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงขึ้น และมีค่าความหนืดลดลงต่ำลง เมื่อความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น ส่งผลให้เจลที่ได้มีสมบัติทางกลแตกต่างกัน โดยที่ความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ เจลสตาร์ชและแป้ง 439SWF และ 804WF ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะมีความแข็งแรงสูงสุด รองลงมา คือ เจลสตาร์ชและแป้ง 439SWF และ 804WF ที่เตรียมในสารละลายน้ำกลั่นและสารละลายเกลือ โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ตามลำดับ แต่สำหรับเจลแป้ง 439WF และ 804SWF จะมีความแข็งแรงลดลงเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น

ตารางที่ 25 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

คุณสมบัติ	สตาร์ชข้าวฟ่าง	แป้งข้าวฟ่าง
1. องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)		
- ความชื้น	10.13-10.85	7.92-9.94
- ไขมัน	0.06-0.09	0.16-0.95
- โปรตีน	0.28-0.30	5.17-7.00
- เถ้า	0.04-0.07	0.15-0.56
- เส้นใยหยาบ	0.10-0.25	0.10-0.66
- คาร์โบไฮเดรต	99.36-99.47	90.10-93.57
2. ปริมาณแอมิโลส (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)		
- วิธีเกิดสีกับไอโอดีน	27.76-28.66	-
- วิธี Con A	35.24-35.52	-
3. รูปร่างเม็ดแป้ง	กลม หลายเหลี่ยม	กลม หลายเหลี่ยม
4. ขนาดเม็ดสตาร์ช (ไมโครเมตร)	10-20	10-20
5. กำลังการพองตัว ที่ 95 °ซ (กรัม/กรัม)	20.56-21.83	13.61-16.73
6. ความสามารถในการละลาย ที่ 95 °ซ (%)	20.43-22.63	13.42-23.90
7. อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (°ซ)	73.53-75.53	71.35-78.00
8. ความหนืดสูงสุด (เซนติพอยซ์)	3291.50-4052.50	1924.00-2478.50
9. ความหนืดลดลง (เซนติพอยซ์)	1646.50-2654.50	130.50-878.50
10. ความหนืดสุดท้าย (เซนติพอยซ์)	3050.00-3525.50	2720.00-3255.00
11. ค่าการคืนตัว (เซนติพอยซ์)	1652.00-1880.50	1246.00-1403.00
12. ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาคีไนซ์ (°ซ)	74.65-81.76	70.84-79.75
13. พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาคีไนซ์ (จูล/กรัม)	12.85-13.49	9.07-13.66

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในแป้งข้าวฟ่างมีรงควัตถุจำพวกแอนโทไซยานินอยู่ ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวฟ่างมีสีเปลี่ยนแปลงตามพีเอช โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้สภาวะต่างในกระบวนการผลิต เช่น เส้นบะหมี่ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสีเขียวคล้ำไม่เป็นที่ยอมรับจากผู้บริโภค ดังนั้นในการแก้ไขปัญหานี้อาจทำได้โดยการใช้เครื่องมือที่จำเพาะและมีประสิทธิภาพในการวัดสีเปลือกข้าวฟ่างหรืออาจนำเมล็ดหรือแป้งข้าวฟ่างมาผ่านกระบวนการกำจัดรงควัตถุออกก่อนนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจทำให้สมบัติบางประการของแป้งข้าวฟ่างเปลี่ยนแปลงไป

2. การศึกษาผลของพีเอชต่อสมบัติการเกิดเจลของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างควรมีการศึกษาโครงสร้างละเอียด (fine structure) ของเจลสตาร์ชและแป้งที่พีเอชต่างๆ เพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางโครงสร้างละเอียดต่อสมบัติเชิงกลและลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาค (micro structure) ของเจลสตาร์ชและแป้งที่พีเอชต่างๆ

3. การศึกษาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติการเกิดเจลของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างควรมีการศึกษาถึงกลไกการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอออนของเกลือที่มีต่อโมเลกุลของสตาร์ชและโครงสร้างของน้ำ เช่น วัดการพองตัวของเม็ดสตาร์ชในสารละลายเกลือความเข้มข้นต่างๆ ตรวจสอบและติดตามการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอออนของเกลือและโมเลกุลของสตาร์ช โดยเทคนิคทางนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy; NMR) และศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่ความเข้มข้นต่างๆ ของเกลือโซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น

4. เนื่องจากในแป้งข้าวฟ่างมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความบทบาทสำคัญต่อสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์และสมบัติการเกิดเจลของแป้งข้าวฟ่างรวมอยู่ด้วย ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาอิทธิพลของการแช่ พีเอชและเกลือ โซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติของโปรตีนด้วย เช่น สมบัติการละลายและการเกาะกลุ่ม (aggregation) ของโปรตีน เพื่อให้เข้าใจว่าสภาวะดังกล่าวมีอิทธิพลต่อสมบัติของแป้งข้าวฟ่างโดยรวมอย่างไร

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. ครั้งที่ 2. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ณัฐกฤตา สุวรรณทิป. 2541. การสกัดแป้งจากเมล็ดข้าวฟ่างโดยการโม่แห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย สุวรรณสิขณน์. 2544. การวัดค่าเนื้อสัมผัส. เอกสารประกอบการสอนวิชาการวัดค่าปัจจัยคุณภาพทางเคมีและกายภาพ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ธำรงศิลป์ โพธิ์สูง. 2530. การปรับปรุงพันธุ์ข้าวฟ่าง. เอกสารวิชาการ โครงการปรับปรุงพันธุ์ข้าวฟ่าง (ศ.2.1). ศูนย์วิจัยข้าวโพดข้าวฟ่างแห่งชาติ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา.
- นฤวิจน์ ชีวานันทรชัย, ธงชัย สุวรรณสิขณน์ และ ปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2545. การวัดค่าคุณภาพเนื้อสัมผัสทางกลของเจลแป้งข้าวเจ้าและเจลแป้งมันสำปะหลัง, น. 471-478. ใน การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 40. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นิตติ เต็มเวชยานนท์. 2543. การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธี Ball-Mill และศึกษาสมบัติของแป้งดัดแปร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิธิยา รัตนานนท์. 2539. คอลลอยด์. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- ปาริฉัตร หงสประภาส. 2545. เคมีกายภาพของอาหาร: คอลลอยด์ อิมัลชัน และเจล. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วรางคณา สงวนพงษ์. 2544. การลดขนาดเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งที่ได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิภา สุโรจนะเมธากุล. 2541. คุณสมบัติของข้าวและการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการผลิตก๋วยเตี๋ยวและเส้นหมี่, น. 33-51. ใน รายงานการสัมมนาเรื่องการพัฒนาเพื่อยกระดับอุตสาหกรรมก๋วยเตี๋ยวและขนมจีนโดยใช้เทคโนโลยีที่สะอาด. กรุงเทพฯ.

ศิวาพร ศิวเวชช. 2533. ผลกระทบจากข้าวฟ่าง เล่ม 1. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมาคมการค้าอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทย. 2531. อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังของไทย. สมาคมการค้าอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทย, กรุงเทพฯ.

AACC. 2000. **Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists.** American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota.

Ahmad, F.B. and P.A. Williams. 1999. Effect of salts on the gelatinization and rheological properties of sago starch. **J. Agric. Food. Chem.** 47: 3359-3366.

AOAC. 2000. **Official Method of Analysis.** AOAC International, Maryland.

Awika, J.M. and L.W. Rooney. 2004. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. **Phytochem.** 65: 1199-1221.

Barikmo, I., F. Ouattara and A. Oshaug. 2004. Protein, carbohydrate and fibre in cereals from Mali: how to fit the results in a food composition table and database. **J. Food Compos. Anal.** 17: 291-300.

- de Barros, E.G., K. Takasaki, A.W. Kirleis and B.A. Larkins. 1991. Nucleotide sequence of a cDNA clone encoding γ -kafirin protein from *Sorghum bicolor*. **Plant Physiol.** 97: 1606-1607.
- Bear, R.S. 1942. The significance of the "V" X-ray diffraction patterns obtained from starch. **J. Am. Chem. Soc.** 64: 1388-1392.
- Bourne, M.C. 1982. **Food Texture and Viscosity: Concept and measurement.** Academic Press, New York.
- Bowers, J. 1992. **Food Theory and Applications.** Macmillan Publishing Company, New York.
- Buffo, R.A., C.L. Weller and A. Gennadios. 1997. Films from laboratory extracted sorghum kafirin. **Cereal Chem.** 74: 473-475.
- Chaplin, M. 2008. **Hofmeister Serie.** Water Structure and Science. Available source: www.lsbu.ac.uk/water/hofmeist.html, February 7, 2008.
- Chen, Y.Y., A.E. McPherson, M. Radosavljevic, V. Lee, K.S. Wong and J. Jane. 1998. Effects of starch chemical structures on gelatinization and pasting properties. **Suppl.** 4: 63-70.
- Damodaran, S. 1994. Structure-function relationship of food protein, pp. 1-38. *In* N.S. Hettiarachchy and G.R. Ziegler, eds. **Protein Functionality in Food System.** Marcel Dekker Inc., New York.
- Doggett, H. 1970. **Sorghum.** Longmans, London.
- Duodu, K.G., J.R.N. Taylor, P.S. Belton and B.R. Hamaker. 2003. Factors affecting sorghum protein digestibility. **J. Cereal Sci.** 38: 117-131.

- Eliasson, A.C. 1996. **Carbohydrates in Food**. Marcel Dekker Inc., New York.
- _____ and M. Gudmundsson. 1996. Starch: Physicochemical and functional aspects, pp. 131-503. *In* A.C. Eliasson, ed. **Carbohydrates in Food**. Marcel Dekker Inc., New York.
- Emmambux, M.N., M. Stading and J.R.N. Taylor. 2004. Sorghum kafirin film property modification with hydrolysable and condensed tannins. **J. Cereal Sci.** 40: 127-135.
- Evans, I.D. and D.R. Haisman. 1982. The effect of solutes on the gelatinization temperature range of potato starch. **Starch/Starke.** 34: 224-231.
- Fredriksson, H., J. Silverio, R. Andersson, A.C. Eliasson and P. Åman. 1998. The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches. **Carbohydr. Polym.** 35: 119-134.
- French, A.D. 1979. Allowed and preferred shapes of amylose. **Bakers Dig.** 53: 39-46.
- Friedman, R.B. 1995. Interactions of starches in foods, pp. 171-198. *In* A.G. Gaonkar, ed. **Ingredient Interaction**. Marcel Dekker Inc., New York.
- Gudmundsson, M. 1994. Retrogradation of starch and the role of its components. **Thermochem. Acta.** 246: 329-341.
- Goodfellow, B. and R.H. Wilson. 1990. A Fourier transform IR study of the gelation of amylose and amylopectin. **Biopolymers.** 30: 1183-1189.
- Hahn, R.R. 1969. Dry milling of sorghum grain. **Cereal Sci. Today.** 14: 234.

- Hamaker, B.R. and B.A. Bugusu. 2003. **Overview: sorghum proteins and food quality.**
Department of Food Science. Purdue University and the INTSORMIL CRSP West
Lafayette, Indiana, USA. Available Source: www.afripro.org.uk/papers/Paper08Hamaker.pdf,
May 20, 2003.
- Hermansson, A.M. and K. Svegmarm. 1996. Developments in the understanding of starch
functionality. **Trends Food Sci. Tech.** 7: 345-353.
- Jackson, D.S., C. Choto-Owen, R.D. Waniska and R.W. Rooney. 1988. Characterization of
starch cooked in alkali by aqueous high-performance size-exclusion chromatography.
Cereal Chem. 65: 493-496.
- Jacobson, M.R., M. Obanni and J.N. Bemiller. 1997. Retrogradation of starches from
different botanical sources. **Cereal Chem.** 74: 511-518.
- Jankowski, T. and C.K. Rha. 1986. Retrogradation of starch in cooked wheat. **Starch/Starke.**
38: 6-9.
- Jane, J.L. and I.A. Ames. 1993. Mechanism of starch gelatinisation in neutral salt solutions.
Starch/Starke. 45: 161-166.
- Joseph, M.A. and L.W. Rooney. 2004. Sorghum phytochemicals and their potential impact on
human health. **Phytochem.** 65: 1199-1221.
- Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled rice amylose. **Cereal Sci. Today.** 16: 334-
338.
- Karim, A.A., M.H. Norziah and C.C. Seow. 2000. Methods for the study of starch
retrogradation. **Food Chem.** 71: 9-36.

- Kim, J.O., W.S. Kim and M.S. Shin. 1997. A comparative study on retrogradation of rice starch gels by DSC, X-ray and α -amylose methods. **Starch/Starke**. 49: 71-75.
- Kim, W.S. and P.A. Seib. 1993. Apparent restriction of starch swelling in cooked noodles by lipids in some commercial wheat flours. **Cereal Chem.** 70: 367-372.
- Kugimiya, M., J.W. Donovan and R.Y. Wong. 1980. Phase transitions of amylose-lipid complexes in starches: A calorimetric study. **Starch/Starke**. 32: 265.
- Leach, M.W., L.D. McCowen and T.G. Schoch. 1959. Structure of the starch granule. I. Swelling and solubility patterns of various starches. **Cereal Chem.** 36: 534.
- Lewis, M.J. 1990. **Physical Properties of Foods and Food Processing Systems**. Woodhead Publishing Limited, England.
- Li, J.Y. and A.I. Yeh. 2001. Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches. **J. Food Eng.** 50: 141-148.
- Lii, C.Y. and B.L. Lee. 1993. Heating A-, B- and C-type starches in aqueous sodium chloride: effect of sodium chloride concentration and moisture content on differential scanning calorimetry thermograms. **Cereal Chem.** 70: 188-192.
- Maaurf, A.G., Y.B. Che Man, B.A. Asbi, A.H. Junainah and J.F. Kennedy. 2001. Gelatinisation of sago starch in the presence of sucrose and sodium chloride as assessed by differential scanning calorimetry. **Carbohydr. Polym.** 45: 335-345.
- Matz, S.A. 1991. **The Chemistry and Technology of Cereals as Food and Feed**. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Medcalf, D.G. and K.A. Gilles. 1966. Effect of a lyotropic ion series on the pasting characteristics of wheat and corn starches. **Starch/Starke**. 4: 101-105.

- Miller, D.F. 1958. **Composition of cereal grains and forages**. N.A.S./N.R.C. Pub. No. 585, Washington D.C.
- Mistry, A.H. and S.R. Eckhoff. 1992. Characteristic of alkali-extracted starch obtained from corn flour. **Cereal Chem.** 69: 296-303.
- Morrison, W.R., R.F. Tester, M.J. Gidley and J. Karkalas. 1994. Resistance to acid hydrolysis of lipid-complexed amylose and lipid-free amylose in lintnerised waxy and non-waxy barley starches. **Carbohydr. Res.** 245: 289-302.
- Mosse, J., J.-C Huet and J. Baudet. 1988. The amino acid composition of whole grain in relation to its nitrogen content. **Cereal Chem.** 65: 271-277.
- Newport Scientific. 1995. **Operation Manual for the Series 4 Rapid Visco Analyzer**. Warriewood, Australia.
- Oosten, B.J. 1982. Tentative hypothesis to explain how electrolytes affect the gelatinization temperature of starches in water. **Starch/Stärke**. 34: 233-239.
- _____. 1990. Interaction between starch and electrolytes. **Starch/Stärke**. 42: 327-331.
- Peleg, M. 1997. Review: Mechanical properties of dry cellular solid food. **Food Sci. Technol. Int.** 3: 227-240.
- Pomeranz, Y. 1991. **Functional Properties of Food Component**. Academic Press, Inc. New York.
- Roberts, S.A. and R.E. Cameron. 2002. The effect of concentration and sodium hydroxide on the rheological properties of potato starch gelatinization. **Carbohydr. Polym.** 50: 133-143.

- Rohwer, R.G. and R.E. Klem. 1984. Acid-modified starch: production and uses, pp. 529-574. In R.L. Whistler, J.N. Bemiller and E.F. Paschall, eds. **Starch: Chemistry and Technology**. Academic Press Inc., Florida.
- de Rose, R.T., D.P. Ma, I.S. Kwon, S.E. Hasnain, R.C. Klassy and T.C. Hall. 1989. Characterisation of the kafirin gene family from sorghum reveals extensive homology with zein from maize. **Plant Mol. Biol.** 12: 245-256.
- Rooney, L.W. and J.M. Awika. 2005. Overview of products and health benefits of specialty sorghums. **Cereal Food World.** 50: 109-115.
- _____ and R.D. Sullins. 1977. The structure of sorghum and its relation to processing and nutritional value, pp. 91-109. In D.A.V. Dendy, ed. **Symposium on Sorghum and Millets for Human Food**. Tropical Products Institute, London.
- _____ and S.O. Serna-Saldivar. 2000. Sorghum, pp. 149-175. In K. Kulp and J.G. Ponte Jr., eds. **Handbook of Cereal Science and Technology**. Marcel Dekker Inc., New York.
- Shull, J.M., J.J. Watterson and A.W. Kirleis. 1992. Purification and immunocytochemical location of kafirin in *Sorghum bicolor* (L. Moench) endosperm. **Protoplasma.** 171: 64-74.
- Sievert, D. and Y. Pomeranz. 1989. Enzyme-resistant starch. I. characterization and evaluation by enzymatic, thermoanalytical, and microscopic methods. **Cereal Chem.** 66: 342-347.
- _____ and P. Würsch. 1993a. Amylose chain association based on differential scanning calorimetry. **J. Food Sci.** 58: 1332-1334.
- _____ and _____. 1993b. Thermal behavior of potato amylose and enzyme resistant starch from maize. **Cereal Chem.** 70: 333-338.

- Spence, K.E. and J. Jane. 1999. Physicochemical properties of selected root and tuber starches. **Carbohydr. Polym.** 40: 57-70.
- Stephen, A.M. 1995. **Food Polysaccharides and Their Application.** Marcel Dekker Inc., New York.
- Takaya, T., C. Sano and K. Nishinari. 2000. Thermal studies on the gelatinisation and retrogradation of heat-moisture treated starch. **Carbohydr. Polym.** 41: 97-100.
- Tang, J., J. Lelievre, M.A. Tung and Y. Zeng. 1994. Polymer and ion concentration effects on gellan gel strength and strain. **J. Food Sci.** 59: 216-220.
- Thomas, W.R. 1997. Carrageenan, pp. 45-59. *In* A. Imerson, ed. **Thickening and Gelling Agent for Foods.** Blackie Academic & Professional, London.
- Unnikrishnan, K.R. and K.R. Bhattacharya. 1981. Swelling and solubility behavior of parboiled rice flour. **Food Technol.** 16: 403-408.
- Walker, D.A. 1976. Preparation of geological samples for scanning electron microscopy, p. 68. *In* A. Delokkunanund. **Specimen Preparation for SEM.** Kasetsart University, Bangkok.
- Wang, F.C., D.S. Chung, P.A. Seib and Y.S. Kim. 2000. Optimum steeping process for wet milling of sorghum. **Cereal Chem.** 77: 478-483.
- Waniska, R.D. 2000. **Structure, phenolic compounds and antifungal proteins of sorghum caryopses in technical and institutional options for sorghum grain mold management: proceedings of an international consultation.** ICRISAT, Patancheru India. pp 72-106. Available source: www.icrisat.org/text/research/grep/homepage/sgmm/chap4.pdf, May 27, 2005

- Watson, S.A. 1984. Corn and Sorghum starches: Production, pp. 417-468. *In* R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E.F. Paschall, eds. **Starch: Chemistry and Technology**. Academic Press Inc., Florida.
- Watson, S.A. and Y. Hirata. 1954. A method for evaluating the wet millability of steeped corn and grain sorghums. **Cereal Chem.** 31: 423-432.
- Whistler, R.L. and J.N. BeMiller. 1999. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists**. American Association of Cereal Chemistry Inc., St. Paul, MN, USA.
- Wurzburg, O.B. 1986. **Modified Starches: Properties and Uses**. CRC Press Inc., Florida.
- Young, A.H. 1984. Fractionation of Starch. *In* R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E.F. Paschall, eds. **Starch Chemistry and Technology**. Academic Press Inc., Florida.
- Youssef, A.M. 1998. Extractability, fractionation and nutritional value of low and high tannin sorghum proteins. **Food Chem.** 63: 325-329.
- Zhang, G. and B.R. Hamaker. 1998. Low α - Amylase starch digestibility of cooked sorghum flours and the effect of protein. **Cereal Chem.** 75: 710-713.
- Zhang, Y. and P.S. Cremer. 2006. Interactions between macromolecules and ions: the Hofmeister series. **Curr. Opin. Chem. Biol.** 10: 658-663.
- Zobel, H.F. 1984. Gelatinization of starch and mechanical properties of starch paste. *In* R.L. Whistler, J.N. Bemiller and E.F. Paschall, eds. **Starch: Chemistry and Technology**. Academic Press Inc., Florida.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การสกัดสารข้าวฟ่าง

การสกัดสารช้าวฟาง

ก1. การสกัดสารช้าวฟาง

การสกัดสารช้าวฟาง ทำโดยดัดแปลงวิธีของ Wang *et al.* (2000)

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1.1 เครื่องปั่นน้ำผลไม้แบบเปี่ยก (warring blender)

1.1.2 เครื่องปั่นน้ำผลไม้แบบแห้ง (warring blender)

1.1.3 ตะแกรงร่อนขนาด 16, 100 และ 270 เมช

1.1.4 ตู้อบแบบลมร้อน (hot air oven)

1.2 วิธีการสกัด

1.2.1 นำเมล็ดช้าวฟางที่ผ่านการแช่แล้วมาทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด เพื่อกำจัดสารเคมีออก จนได้สารละลายน้ำล้างมีค่าพีเอช เท่ากับ 7.0

1.2.2 นำเมล็ดที่ล้างสะอาดแล้วมาบดหยาบด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ นาน 2 นาที โดยใช้ อัตราส่วนระหว่างเมล็ดต่อน้ำ เท่ากับ 1 : 1

1.2.3 นำมากรองผ่านตะแกรงร่อนขนาด 16 เมช โดยใช้น้ำช่วยชะประมาณ 6 เท่าของ น้ำหนักเมล็ด ค่อยๆ โปรงน้ำลงบนตะแกรงพร้อมกับใช้ทัพพีกวนเบาๆ เพื่อช่วยให้การแยกดีขึ้น

1.2.4 นำส่วนที่กรองผ่านตะแกรงมาบดละเอียดซ้ำอีกรอบนาน 2 นาที

1.2.5 นำของเหลวที่บดได้ มาตั้งทิ้งไว้ให้ของแข็งตกตะกอนประมาณ 30 นาที และเท น้ำส่วนบนแยกเก็บไว้ ประมาณ 1 ลิตร ให้เหลือแต่ส่วนของเหลวชั้นที่บดละเอียด

1.2.6 นำส่วนของเหลวชั้นที่บดละเอียดมากรองผ่านตะแกรงร่อนขนาด 270 เมช โดย ใช้น้ำจากส่วนที่แยกเก็บไว้มาล้างสิ่งที่กรอง ค่อยๆ โปรงน้ำลงบนตะแกรงพร้อมใช้ทัพพีกวนเบาๆ เพื่อช่วยให้สารช้าวฟางผ่านรูตะแกรงได้

1.2.7 นำสารละลายที่กรองได้ซึ่งเป็นส่วนของสารช้าวฟางและโปรตีน เทใส่ในภาชนะ อะลูมิเนียม แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้สารช้าวฟางตกตะกอนลงมา จากนั้นค่อยๆ เทน้ำ ส่วนบนทิ้งไป

1.2.8 นำส่วนของตะกอนสสารและโปรตีนที่เหลือมาเติมน้ำกลั่น ให้ระดับของน้ำอยู่สูงกว่าตะกอน ประมาณ 1 เซนติเมตร จากนั้นคนสารละลายให้ตะกอนกระจายตัว แล้วตั้งทิ้งไว้อีก ประมาณ 30 นาที จะเกิดการตกตะกอนของสสารและโปรตีน โดยตะกอนจะแยกชั้นกันระหว่าง สสารและโปรตีน เนื่องจากความแตกต่างกันระหว่างความหนาแน่นของสสารและโปรตีน โดยที่ โมเลกุลของสสารมีความหนาแน่นมากกว่าโปรตีน ดังนั้นสสารจึงตกตะกอนลงมาได้เร็วกว่า สสารจึงอยู่ชั้นล่าง ส่วนโปรตีนมีความหนาแน่นต่ำกว่าจึงตกตะกอนลงมาช้า ตะกอน โปรตีนจึงอยู่ ชั้นบน

1.2.9 ค่อยๆ เทน้ำส่วนบนออก จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้ได้ระดับสูงกว่าตะกอน ประมาณ 1 เซนติเมตรอีกครั้ง แล้วคนให้ตะกอนกระจายตัว แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนประมาณ 30 นาที

1.2.10 ค่อยๆ เทน้ำส่วนบนทิ้งไป จากนั้นใช้น้ำค่อยๆ ชะล้างเอาโปรตีนสีน้ำตาลชั้น บนออกให้มากที่สุด หากยังมีตะกอนโปรตีนติดแน่นอยู่ ให้เติมน้ำและคนให้ตะกอนกระจายตัว แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอนใหม่ ประมาณ 30 นาทีอีกรอบ ทำซ้ำจนกระทั่งตะกอน โปรตีนสี น้ำตาลด้านบนถูกกำจัดออกไปจนหมดเหลือเพียงตะกอนสสารสีขาวเท่านั้น

1.2.11 นำตะกอนสสารที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนได้สสารที่แห้งสนิท แล้วนำสสารไปบดด้วยเครื่องปั่นแบบแห้งด้วยความเร็วต่ำเป็น ระยะๆ ครั้งละ 10 วินาที จำนวน 3 ครั้ง

1.2.12 นำสสารที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช แล้วเก็บในภาชนะแห้งสนิทและปิดผนึกอย่างมิดชิด เก็บตัวอย่างสสารไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่ที่แห้งจนกว่าจะนำมาใช้

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์องค์ประกอบของสสารและแป้งข้าวฟ่าง

การวิเคราะห์องค์ประกอบของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

ข1. การหาปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1.1 ตู้อบลมร้อน (hot air oven)

1.1.2 ภาชนะใส่ตัวอย่าง (moisture can) ทำด้วยอะลูมิเนียม

1.1.3 ภาชนะกันความชื้น (desiccator)

1.2 วิธีการวิเคราะห์

ทำแห้งภาชนะใส่ตัวอย่างพร้อมฝา ในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาใส่ในภาชนะกันความชื้นทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

ชั่งตัวอย่างแป้งในภาชนะใส่ตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2-3 กรัม นำไปใส่ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเปิดฝาภาชนะไว้ เมื่อครบเวลาแล้วนำออกจากตู้อบ ปิดภาชนะและนำมาใส่ในเดซิเคเตอร์ทันที ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง (ปกติ 45-60 นาที) แล้วจึงนำไปชั่ง คำนวณปริมาณความชื้นจากน้ำหนักที่หายไป โดยที่ A เป็นน้ำหนักที่หายไป (กรัม) และ B เป็นน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม) ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น (moisture)} = (A/B) \times 100$$

ข2. การหาปริมาณโปรตีน

ดัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (2000)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.1.1 เครื่องย่อยสลาย Buchi
- 2.1.2 หลอด Kjeldahl สำหรับย่อย
- 2.1.3 เครื่องกลั่นอัตโนมัติ Buchi

2.2 สารเคมี

- 2.2.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น
- 2.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 40
- 2.2.3 สารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4
- 2.2.4 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์มัล
- 2.2.5 คอปเปอร์ซัลเฟต
- 2.2.6 โพแทสเซียมซัลเฟต
- 2.2.7 อินดิเคเตอร์ผสมระหว่างเมทิลเรดและโบรโมครีซอลกรีน

2.3 วิธีการวิเคราะห์

2.3.1 ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนใส่ลงในหลอดย่อย ระวังอย่าให้ติดข้างหลอด

2.3.2 ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งประกอบด้วยโพแทสเซียมซัลเฟต 10 กรัม และคอปเปอร์ซัลเฟต 0.5 กรัม รวมทั้งเม็ดลูกแก้วกันเดือด (glass bead) 2 เม็ด และเติมกรดซัลฟิวริกประมาณ 20-25 มิลลิลิตร

2.3.3 นำหลอดย่อยต่อเข้ากับชุดเครื่องย่อย ทำการย่อยจนกระทั่งได้สารละลายสีเขียวใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่น 60-75 มิลลิลิตร (หรือเติมเป็น 3 เท่าของกรด)

2.3.4 นำหลอดย่อยต่อเข้ากับชุดเครื่องกลั่น แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 40 จนสารละลายในหลอดย่อยเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

2.3.5 รองรับสิ่งก่ด้นด้วยขวด (flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายกรดบอริกความเข้มข้นร้อยละ 4 จำนวน 25 มิลลิลิตร โดยก่ด้นประมาณ 5 นาที

2.3.6 นำไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งได้สารละลายสีเทา (จุดยุติ) บันทึกปริมาณกรดที่ใช้แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละของไนโตรเจน

หมายเหตุ ให้ทำแบลงก์ควบคู่ไปด้วย โดยไม่มีตัวอย่างในหลอดย่อย

2.4 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของปริมาณไนโตรเจน} = \frac{(S-B) \times N \times 1.401}{W}$$

$$\text{ร้อยละของโปรตีน} = \text{ร้อยละปริมาณไนโตรเจน} \times 5.95$$

- เมื่อ
- S = ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง
 - B = ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลงก์
 - N = ความเข้มข้นเป็นนอร์มัลของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน
 - W = น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม

ข3. การหาปริมาณไขมัน

ดัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (2000)

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (Soxtec System HT2; 1045 Extraction unit)

3.1.2 เครื่องทำความเย็น

3.1.3 extraction cup

3.1.4 thimble

3.1.5 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

3.1.6 ภาชนะกันความชื้น (desiccator)

3.2 สารเคมี

ปิโตรเลียมอีเทอร์ที่มีจุดเดือดในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส

3.3 วิธีการวิเคราะห์

3.3.1 อบ extraction cup และทิ้งให้เย็นในภาชนะกันความชื้น ชั่งน้ำหนักไว้ (W_1)

3.3.2 ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ลงบนกระดาษกรองและห่อให้มิดชิด บันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่แน่นอน (W_2) แล้วนำมาใส่ลงใน thimble

3.3.3 นำ thimble ใส่ใน extraction unit แล้วเติมปิโตรเลียมอีเทอร์ จำนวน 45 มิลลิลิตร ลงใน extraction cup

3.3.4 นำ extraction cup เข้าไปในเครื่องวิเคราะห์ไขมัน ทำการสกัดเป็นเวลา 20 นาที และทำการชะล้างเป็นเวลา 45 นาที นำ extraction cup ไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อระเหยตัวทำละลายออกไป ทิ้ง extraction cup ให้เย็นในภาชนะกันความชื้น และชั่งน้ำหนัก (W_3)

3.4 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละปริมาณไขมัน} = \frac{(W_3 - W_1) \times 100}{W_2}$$

เมื่อ	W_1	=	น้ำหนัก extraction cup หน่วยเป็นกรัม
	W_2	=	น้ำหนักตัวอย่างที่วิเคราะห์ หน่วยเป็นกรัม
	W_3	=	น้ำหนัก extraction cup และไขมันที่สกัดได้ หน่วยเป็นกรัม

4. การหาปริมาณเถ้า (AOAC, 2000)

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

4.1.1 เตา muffle furnace

4.1.2 เตาไฟฟ้าให้ความร้อนแบบแผ่นราบ

4.1.3 เป้า (crucible)

4.1.4 ภาชนะกันความชื้น (desiccator)

4.2 วิธีการวิเคราะห์

4.2.1 เผาเป้าในเตา muffle furnace ที่ให้เขียนในเทคนิคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก

4.2.2 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ใส่ลงในเป้า แล้วนำไปเผาด้วยไฟอ่อนๆ

จนหมดควัน

4.2.3 นำไปเผาในเตา muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนกว่าได้เถ้าเป็น

สีขาวหรือสีเทา

4.2.4 นำเป้าออกมาใส่ในภาชนะกันความชื้น ที่ไว้ให้เขียนจนถึงอุณหภูมิห้องแล้ว

นำไปชั่งน้ำหนัก

4.3 วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{(W_2 - W_0) \times 100}{(W_1 - W_0)}$$

เมื่อ	W_0	=	น้ำหนักของเบ้า หน่วยเป็นกรัม
	W_1	=	น้ำหนักของเบ้าและตัวอย่างก่อนเผา หน่วยเป็นกรัม
	W_2	=	น้ำหนักของเบ้าและตัวอย่างหลังจากเผาจนได้น้ำหนักคงที่ หน่วยเป็นกรัม

ข5. การหาปริมาณเส้นใยหยาบ (AOAC, 2000)

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

5.1.1 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (fibertec, Tecator)

5.1.2 เครื่องทำความเย็น

5.1.3 เบ้าบรรจุสาร (crucible)

5.1.4 ภาชนะกันความชื้น (desiccator)

5.1.5 เตา muffle furnace

5.2 สารเคมี

5.2.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.255 นอร์มัล

5.2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.313 นอร์มัล

5.2.3 ออกทานาล (n-octanal)

5.2.4 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ร้อยละ 95

5.3 วิธีการวิเคราะห์

5.3.1 เเผาเบ้าบรรจุสารที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในภาชนะกันความชื้น

5.3.2 ชั่งตัวอย่าง 1.0 กรัม ในเบ้าบรรจุสาร ชั่งน้ำหนักแน่นอน

5.3.3 นำเบ้าบรรจุสารวางลงในตำแหน่งบรรจุเบ้าของเครื่อง Fibertec Hot Extraction

Unit

5.3.4 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.255 นอร์มัล ที่ต้มเดือดปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ และหยดออกทานาล 2-3 หยด เพื่อป้องกันการเกิดฟอง จากนั้นให้ความร้อนเพื่อทำการสกัดนาน 30 นาที

5.3.5 เมื่อครบเวลาปล่อยสารละลายกรดซัลฟิวริกออกจากคอลัมน์ทั้งหมด เติมน้ำเดือด (น้ำกลั่น) เพื่อล้างกรดให้หมด

5.3.6 ปล่อยน้ำเดือดออกจากคอลัมน์ จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.313 นอร์มัล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ให้ความร้อนเพื่อทำการสกัดนาน 30 นาที

5.3.7 เมื่อครบเวลาปล่อยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกจากคอลัมน์ทั้งหมด จากนั้นเติมเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้หมด

5.3.8 นำเบ้าบรรจุตัวอย่างที่ผ่านการสกัดด้วยกรดและด่างออกจากเครื่อง Fibertec Hot Extraction แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในภาชนะกันความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักแน่นอน ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง จนน้ำหนักต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม

5.3.9 นำเบ้าบรรจุตัวอย่างที่อบและหาน้ำหนักแน่นอนแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็นในภาชนะกันความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักแน่นอน ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง จนน้ำหนักต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม

5.4 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละเส้นใยหยาบ} = \frac{(W_1 - W_2) \times 100}{W}$$

เมื่อ	W	=	น้ำหนักตัวอย่าง
	W ₁	=	น้ำหนักเบ้าบรรจุตัวอย่าง + กาก หลังอบ
	W ₂	=	น้ำหนักเบ้าบรรจุตัวอย่าง + เถ้า หลังเผา

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์สมบัติของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

การวิเคราะห์สมบัติของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

ค1. การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (apparent amylose) ด้วยวิธีการเกิดสีกับไอโอดีน (Juliano, 1971)

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1.1 ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

1.1.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectronic 22)

1.1.3 เครื่องชั่งละเอียด

1.1.4 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

1.2 สารเคมี

1.2.1 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ร้อยละ 95

1.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 นอร์มัล เตรียมโดยชั่ง NaOH หนัก 40 กรัม ละลายในน้ำกลั่นประมาณ 800 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร

1.2.3 กรดแอซติกกลacial (glacial acetic acid) ความเข้มข้น 1 นอร์มัล เตรียมโดยตวงกรดแอซติกกลacial ความเข้มข้นปริมาตร 60 มิลลิลิตร ใส่ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1 ลิตร

1.2.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (pure potato amylose) ยี่ห้อ sigma, USA

1.2.5 สารละลายไอโอดีน เตรียมโดยชั่งไอโอดีน (I_2) 0.2 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.0 กรัม ผสมสารทั้งสองให้เข้ากันแล้วละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ควรเก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา

1.3 วิธีการวิเคราะห์

1.3.1 ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1000 กรัม ใส่ในขวด (flask) ขนาด 50 มิลลิลิตรที่แห้งสนิท

1.3.2 เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ เพื่อเกลี่ยสตาร์ชให้กระจายออก ระวังอย่าให้แป้งขึ้นมาเกาะตามผนังขวด

1.3.3 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล จำนวน 9 มิลลิลิตร พร้อมทั้งล้างสตาร์ชที่เกาะอยู่ตามผนังขวด

1.3.4 นำสตาร์ชไปให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

1.3.5 ถ่ายสตาร์ชลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยใช้ น้ำล้าง 2-3 ครั้ง เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร และผสมให้เข้ากัน

1.3.6 ควบน้ำแข็งปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

1.3.7 เติมกรดแอสซิติกล้วนความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน จำนวน 2 มิลลิลิตร

1.3.8 เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

1.3.9 ทำแบลнк (blank) โดยนำขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรมาเติมกรดแอสซิติกล้วนความเข้มข้น 1 นอร์มัล 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

1.3.10 วัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร (nm) โดยปรับค่าของแบลнкเป็น 0

1.3.11 นำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าปริมาณแอมิโลสโดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน

1.4 การเขียนกราฟมาตรฐาน (standard curve)

1.4.1 ชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่งจำนวน 0.0400 กรัม ใส่ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 1.3.2-1.3.4 แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ใช้เป็นสารละลายมาตรฐาน

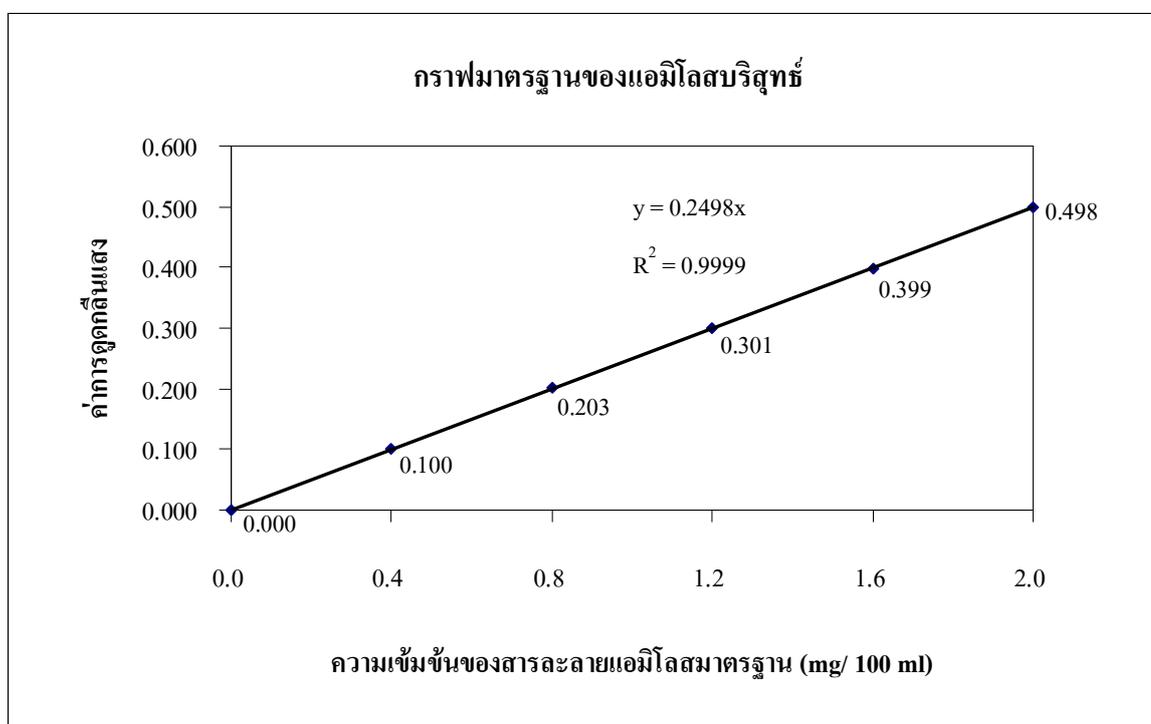
1.4.2 ปิเปตแบ่งสารละลายมาตรฐาน 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดกำหนดปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมกรดแอสซิติกล้วน ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาณ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้วที่มีสารละลายมาตรฐานตามลำดับ เติมสารละลายไอโอดีน 2.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยการเติมน้ำกลั่น เขย่าและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

1.4.3 วัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร (nm)

1.4.4 เขียนกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายเอมิโลสมาตรฐาน (แกน X) และค่าการดูดกลืนแสง (แกน Y)

1.5 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของปริมาณเอมิโลส} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่อ่านได้จากสารละลายเอมิโลสมาตรฐาน} \times 10}{5 \times \text{น้ำหนักสารแห้ง (กรัม)}}$$



ภาพผนวกที่ ค1 ปริมาณเอมิโลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน

**ค2. การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ด้วย ชุดตรวจวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสหลังตกตะกอน
แอมิโลเพกตินด้วย Con-A (Amylose /Amylopectin assay kit, Megazyme)**

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.1.1 หลอดหมุนเหวี่ยง ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2.1.2 หลอด eppendorf ขนาด 2 มิลลิลิตร
- 2.1.3 ขวดกำหนดปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร
- 2.1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด
- 2.1.5 อ่างน้ำเดือด
- 2.1.6 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส
- 2.1.7 เครื่องผสมสาร
- 2.1.8 เครื่องหมุนเหวี่ยง

2.2 สารเคมี

- 2.2.1 DMSO (dimethyl sulphoxide)
- 2.2.2 เอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95
- 2.2.3 Concentrated ConA Solvent เข้มข้น 600 มิลลิโมลาร์ พีเอช 6.4 เตรียมโดยชั่งแอนไฮดรัสโซเดียมแอซิเตท 49.2 กรัม โซเดียมคลอไรด์ 175.5 กรัม แคลเซียมคลอไรด์ 0.5 กรัม แมกนีเซียมคลอไรด์ 0.7 กรัม และแมงกานีสคลอไรด์ 0.7 กรัม เติมน้ำกลั่นปริมาตร 900 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเป็น 6.4 ด้วยกรดแอซิดิกกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น สามารถเก็บสารละลายไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 2 สัปดาห์

หมายเหตุ ไม่ควรปรับพีเอชต่ำกว่า 6.4 เพราะจะเกิดการตกตะกอน และไม่สามารถนำสารละลายไปใช้ต่อได้

- 2.2.4 Con A Solvent เตรียมโดยเปิดสารละลาย Concentrated ConA Solvent ที่เตรียมจากข้อ 2.2.3 มา 30 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น (ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งเมื่อใช้)

2.2.5 Con A Solution เตรียมโดยละลายผง Freeze dried Con A ปริมาณ 200 มิลลิกรัม ที่อยู่ในชุดตรวจวิเคราะห์ ด้วยสารละลาย ConA solvent ที่เตรียมจากข้อ 2.2.4 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แบ่งสารละลาย Con A Solution ใส่หลอด eppendorf ขนาด 2 มิลลิลิตร สามารถเก็บได้มากกว่า 2 ปี ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

2.2.6 โซเดียมแอซิเตทบัฟเฟอร์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ พีเอช 4.5 เตรียมโดยเปิดกรดแอซิดกลูทามิกปริมาตร 5.9 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 900 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเป็น 4.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ เติมโซเดียมเอไซด์ 0.2 กรัม จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

2.2.7 GOPOD Reagent เตรียมโดยเจือจางสารละลาย GOPOD Reagent Buffer ที่อยู่ในชุดตรวจวิเคราะห์ ด้วยน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปละลายผง GOPOD Reagent Enzyme ที่อยู่ในชุดตรวจวิเคราะห์ เก็บสารละลายในขวดโพลีโพรพิลีน (polypropylene) หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันแสงแดด เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 2-5 องศาเซลเซียส ได้นาน 3 เดือน หรือ เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสได้นานกว่า 12 เดือน

2.3 การเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ (starch pretreatment)

2.3.1 ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 0.0250 กรัม (25 มิลลิกรัม) แยกต่างกันไม่เกิน 0.0001 ในหลอดหมุนเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร

2.3.2 ค่อยๆ เติม DMSO 1 มิลลิลิตร และเขย่าเบาๆ จากนั้นนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดจนกระทั่งตัวอย่างกระจายตัวอย่างสมบูรณ์ (ประมาณ 1 นาที) ต้องแน่ใจว่าไม่เกิด lump

2.3.3 นำหลอดมาเขย่าอย่างรุนแรงโดยใช้ความเร็วสูง จากนั้นนำไปให้ความร้อนในน้ำเดือดเป็นเวลานาน 15 นาที เขย่าด้วยความเร็วสูงเป็นครั้งคราวระหว่างให้ความร้อน

2.3.4 ตั้งหลอดทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนานประมาณ 5 นาที เติม เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร พร้อมๆ กับเขย่าอย่างต่อเนื่อง จากนั้นเติมอีก 4 มิลลิลิตร กลับหลอดผสมไปมาแล้วตั้งหลอดทิ้งไว้ 15 นาที

2.3.5 นำไปหลอดไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,000 g นาน 5 นาที เทส่วนใสทิ้ง คั่วหลอดบนกระดาษทิชชู นาน 10 นาที ต้องแน่ใจว่ากำจัดแอลกอฮอล์ออกจนหมด

2.3.6 จากนั้นเติม DMSO ปริมาตร 2 มิลลิลิตร พร้อมๆ กับเขย่าเบาๆ นำไปให้ความร้อนในน้ำเดือดนาน 15 นาที และเขย่าอย่างต่อเนื่อง ต้องแน่ใจว่าไม่เกิด lump

2.3.7 เติม Con A solvent ปริมาตร 4 มิลลิลิตร พร้อมเขย่า จากนั้นถ่ายสารละลายใส่ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร โดยใช้ Con A solvent ในการถ่ายสารและปรับปริมาตรตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนนี้ เรียกว่า Solution I

หมายเหตุ ควรนำ Solution I ไปวิเคราะห์ปริมาณ Amylose และ Total starch ภายใน 60 นาที ไม่ควรเก็บไว้นานเกิน 60 นาที

2.4 การตกตะกอนแอมิโลเพกตินด้วย Con A และนำมาวัดปริมาณแอมิโลส

2.4.1 ปิเปิด Solution I มา 1 มิลลิลิตร ใส่หลอด eppendorf ขนาด 2 มิลลิลิตร เติม Con A solution ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ปิดฝา eppendorf ผสมให้เข้ากันโดยกลับ eppendorf ขึ้นลงพยายามอย่าให้เกิดฟอง และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1 ชั่วโมง

2.4.2 จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 14,000 g นาน 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

2.4.3 ปิเปิดส่วนใสมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดและเติมโซเดียมแอสซิเตทบัฟเฟอร์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ซึ่งมีพีเอช เท่ากับ 4.5 นำไปให้ความร้อนในน้ำเดือด นาน 5 นาที

2.4.4 จากนั้นนำหลอดมาวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที จึงเติม amyloglucosidase/amylase mixture ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร และบ่มต่อที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,000 g เป็นเวลานาน 5 นาที

2.4.5 ปิเปิดส่วนใสมา 1 มิลลิลิตร ใส่หลอดและเติม GOPOD reagent ปริมาตร 4 มิลลิลิตร แล้วนำไปบ่มที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที สำหรับ reagent blank จะใช้โซเดียมแอสซิเตทบัฟเฟอร์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติม GOPOD reagent ปริมาตร 4 มิลลิลิตร แล้วนำไปบ่มที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที

2.4.6 นำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

2.5 การวัดค่า Total starch

2.5.1 ปิเปต Solution I มา 0.5 มิลลิลิตร ใส่หลอด และเติมโซเดียมแอสซิเตทบัฟเฟอร์ เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ซึ่งมีพีเอช เท่ากับ 4.5 นำมาวางในอ่างน้ำควบคุม อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที

2.5.2 เติม amyloglucosidase/amylase mixture ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร และบ่มต่อที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที

2.5.3 ถ่ายส่วนใสปริมาตร 1 มิลลิลิตรใส่หลอด และเติม GOPOD reagent ปริมาตร 4 มิลลิลิตร และนำไปบ่มที่อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที สำหรับ reagent blank จะใช้โซเดียมแอสซิเตทบัฟเฟอร์ เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติม GOPOD reagent ปริมาตร 4 มิลลิลิตร และนำไปบ่มที่อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที

2.5.4 นำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

2.6 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละแอมิโลส} = \frac{A \times 6.15 \times 100}{B \times 9.2 \times 1}$$

โดยที่

A = ค่าการดูดกลืนแสงของส่วนใสหลังจากการตกตะกอนแอมิโลเพกตินด้วย Con A

B = ค่าการดูดกลืนแสงของส่วนที่เป็น Total starch

ค3. การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (Walker, 1976)

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (LEO 438 VP)

3.1.2 แท่ง aluminium stub ที่ติดกาวสองหน้าชนิดบาง

3.1.3 เครื่องเคลือบทอง (ion-coater IB-2)

3.2 วิธีการวิเคราะห์

3.2.1 นำตัวอย่างปริมาณเล็กน้อย มากระจายตัวบนแท่งกาวสองหน้าที่ติดอยู่บนแท่ง aluminium stub

3.2.2 นำแท่ง aluminium stub ที่ติดแป้งตัวอย่างแล้ว เข้าเครื่องเคลือบทอง (coating gold) ที่ผิวของแป้งตัวอย่าง เพื่อช่วยในการนำประจุอิเล็กตรอน

3.2.3 ใส่แท่ง aluminium stub ที่ผ่านการเคลือบทองเรียบร้อยแล้ว ในช่องใส่แท่ง aluminium stub ภายในตัวกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

3.2.4 ตรวจสอบลักษณะรูปร่างของอนุภาคแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยายที่ 1,000 และ 2,500 เท่า บันทึกภาพถ่าย

ค4. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyzer, RVA3D, Newport Scientific Instrument & Engineering, Australia)

4.2 วิธีการวิเคราะห์

4.2.1 ตัวอย่างสตาโรซ์และแป้งข้าวฟ่างที่ใช้วิเคราะห์ต้องผ่านการบดจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าหรือเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร แล้วจึงนำไปหาความชื้นตามวิธี AACC (2000) ก่อนการวิเคราะห์

4.2.2 ชั่งตัวอย่างจำนวน 3 กรัม ใส่ลงในอุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก และตวงน้ำปริมาตร 25.0 มิลลิเมตร (± 0.1 มิลลิเมตร) ใส่ในถ้วยทรงกระบอก (คำนวณที่ความชื้น 12 เปอร์เซ็นต์) แต่ถ้าตัวอย่างมีความชื้นไม่เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณปริมาณน้ำและตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามสูตร

$$\text{สำหรับปริมาณสตาโรซ์หรือแป้ง} \quad S = \frac{88 \times 30}{100 - M}$$

$$\text{สำหรับปริมาณน้ำ} \quad W = 25 + (3.0 - S)$$

โดย S = น้ำหนักตัวอย่างที่ปรับค่าแล้ว หน่วยเป็นกรัม

W = น้ำหนักน้ำที่ปรับค่าแล้ว หน่วยเป็นกรัม

M = ปริมาณความชื้นที่แท้จริงของตัวอย่าง (เปอร์เซ็นต์)

4.2.3 ใส่แป้งลงบนผิวหน้าของน้ำในถ้วยทรงกระบอก ใช้ใบพายเขย่าตัวอย่างในถ้วยทรงกระบอกขึ้นลง 10 ครั้ง แต่ถ้าแป้งยังคงอยู่บนผิวหน้าหรือติดบนใบพาย ให้เขย่าตัวอย่างซ้ำอีกครั้ง

4.2.4 ใส่ใบพายในถ้วยทรงกระบอกและสวมใบพายเข้ากับที่ยึดโดยให้ใบพายอยู่กึ่งกลางถ้วย แล้วเริ่มต้นการวิเคราะห์โดยกดมอเตอร์ของเครื่องมือลง และมีสิ่งที่ต้องระวัง คือ อย่าผสมตัวอย่างสตาโรซ์หรือแป้งกับน้ำนานกว่า 1 นาที ก่อนการวิเคราะห์ ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับสตาโรซ์และแป้งข้าวฟ่าง มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาดังนี้

ตารางผนวกที่ ค1 สภาวะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเตรียมเจลสตาร์ช และแป้งข้าวฟ่างด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที:วินาที)
คงที่ที่ 50.0	1:00
เพิ่มจาก 50.0 เป็น 95.0	7:30
คงที่ที่ 95.0	5:00
ลดจาก 95.0 เป็น 50.0	7:30
คงที่ที่ 50.0	4:00

สำหรับความเร็วรอบเริ่มต้นที่ใช้ คือ 960 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 วินาที แล้วจึงใช้ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาทีคงที่ตลอดการทดสอบ

4.2.5 บันทึกอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุดขณะร้อน (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) เป็นความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและต่ำสุด และค่าเซตแบค (setback) เป็นความแตกต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด

ภาคผนวก ง

การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง

ง1. การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (Walker, 1976)

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (LEO 438 VP)

1.1.2 แท่ง aluminium stub

1.1.3 เครื่องเคลือบทอง (ion-coater IB-2)

1.2 วิธีการวิเคราะห์

1.2.1 นำตัวอย่างเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการทำแห้งแล้วมาหักเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นนำมาวางบนแท่ง aluminium stub โดยยึดติดด้วยแถบกาวสองหน้า

1.2.2 นำแท่ง aluminium stub ที่ติดเจลดตัวอย่างแล้ว เข้าเครื่องเคลือบทอง (coating gold) เพื่อเคลือบทองที่ผิวเจลดตัวอย่าง เพื่อช่วยในการนำประจุอิเล็กตรอน

1.2.3 ใส่แท่ง aluminium stub ที่ผ่านการเคลือบทองเรียบร้อยแล้ว ในช่องใส่แท่ง aluminium stub ภายในตัวกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

1.2.4 ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของเจลสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยายที่ 1,000 และ 2,500 เท่า บันทึกภาพถ่าย

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณองค์ประกอบทางเคมี
และสมบัติทางความเหนียวของแป้งข้าวฟ่าง

**ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณองค์ประกอบทางเคมี
และสมบัติทางความเหนียวของแป้งข้าวฟ่าง**

จ1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางความเหนียวของแป้งข้าวฟ่าง

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางความเหนียวของแป้งข้าวฟ่างแสดงดังนี้

ตารางผนวกที่ จ1 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางความเหนียวของแป้งข้าวฟ่าง

	อุณหภูมิ เริ่มเกิด ความเหนียว	ความเหนียว สูงสุด	ความเหนียว ต่ำสุด	ความเหนียว ลดลง	ความเหนียว สุดท้าย	ค่าการคืน ตัว
ความชื้น	-0.786*	0.995**	0.193	0.662	-0.070	-0.937**
โปรตีน	0.435	-0.741*	0.477	-0.981**	0.682	0.546
เถ้า	0.938**	-0.686	-0.497	-0.170	-0.347	0.652
เส้นใยหยาบ	0.378	-0.182	-0.985**	0.626	-0.966**	0.357
ไขมัน	0.881**	-0.588	-0.798*	0.146	-0.666	0.679
คาร์โบไฮเดรต	-0.728*	0.915**	-0.124	0.846**	-0.363	-0.765*

หมายเหตุ * หมายถึง มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

** หมายถึง มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวหทัยชนก ชนะปะปาโมกข์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	29 พฤษภาคม 2525
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ชีวเคมีและชีวเคมีเทคโนโลยี) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (พ.ศ. 2547)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-