



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตรการอาหาร

วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง เคมี่เชิงฟิสิกส์ของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างที่ผ่านการดัดแปร โดยวิธีพรีเจลลาทีในเซชันที่
แตกต่างกัน

Physicochemical Properties of Modified Sorghum Flour and Starch by Different
Pregelatinization Methods

นามผู้วิจัย นางสาวหทัยชนก บัววาริ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มาศอุบล ทองงาม, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้ำฝน ลำดับวงศ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะบุญย์ สัจจอนันตกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

เคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทีนในเซชันที่แตกต่างกัน

Physicochemical Properties of Modified Sorghum Flour and Starch by Different
Pregelatinization Methods

โดย

นางสาวหทัยชนก บัววาริ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หทัยชนก บัววาริ 2553: เคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทิ
ในเซชันที่แตกต่างกัน ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์
การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์มาศอุบล ทองงาม, Ph.D. 111 หน้า

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของกระบวนการตัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทิในเซชัน โดยการทำแห้งแบบ
ลูกกลิ้งและเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อสมบัติของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง นอกจากนี้ยังศึกษาผลของซูโครส
(sucrose) และ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ต่อสมบัติด้านความเหนียวของแป้งข้าวฟ่าง (NSF) และแป้งข้าวฟ่างตัด-
แปร ในงานวิจัยนี้มีปัจจัยที่ศึกษาคือ ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (0.15 0.25 และ 0.35 มิลลิเมตร) และอุณหภูมิ
ผิวน้ำลูกกลิ้ง (120 และ 130 องศาเซลเซียส) สำหรับเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียม
สารละลาย (65 75 และ 85 องศาเซลเซียส) ก่อนการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย การตัดแปรแป้งข้าว
ฟ่างโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (DSF) ให้ร้อยละของผลได้สูงกว่าการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่น
ฝอย (SSF) ภายหลังจากการตัดแปรทั้ง 2 วิธี แป้งตัดแปรจะมีปริมาณ resistant starch เพิ่มขึ้น เมื่อตรวจสอบลักษณะ
ทางสัณฐานวิทยาพบว่า เม็ดสตาร์ชของ NSF มีลักษณะกลมหลายเหลี่ยม ในขณะที่เม็ดสตาร์ชของ SSF จะมี
ลักษณะบิดเบี้ยวแต่ยังมีลักษณะเป็นเกรนูล แต่สำหรับตัวอย่าง DSF ไม่พบลักษณะเม็ดสตาร์ชแต่ปรากฏ
ลักษณะเป็นแผ่น (flake) เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติในการดูดซับน้ำพบว่ามีความเพิ่มขึ้นหลังการตัดแปรทั้งสองวิธี
นอกจากนี้พบว่าแป้ง DSF มีค่าการละลายน้ำเย็นเพิ่มขึ้นทุกสภาวะ ในขณะที่แป้ง SSF จะมีค่าการละลายน้ำเย็น
เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้เตรียมสารละลายน้ำแป้งก่อนการทำแห้งเพิ่มขึ้น จาก X-ray diffractogram พบว่า NSF
มีโครงสร้างผลึกแบบ A-type สำหรับ SSF จะปรากฏพิคคล้าย NSF แต่มีความเข้มลดลง แสดงถึงค่าความเป็น
ผลึกที่ลดลง ในขณะที่ตัวอย่าง DSF ไม่ปรากฏลักษณะ โครงสร้างผลึก เมื่อตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของ
NSF พบว่า มีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาทิในเซชัน 67.93-75.98 องศาเซลเซียส มีค่าพลังงานในการเกิดเจลาทิ-
ในเซชัน 9.63 จูลต่อกรัม แต่เมื่อตัดแปรแป้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SSF) พบว่า ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจ-
ลาทิในเซชันเพิ่มสูงกว่า NSF แต่มีค่าพลังงานในการเกิดเจลาทิในเซชันต่ำกว่า ($p \leq 0.05$) เมื่อวิเคราะห์สมบัติ
ด้านความเหนียวพบว่า DSF สามารถให้ความเหนียวได้ทันทีเมื่อเติมน้ำ ในขณะที่สมบัติด้านความเหนียวของ SSF มี
ลักษณะคล้ายกับ NSF แต่มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดความเหนียวสูงกว่า เมื่อเติมซูโครสในระบบพบว่าทำให้
ความเหนียวสูงสุด เบรกดาวน์ และความเหนียวสุดท้ายของ NSF มีค่าสูงขึ้น สำหรับ DSF พบว่า การเติมซูโครสทำ
ให้ความเหนียวรวมของระบบเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความเหนียวสูงสุดของ SSF มีค่าสูงขึ้น เมื่อมีการเติมซูโครสที่
ระดับ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมโซเดียมคลอไรด์ในระบบพบว่า มีผลให้
อุณหภูมิเริ่มเกิดความเหนียวของ NSF และ SSF มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าเบรกดาวน์และเซตแบคของแป้งทั้งสอง
ชนิดมีค่าลดลง แต่เมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงในตัวอย่าง DSF พบว่า ความเหนียวรวมของระบบมีค่าสูงขึ้น

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Hathaichanok Bouvaree 2010: Physicochemical Properties of Modified Sorghum Flour and Starch by Different Pregelatinization Methods. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Masubon Thongngam, Ph.D. 111 pages.

This research was aimed to investigate the effect of pregelatinization methods (drum-dried and spray dried methods) on sorghum flour and starch properties. In addition, the effect of sucrose and sodium chloride on the pasting properties of native and modified sorghum flour was investigated. The conditions of both Pregelatinization methods were studied. For drum dried method, the gap distance (0.15, 0.25 and 0.35 mm) and drum surface temperature (120 and 130 °C) were carried out. For spray dried method, the temperatures (65, 75 and 85 °C), used to heat flour suspension prior to spray dry, were investigated. The drum dried sorghum flour (DSF) had higher yield than spray dried sorghum flour (SSF) (based on sorghum flour). In addition, the resistant starch content of both pregelatinized modified flour were increased. When the morphology of the starch granules was observed, the result shows that the starch granule of native sorghum flour (NSF) appeared polygonal; while those of SSF was slightly increased in size with crease but still intact. However after drum dried modification, the starch granules showed flake-like and fragment shape. In comparison to native flour, the water retentions of both DSF and SSF were increased. Moreover, the results show that the cold water solubility of DSF was increased; while that of SSF was increased with increasing preheating temperature. When using the X-ray diffraction, SSF showed A-type crystalline structure similar to NSF but had lower intensity due to the lower degree of crystallinity. However DSF did not show peak intensity owing to the loss of crystallinity after modification. Furthermore, the thermal property of flour was determined and the results show that the gelatinization temperature and enthalpy of NSF were 67.93-75.98 °C and 9.63 J/g respectively. However after spray dried modification, the gelatinization temperature of flour was higher but the enthalpy of gelatinization was lower than that of native. When the pasting property was carried out, the result shows that DSF gave an instant increase of viscosity. On the other hand the pasting profile of SSF was similar to that of native but its pasting temperature was higher compared to the native. Upon the addition of sucrose, it caused an increase in the pasting viscosity of all samples; whereas, the pasting temperature remained unchanged. Moreover in the presence of sodium chloride, the results show that the pasting temperature of NSF and SSF increased but the breakdown and setback were decreased. Unlike DSF, the addition of sodium chloride caused the increase of the pasting viscosity.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาศอุบล ทองงาม อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้ความเอาใจใส่ ช่วยเหลือให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวทางในการ
แก้ปัญหา ตลอดจนการตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จน
สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่
กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ธำรงค์ศิลป์ โพธิ์สูง ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ ที่
ให้ความอนุเคราะห์เมล็ดข้าวฟ่างที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชาความรู้ ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดการศึกษา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร เจ้าหน้าที่
ประจำคณะอุตสาหกรรมเกษตร ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือในการวิจัย
เจ้าหน้าที่ห้องสมุดคณะอุตสาหกรรมเกษตร ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สำหรับความ
ช่วยเหลือในทุกๆ ด้านตลอดระยะเวลาในการศึกษาระดับปริญญาโท

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนและส่งเสริมด้านการศึกษา
ของข้าพเจ้าด้วยดีมาตลอด รวมทั้งขอขอบคุณผู้มีพระคุณที่มีได้เอื้อนามไว้ ณ ที่นี้ทุกท่าน สำหรับ
ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจอย่างดียิ่งตลอดมา

หทัยชนก บัววารี
กุมภาพันธ์ 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	21
อุปกรณ์	21
วิธีการ	26
ผลและวิจารณ์	32
สรุปและข้อเสนอแนะ	79
สรุป	79
ข้อเสนอแนะ	81
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	82
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์	91
ภาคผนวก ข การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี	94
ภาคผนวก ค สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน	108
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	111

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดข้าวฟ่าง	4
2	คุณสมบัติของสตาร์ชข้าวฟ่าง	5
3	ร้อยละของผลได้ (%yield) ของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างตัดแปรที่เตรียมโดยวิธีพรีเจลาทีไนเซชัน	33
4	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง	35
5	ปริมาณ Resistant starch ของ แป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง	36
6	คุณสมบัติด้านสีของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง	41
7	คุณสมบัติการละลายน้ำเย็นและการดูดซับน้ำของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง	43
8	ร้อยละความเป็นผลึกของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปร	46
9	ช่วงอุณหภูมิเจลาทีไนเซชันและเอนทัลปีของการเกิดเจลาทีไนเซชันของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปร	48
10	ช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปรเมื่อเก็บรักษาไว้ 1 วัน	50
11	ช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปรเมื่อเก็บรักษาไว้ 14 วัน	51
12	สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชัน DSF1215, DSF1225 และ DSF1235 เมื่อเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน	63
13	สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชัน SSF65, SSF75 และ SSF85 เมื่อเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน	66
14	สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชัน DSF1215, DSG1225 และ DSF1235 เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน	73
15	สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชัน SSF65, SSF75 และ SSF85 เมื่อมีเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1	สถานะที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลา



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างของแอมิโลส	8
2	โครงสร้างของแอมิโลเพกติน	9
3	ลักษณะโครงสร้างของแอมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C	10
4	ลักษณะของ X-ray diffraction pattern ของการจัดเรียงตัวของผลึกแบบ A-type และ B-type	11
5	การเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชเกรนูลและการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมีการให้ความร้อนในระบบที่มีน้ำเพียงพอ โดยทำการวัดด้วย Brabender Viscoamylograph	12
6	โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส	13
7	ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (double drum dryer)	19
8	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งข้าวฟ่าง NSF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กำลังขยาย 500 และ (ข) 1,000 เท่า	38
9	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ DSF และ DSS ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) DSF กำลังขยาย 100 เท่า, (ข) DSF กำลังขยาย 500 เท่า, (ค) DSS กำลังขยาย 100 เท่า และ (ง) DSS กำลังขยาย 500 เท่า	39
10	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้ง SSF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า (ก) SSF65, (ข) SSF75, (ค) SSF85 และ (ง) SSS	40
11	ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวฟ่าง (NSF) แป้งข้าวฟ่างตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SSF65 และ SSF85) และแบบเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (DSF)	45
12	สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง (NSF) และสตาร์ชข้าวฟ่าง (NSS)	52
13	สมบัติด้านความหนืดของแป้งและแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชันตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	สมบัติด้านความเหนียวของแป้งและสตรัซข้าวฟ่างพรีเจลลาทีโนเซชันตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง	54
15	สมบัติด้านความเหนียวของแป้งและแป้งข้าวฟ่างพรีเจลลาทีโนเซชันตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย	56
16	สมบัติด้านความเหนียวของแป้งและสตรัซข้าวฟ่างพรีเจลลาทีโนเซชันที่ตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย	57
17	สมบัติด้านความเหนียวของแป้งข้าวฟ่าง (NSF) เมื่อเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน	58
18	ลักษณะของโครงสร้างเจลแป้งข้าวฟ่าง (NSF) ในระบบที่มีซูโครส 0 เปอร์เซ็นต์ และระบบ ที่มีซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้กล้องคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง ก และ ข คือ ตัวอย่าง NSF; ค และ ง คือ ตัวอย่าง NSF ที่มีการเติมซูโครส 20%	60
19	สมบัติด้านความเหนียวของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลลาทีโนเซชัน ตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง อุณหภูมิผิวน้ำลูกกลิ้ง 120 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.35 มิลลิเมตร (DSF1235) เมื่อเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน	61
20	ลักษณะของโครงสร้างเจลแป้งข้าวฟ่างตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เจล DSF1215 ไม่มีการเติมซูโครส (ก), เจล DSF1215 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ข), เจล DSF1225 ไม่มีการเติมซูโครส (ค), เจล DSF1225 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ง), เจล DSF1235 ไม่มีการเติมซูโครส (จ), เจล DSF1235 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ฉ) โดยใช้กล้องคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง	64
21	สมบัติด้านความเหนียวของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลลาทีโนเซชัน ตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีการความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 5 นาทีก่อนการทำแห้ง (SSF65) เมื่อเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ลักษณะของโครงสร้างเจลเป็งข้าวฟ่างตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย เจล SSF65 ไม่เติมซูโครส (ก), เจล SSF65 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ข), เจล SSF75 ไม่เติมซูโครส (ค), เจล SSF75 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ง), เจล SSF85 ไม่เติมซูโครส (จ), เจล SSF85 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ฉ) โดยใช้กล้องคอนโฟคอล เลเซอร์สแกนนิ่ง	67
23	สมบัติด้านความหนืดของเป็งข้าวฟ่าง (NSF) เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน	69
24	ลักษณะของโครงสร้างเจลเป็งข้าวฟ่าง (NSF) ในระบบที่มีโซเดียมคลอไรด์ 0 เปอร์เซ็นต์ และระบบที่มีโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ ก และ ข คือ ตัวอย่าง NSF; ค และ ง คือ ตัวอย่าง NSF ที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้คอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง	71
25	สมบัติด้านความหนืดของเป็งข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชัน ตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 120 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.35 มิลลิเมตร (DSF1235) เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน	72
26	ลักษณะของโครงสร้างเจลเป็งข้าวฟ่างตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เจล DSF1215 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (ก), เจล DSF1215 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ข), เจล DSF1225 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (ค), เจล DSF1225 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ง), เจล DSF1235 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (จ) เจล DSF1235 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ฉ)	74
27	สมบัติด้านความหนืดของเป็งข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชัน ตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย มีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำเป็งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส 5 นาทีก่อนการทำแห้ง (SSF65)เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	ลักษณะของโครงสร้างเจดเป็งข้าวฟ่างตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SSF) เจด SSF65 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (ก), เจด SSF65 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ข), เจด SSF75 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (ค), เจด SSF75 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ง), เจด SSF85 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (จ), เจด SSF85 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ฉ)	78
ภาพผนวกที่		
ก1	สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อเก็บรักษาไว้ 1 วัน SSF65 (ก), SSF75 (ข), SSF85 (ค)	109
ก2	สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อเก็บรักษาไว้ 14 วัน SSF65 (ก), SSF75 (ข), SSF85 (ค)	110

เคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทีนเซชัน ที่แตกต่างกัน

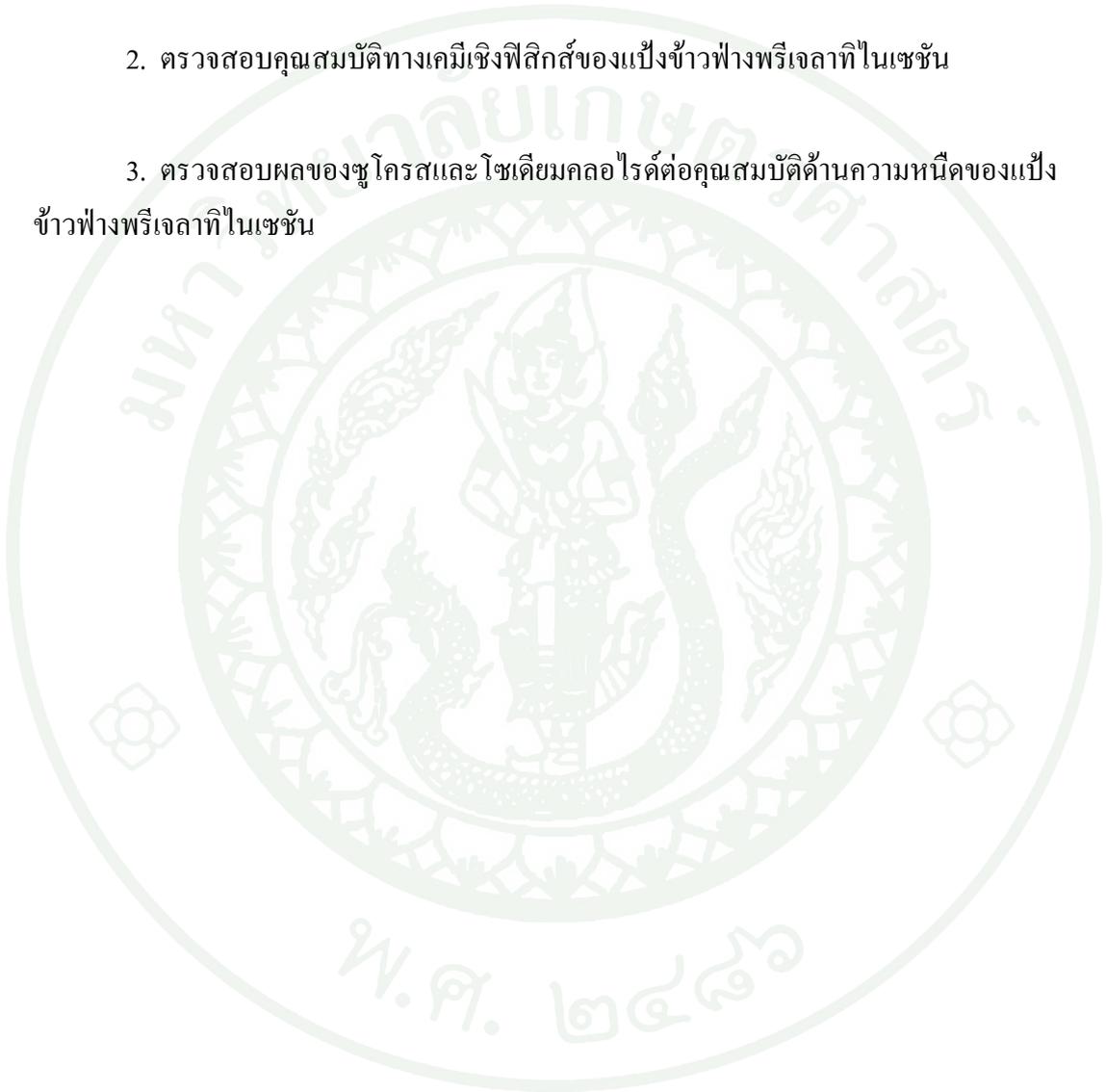
Physicochemical Properties of Modified Sorghum Flour and Starch by Different Pregelatinization Methods

คำนำ

ข้าวฟ่างจัดเป็นธัญพืชที่มีความสำคัญเป็นอันดับห้าของโลก รองจาก ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี และข้าวบาร์เลย์ (FAO, 1995) ข้าวฟ่างสามารถเพาะปลูกได้ง่าย และทนต่อสภาวะแห้งแล้งได้เป็นอย่างดี เหมาะสมกับภูมิอากาศของประเทศไทยที่อยู่ในเขตร้อน สำหรับประเทศไทยมีการเพาะปลูกข้าวฟ่างเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญ การใช้ประโยชน์จากข้าวฟ่างในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ สำหรับการนำแป้งข้าวฟ่างมาใช้ประโยชน์ทางด้านอาหารยังไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าที่ควรในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยมีพืชหลายชนิดเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญของแป้ง เช่น ข้าว มันสำปะหลัง มันฝรั่ง ข้าวโพด และพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น อย่างไรก็ตามในประเทศไทยได้มีการศึกษาคุณสมบัติและแนวทางการใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวฟ่างในผลิตภัณฑ์อาหารมากขึ้น จากการศึกษาทดลองนำข้าวฟ่างพันธุ์ต่างๆมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดปรากฏว่าได้ผลดี ผลิตภัณฑ์อาหารที่พัฒนาขึ้นมา มีคุณภาพและคุณค่าทางอาหารใกล้เคียง หรือดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้วัตถุดิบเดิมบางชนิด และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (ศิวาพร, 2533) แต่อย่างไรก็ตามแป้งข้าวฟ่างมีคุณสมบัติเฉพาะที่ยังเป็นข้อจำกัดในการใช้ หากต้องการเพิ่มศักยภาพในการใช้ควรมีการนำแป้งข้าวฟ่างมาผ่านการดัดแปรเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติจะทำให้สามารถนำแป้งข้าวฟ่างมาใช้ได้กว้างขวางมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้้นำแป้งข้าวฟ่างมาดัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทีนเซชันซึ่งเป็นการดัดแปรคุณสมบัติของแป้งด้วยวิธีทางกายภาพโดยการใช้ความร้อน ทำการดัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย การดัดแปรด้วยวิธีทางกายภาพมีข้อดีคือแป้งดัดแปรที่ได้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม แป้งที่ผ่านการดัดแปรจะทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำและการละลายดีขึ้น แป้งที่ได้สามารถให้ความหนืดได้ทันทีโดยไม่ต้องอาศัยความร้อน โดยแป้งที่ผ่านการดัดแปรโดยใช้วิธีที่ต่างกันทำให้แป้งดัดแปรมีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไป ทำให้สามารถนำแป้งที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีเหล่านี้มาใช้ได้ในอุตสาหกรรมอาหารได้หลากหลาย

วัตถุประสงค์

1. เปรียบเทียบกระบวนการตัดแปรรูปและสภาวะที่ใช้ในกระบวนการตัดแปรรูปแป้งข้าวฟ่าง โดยวิธีพรีเจลาทีไนเซชัน 2 วิธี
2. ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชัน
3. ตรวจสอบผลของซูโครสและไซโตียมกลอไรด์ต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชัน



การตรวจเอกสาร

1. ข้าวฟ่าง

ข้าวฟ่างเป็นพืชในวงศ์ Gramineae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Sorghum bicolor* L. Moench ข้าวฟ่างบางชนิดเพาะปลูกเพื่อเป็นอาหารทั้งของมนุษย์และสัตว์ มีแหล่งเพาะปลูกอยู่ในเขตอบอุ่นทั่วโลก และจัดว่าเป็นพืชท้องถิ่นในภูมิภาคเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนในทุกทวีปยกเว้นออสเตรเลีย ข้าวฟ่างเป็นธัญพืชที่สำคัญในทวีปแอฟริกา เอเชีย และลาตินอเมริกา กว่า 35 เปอร์เซ็นต์ของข้าวฟ่างใช้สำหรับบริโภค โดยส่วนใหญ่ใช้สำหรับผลิตอาหารสัตว์ ผลิตแอลกอฮอล์ และใช้สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม (FAO, 1995; Awika and Rooney, 2004) ในประเทศไทยเริ่มมีการเพาะปลูกข้าวฟ่างกันอย่างแพร่หลายเมื่อประมาณ 20 ปีมาแล้ว ข้าวฟ่างที่ถูกนำเข้ามาทดลองปลูกในประเทศไทยเป็นครั้งแรก เป็นข้าวฟ่างพวกเฮกการีต้นเดี่ยว จากสหรัฐอเมริกา โดยนำเข้ามาปลูกที่สถานีบำรุงพันธุ์สัตว์ทบวง จังหวัดสระบุรี มีจุดประสงค์สำคัญเพื่อใช้ต้นเลี้ยงสัตว์ แต่เมื่อปลูกแล้วปรากฏว่าให้ผลผลิตเมล็ดดี และเมื่อมีตลาดต่างประเทศให้ความสนใจซื้อเมล็ดข้าวฟ่างจากประเทศไทย จากวัตถุประสงค์ของการนำข้าวฟ่างเข้ามาปลูกเพื่อใช้เลี้ยงสัตว์ จึงเปลี่ยนไปเป็นปลูกเพื่อเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญ (ธีรารัตน์, 2530)

2. การใช้ประโยชน์จากข้าวฟ่าง

มีการนำข้าวฟ่างมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารมีมานานกว่า 2000 ปี โดยประเทศที่มีการบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากข้าวฟ่าง ได้แก่ ประเทศในแถบทวีปแอฟริกา อินเดีย จีน และบางประเทศในยุโรป โดยในอินเดีย นำแป้งข้าวฟ่างที่บดทั้งเมล็ด บั่นและกดเป็นแผ่นกลมบางแล้วนำไปปิ้งหรือทอดหรืออบ และชาวจีนนิยมนำแป้งข้าวฟ่างไปทำขนมปัง นอกจากนี้ข้าวฟ่างมักนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเข้า และอาหารสำเร็จรูป หรืออาจนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบชนิดต่างๆ เช่น ขนมปัง เค้ก คุกกี้ และมัฟฟิน เป็นต้น สำหรับแป้งจากข้าวฟ่างข้าวเหนียว มักใช้เป็นสารทำให้ข้นหนืด (thickening agent) เช่น ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารบรรจุกระป๋อง ซึ่งแป้งเปียกจากข้าวฟ่างชนิดนี้มีความคงตัวในอาหารกระป๋องมากกว่าแป้งธรรมดาทั่วไป หรืออาจใช้เป็นสารยึดในไส้กรอก (sausage binder) โดยเป็นตัวเชื่อมส่วนประกอบต่างๆ ของไส้กรอกเข้าด้วยกัน นอกจากนี้สามารถนำข้าวฟ่างมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมกระดาษ และการ

ผลิตแอลกอฮอล์ เช่น ผลิตกรดซิตริกและกรดแลคติก หรือทำมอลต์ข้าวฟ่างเพื่อใช้ในการผลิตเบียร์ เป็นต้น (ณัฐกฤตา, 2541)

3. ส่วนประกอบและองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวฟ่าง

เมล็ดข้าวฟ่างประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญคือ เปลือกหุ้มเมล็ด (seed coat or testa or pericarp) จมูกข้าว (germ or embryo) และเนื้อเยื่อสะสมอาหาร (endosperm or storage tissue) ซึ่งจะมีส่วนที่เป็น glassy endosperm และส่วนที่เป็นแหล่งของแป้ง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดข้าวฟ่าง

องค์ประกอบ	กรัม/100 กรัม
คาร์โบไฮเดรต	65-80
สตาร์ช	60-75
แอมิโลส	12-22
แอมิโลเพกติน	45-55
โปรตีน	7-15
แอลฟาแคพรีน	4-8
เบต้าแคพรีน	0.2-0.5
แกมมาแคพรีน	0.7-1.6
โปรตีนอื่นๆ	2-5
ไขมัน	1.5-6
เถ้า	1-4
ความชื้น	8-12

ที่มา : Verbruggen *et al.* (1993)

ข้าวฟ่างแต่ละสายพันธุ์จะมีองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดข้าวฟ่างแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น สถานที่เพาะปลูก ฤดูเพาะปลูก แต่โดยทั่วไปข้าวฟ่างมีองค์ประกอบ

ทางเคมีภายในเมล็ดดังแสดงในตารางที่ 1 โดยองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสตาร์ชข้าวฟ่าง

สมบัติ	สตาร์ชข้าวฟ่าง
ขนาดของเม็ดสตาร์ช (ไมครอน)	4-25
ปริมาณแป้ง (%)	88
ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินไนซ์ (°C)	68-75
กำลังการพองตัวที่ 95 °C (กรัม/กิโลกรัม)	22
ความสามารถในการละลายที่ 95 °C (%)	22
ความถ่วงจำเพาะ	1.5
น้ำหนักต่อ 1 ลูกบาศก์ฟุต (ปอนด์)	44.45

ที่มา: Watson (1984)

4. โปรตีนในข้าวฟ่าง

โปรตีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีกรดแอมิโนเป็นส่วนประกอบ กรดแอมิโนเหล่านี้เชื่อมโยกันเป็นสายโซ่ (chain) ด้วยพันธะเพปไทด์ (peptide bond) หรือ CO-NH- ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของกลุ่มคาร์บอกซิล (COOH) ของกรดแอมิโนตัวหนึ่ง กับกลุ่มแอมิโนของอีกตัวหนึ่ง โปรตีนแต่ละชนิดจะมีการจัดเรียงลำดับของกรดแอมิโน (amino acid sequence) เรียกว่า โครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) เมื่อสายเพปไทด์ของโครงสร้างปฐมภูมิที่เกิดขึ้นมีการม้วนขดหรือเกิดการทบของสายเพปไทด์เป็นแบบเกลียวแอลฟา (α -helix) แผ่นพลิทีบีต้า (β -pleated sheet) และขดเป็นอิสระ (random coil) เรียกว่าโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary structure) และถ้าโครงรูปของโปรตีน โครงสร้างทุติยภูมิมารวมกันหรือม้วนขดตัวกันแน่นเป็นโครงรูปของโปรตีนตลอดโมเลกุล เรียกว่า โครงสร้างตติยภูมิ (tertiary structure) แต่ถ้าโครงสร้างทุติยภูมิมาประกอบ เป็นหน่วยย่อยของโปรตีนและหน่วยย่อยดังกล่าวเกิดการรวมตัวกัน เรียกว่า โครงสร้างจตุรภูมิ (quaternary structure) (วารุณี, 2540)

โปรตีนในข้าวฟ่างสามารถแบ่งประเภทตามความสามารถในการละลายได้ 4 ประเภท คือ (Youssef, 1998) โปรตีนแอลบูมิน (Albumin) มีความสามารถในการละลายได้ในน้ำ, โปรตีนโกลบูลิน (Globulin) มีความสามารถในการละลายได้ในสารละลายเกลือ, โปรตีนกลูเทลิน (Glutelin) มีความสามารถในการละลายได้ในสารละลายเบส และ โปรตีนโพรลามิน (Prolamin) (คาฟิริน) มีความสามารถในการละลายได้ในแอลกอฮอล์ โดยโปรตีนที่มีปริมาณมากที่สุดที่พบในข้าวฟ่างเมื่อเทียบกับปริมาณโปรตีนทั้งหมดคือ โปรตีนคาฟิริน (Kafirin) เป็นโปรตีนโพรลามินที่สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ โดยข้าวฟ่างทั้งเมล็ดจะมีโปรตีนคาฟิรินประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ (Hamaker *et al.*, 1995)

โปรตีนคาฟิรินสามารถแบ่งตามน้ำหนักโมเลกุลออกเป็น แอลฟา-คาฟิริน (α -kafirin), บีต้า-คาฟิริน (β -kafirin) และ แกมมา-คาฟิริน (γ -kafirin) โดย แอลฟา-คาฟิรินมีมากถึงร้อยละ 80 ของปริมาณ โปรตีนคาฟิรินทั้งหมด รองลงมาคือ แกมมา-คาฟิริน และ บีต้า-คาฟิรินที่มีปริมาณ โปรตีนคาฟิรินร้อยละ 15 และ 5 ของปริมาณ โปรตีนคาฟิรินทั้งหมดตามลำดับ (Hamaker and Bugusu, 2003)

4.1 การเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในข้าวฟ่างระหว่างกระบวนการแปรรูป

การเปลี่ยนแปลงของโปรตีนคาฟิรินในระหว่างกระบวนการแปรรูปจะมีผลต่อความสามารถในการย่อยของโปรตีน โดยโปรตีนคาฟิรินจะสามารถเกิด disulfide-linked polymer โดยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างจาก แอลฟา ฮีลิก (alpha-helical) ไปเป็นแบบ บีต้า-ชีท (beta-sheet) (Duodu *et al.*, 2003)

Hamaker and Bugusu (2003) ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในระหว่างกระบวนการทำสุก โดยใช้กล้องคอนโฟคอลเลเซอร์ สแกนนิ่ง (confocal laser scanning microscope) เพื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของโปรตีน โดยมีการย้อมด้วยสี 3-(4-carboxybenzoyl) quinoline-2-carboxaldehyde (CBQCA) พบว่า หลังการทำสุก โปรตีนข้าวฟ่างจะมีลักษณะแบบ web-like structure หรือ sheet-like structure และมีเม็ดสตาร์ชฝังอยู่ในโครงสร้างของโปรตีน

5. คุณสมบัติพื้นฐานของสตาร์ช

สตาร์ชมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่เป็นลักษณะเฉพาะและมีคุณค่าทางโภชนาการที่แตกต่างจากคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น สตาร์ชโดยส่วนใหญ่จะพบในเมล็ด หัวหรือรากสะสมอาหารของพืช สตาร์ชโมเลกุลมีลักษณะกิ่งผลึก มีการจัดเรียงตัวในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลาง ซึ่งเรียกว่า ไฮลัม (hilum)

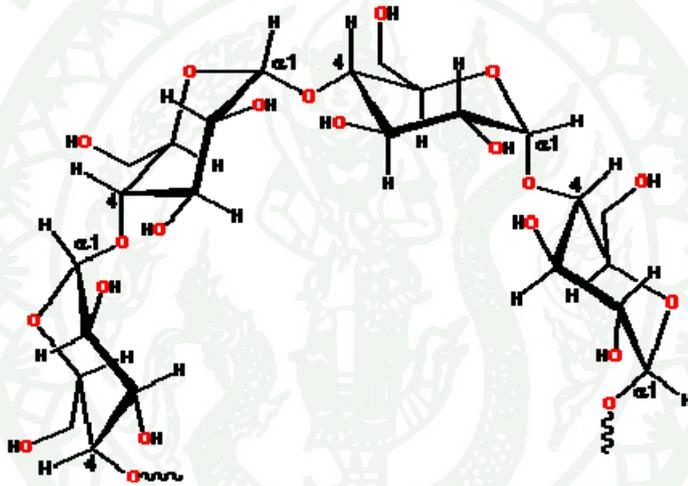
5.1 องค์ประกอบภายในเมล็ดสตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6: 10: 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end) สตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (แอมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (แอมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แสดงระดับโครงสร้างของเมล็ดสตาร์ชโดยส่วนใหญ่สตาร์ชประกอบด้วยแอมิโลสประมาณ 20-35 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามยังมีพืชบางชนิดที่สตาร์ชแกรนูลไม่มีแอมิโลสอยู่เลย เรียกว่า สตาร์ชประเภทแวกซี (waxy type) หรือ สตาร์ชที่ประกอบด้วยแอมิโลสในปริมาณมากโดยมีแอมิโลสประมาณ 50-85 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่า สตาร์ชแอมิโลสสูง (high amylose) เช่น amylo maize นอกจากนี้สตาร์ชจากแหล่งที่มาที่แตกต่างกันจะมีอัตราส่วนของ แอมิโลสและ แอมิโลเพกทินแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของสตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกัน อีกทั้งสตาร์ชยังมีองค์ประกอบที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เช่น ไขมัน โปรตีน และฟอสฟอรัส องค์ประกอบเหล่านี้จะมีในปริมาณน้อย แต่มีผลต่อคุณสมบัติของสตาร์ชเช่นกัน (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2546; Biliaderis, 1998)

5.1.1 แอมิโลส

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิด $\alpha - 1, 4$ ดังภาพที่ 1 แอมิโลสเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ และเนื่องจากแอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นจึงทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย และสามารถจับกับโมเลกุลอื่นได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน (French, 1979)

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไอโอดีน โดยโมเลกุลของแอมิโลสจะเกิดการพันเกลียวโดยหันส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิกเข้าด้านใน และมีโมเลกุลของไอโอดีนแทรกอยู่ตรงกลาง เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน (กลั่นรงค์และเกื้อกุล, 2546) ซึ่งสามารถตรวจสอบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงสีของไอโอดีน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีของไอโอดีนขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุล (Degree of polymerization, DP) โดยแอมิโลสที่มีขนาดโมเลกุล 21-24 ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล แอมิโลสที่มีขนาดโมเลกุล 25-29 ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีแดง แอมิโลสที่มีขนาดโมเลกุล 30-38 ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีม่วงแดง และแอมิโลสที่มีขนาดโมเลกุล 39-40 ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีม่วงน้ำเงิน (Whistler and BeMiller, 1999)



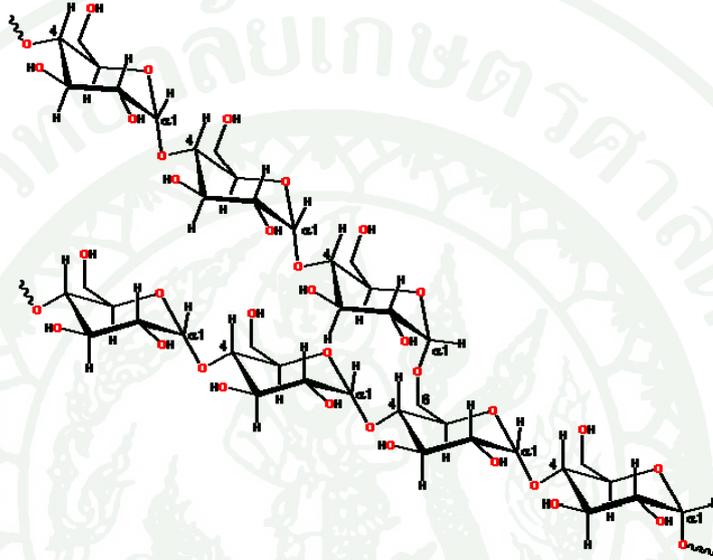
ภาพที่ 1 โครงสร้างของแอมิโลส

ที่มา: Chaplin (2007)

จากงานวิจัยพบว่า เมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและไขมัน มีผลต่อคุณสมบัติความเป็นผลึกที่ตรวจสอบโดยใช้ X-ray diffractometer โดยจะแสดงลักษณะความเป็นผลึกแบบ V-type และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ในสถานะที่มีน้ำเพียงพอพบว่าสารประกอบเชิงซ้อนชนิดนี้จะเกิดการหลอมเหลว (melt) ที่อุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียส และพบว่าในระหว่างการทำเย็น (cooling) สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและไขมันได้อีกครั้ง (Eliasson and Gudmundsson, 2006)

3.1.2 แอมิโลเพกติน

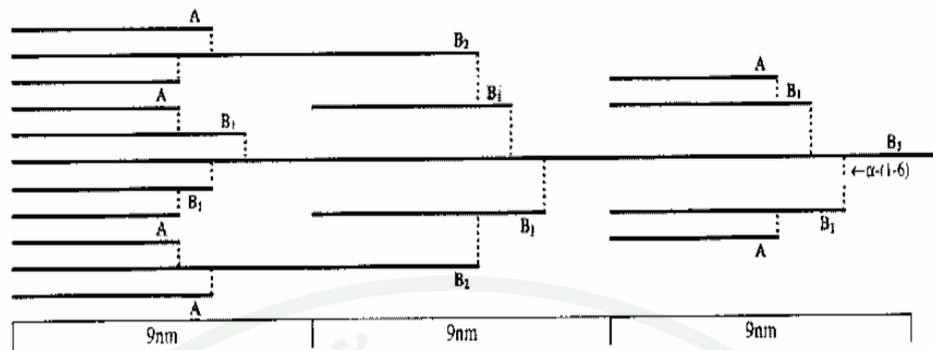
แอมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 6-glucosidic linkage (Bowers, 1992) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างของแอมิโลเพกติน

ที่มา: Chaplin (2007)

โครงสร้างแบบกิ่งของแอมิโลเพกตินประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิด คือ สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อกับสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สาย หรือมากกว่า โครงสร้างแอมิโลเพกตินประกอบด้วยสาย A และ สาย B ในอัตราส่วน 0.8 – 0.9:1 และสาย C (C-chain) หรือสายแกนจะมีเพียงสายเดียวในแต่ละโมเลกุลของแอมิโลเพกติน ซึ่งประกอบด้วยหมู่ ริดิวง 1 หมู่ (กล้านรงค์และเกือกูล, 2546) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ลักษณะโครงสร้างของแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C

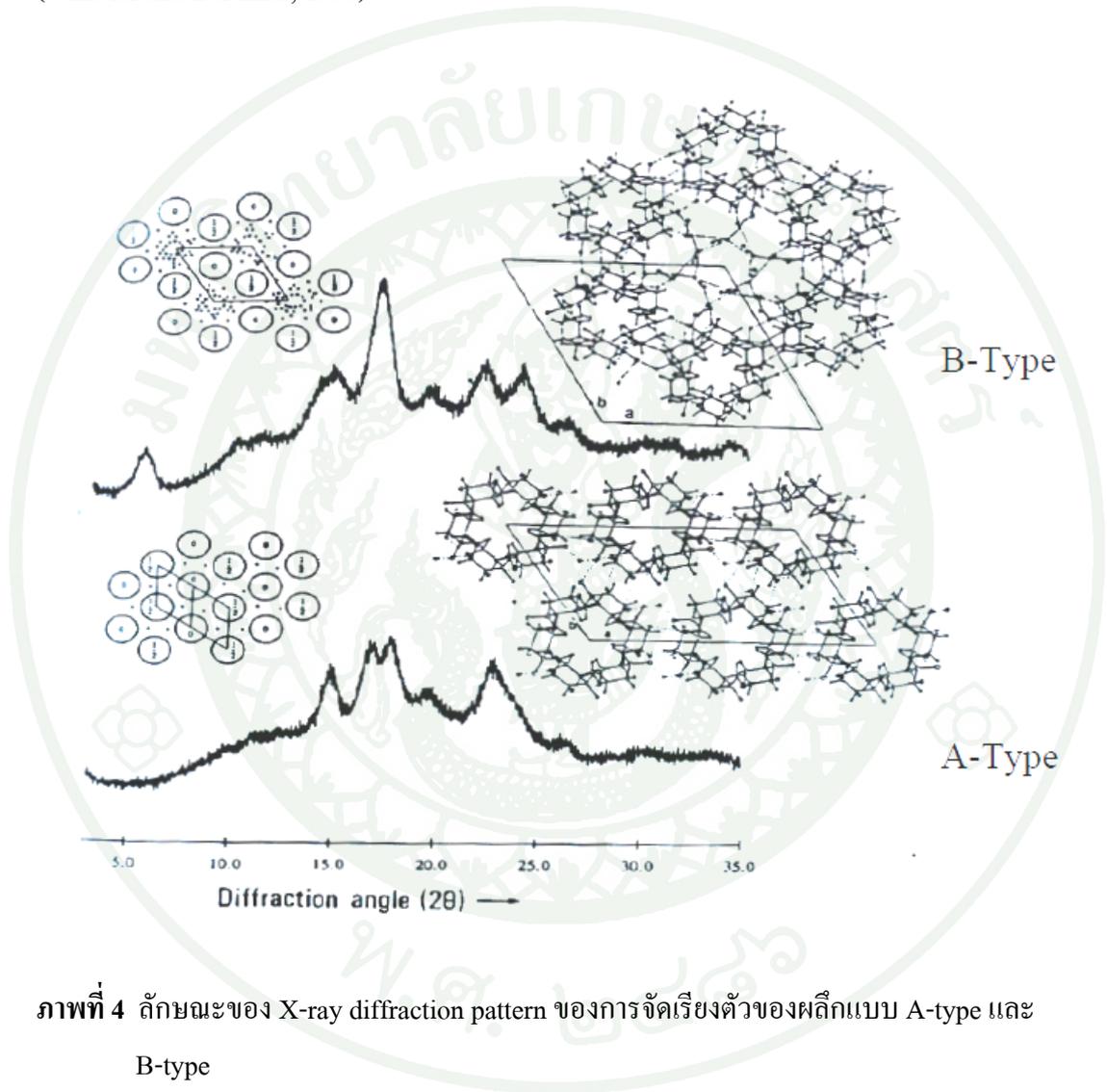
ที่มา: Hizukuri (1986)

ในธรรมชาติสตาร์ชแกรนูลจะมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐาน (semicrystalline) โดยจะมีโมเลกุลของแอมิโลเพกทินจัดเรียงตัวอยู่ในส่วนที่เป็นผลึก และมีโมเลกุลแอมิโลสจัดเรียงตัวอยู่ในส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกทินและแอมิโลสจะมีความแตกต่างกันตามสายพันธุ์ของสตาร์ชซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ X-ray diffractometer (Hoover, 2001) สตาร์ชแต่ละสายพันธุ์จะให้รูปแบบการสะท้อนรังสีเอ็กซ์แตกต่างกัน โดยสตาร์ชจากธรรมชาติจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกแบบ A-type สำหรับพืชหัวและพืชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกแบบ B-type ดังภาพที่ 4 สำหรับสตาร์ชจากถั่วเมล็ดเรียบมีการจัดเรียงตัวของผลึกแบบ C-type ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวร่วมกันของผลึกแบบ A-type และ B-type (Tester *et al.*, 2004)

5.2 เจลาทีโนเซชันและคุณสมบัติด้านความหนืด

สตาร์ชแกรนูลไม่สามารถละลายในน้ำเย็นแต่สามารถดูดซึมน้ำแบบผันกลับได้ สตาร์ชแกรนูลสามารถพองตัวได้เมื่อมีการดูดซึมน้ำและสามารถกลับสู่ขนาดปกติเมื่อมีการทำให้แห้ง การเกิดเจลาทีโนเซชันของสตาร์ชสามารถเกิดได้เมื่อสตาร์ชแกรนูลได้รับความร้อนในระบบที่มีน้ำเพียงพอ ทำให้สตาร์ชแกรนูลดูดซึมน้ำเข้ามาทำให้เกิดการพองตัวซึ่งทำให้สตาร์ชแกรนูลสูญเสียโครงสร้างที่เป็นระเบียบ โดยการเกิดเจลาทีโนเซชันจะทำให้สตาร์ชแกรนูลเกิดการสูญเสียโครงสร้างที่เป็นระเบียบแบบผันกลับไม่ได้ สตาร์ชแกรนูลเกิดการพองตัว มีการสูญเสียไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) และสูญเสียลักษณะความเป็นผลึก บางครั้งมีโมเลกุลแอมิโลสหลุดออกมาจาก

แกรนูระหว่างเกิดการเกิดเจลลาทีโนเซชัน เนื่องจากเอมิโลสจะอยู่ในส่วนอสัณฐานของสตาร์ชแกรนู อีกทั้งเอมิโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีขนาดเล็กจึงสามารถหลุดออกจากสตาร์ชแกรนูได้ง่าย ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชันได้แก่ สายพันธุ์ของสตาร์ช อัตราส่วนระหว่าง สตาร์ชกับน้ำ วิธีการวัดอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีโนเซชัน และความสม่ำเสมอของสตาร์ชแกรนู (Whistler and BeMiller, 1999)



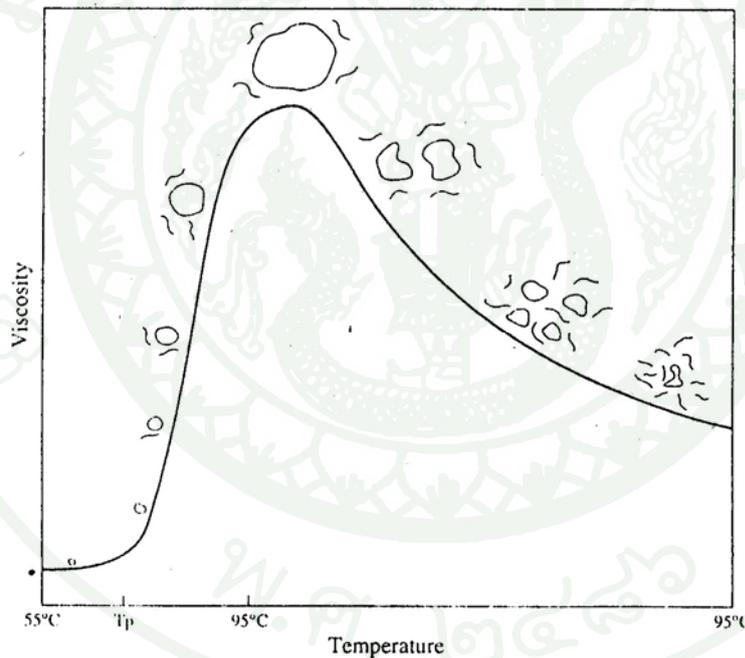
ภาพที่ 4 ลักษณะของ X-ray diffraction pattern ของการจัดเรียงตัวของผลึกแบบ A-type และ B-type

ที่มา: Biliaderis (1998)

เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สตาร์ชแกรนูในระบบที่มีน้ำมากเกินไป ทำให้พันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลถูกทำลายและแทนที่ด้วยพันธะไฮโดรเจนของน้ำ แกรนูจะมีการพองตัวและ

มีสารประกอบในสตาร์ชแกรนูลละลายออกมา เช่น แอมิโลส และถ้าหากมีการให้ความร้อนร่วมด้วยพบว่า สตาร์ชแกรนูลจะแตกออกและจะเกิดแป้งเปียก (paste) ขึ้น (Whistler and BeMiller, 1999)

อุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชเกิดเจลลาทีนในเซชันไม่ได้อยู่ที่อุณหภูมิเฉพาะ แต่มักอยู่เป็นช่วง (gelatinization temperature range) เนื่องจากเมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อน เม็ดสตาร์ชเม็ดแรกเริ่มเกิดเจลลาทีนที่อุณหภูมิหนึ่ง ส่วนเม็ดสตาร์ชอื่นๆ ก็จะเริ่มเกิดเจลลาทีนที่อุณหภูมิสูงกว่าเม็ดแรก ดังนั้นค่าที่แท้จริงจึงควรวัดจากอุณหภูมิแรกที่ทำให้เม็ดสตาร์ชเจลลาทีนซ์ จนถึงอุณหภูมิสูงขึ้นไปที่มีผลต่อเม็ดสตาร์ชต่อมา โดยการเกิดเจลลาทีนในเซชันของสตาร์ชสามารถใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) เพื่อหาช่วงของอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature; T_o) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature; T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature; T_c) ของการเกิดเจลลาทีนในเซชันและค่าพลังงานเอนทัลปี (enthalpy; ΔH , cal/g) (Whistler and BeMiller, 1999)



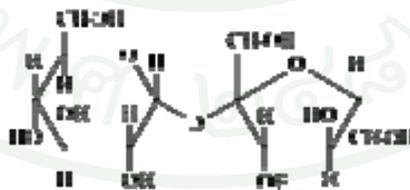
ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชแกรนูลและการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมีการให้ความร้อนในระบบที่มีน้ำเพียงพอ โดยทำการวัดด้วย Brabender Viscoamylograph

ที่มา: Whistler and Bemiller (1999)

การวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชแგრนูลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer) เครื่องวัดความหนืดแบบหลอด (Capillary viscometer) เครื่องบราเบนเดอร์ อะมิโลกราฟ (Brabender amylograph) หรือ เครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer) เป็นต้น เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ช และทำการกวนตลอดเวลา สตาร์ชแגרนูลจะดูดซึมน้ำและเกิดการพองตัว น้ำบริเวณรอบๆสตาร์ชแغرนูลเหลือน้อยลงทำให้สตาร์ชแغرนูลเคลื่อนไหวยาก เกิดความหนืดขึ้น เมื่อสตาร์ชแغرนูลพองตัวจนถึงระดับสูงสุดจะทำให้แغرนูลสามารถแตกออกได้ง่าย (ภาพที่ 5) เมื่อได้รับแรงเนื่องจากการกวนทำให้สตาร์ชแغرนูลแตกออก เมื่อสตาร์ชแغرนูลแตกออกพบว่าค่าความหนืดที่ได้จะลดลง เมื่อมีการลดอุณหภูมิให้แกระบบพบว่าเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุล ทำให้เกิดการตกตะกอนหรือเกิดเจลเกิดขึ้น อีกทั้งแป้งเปียก (paste) มีลักษณะทึบแสงเพิ่มขึ้น กระบวนการเหล่านี้เรียกว่า รีโทรเกรเดชันหรือเซตแบค (retrogradation or setback) (กลัณรงค์และเกื้อกุล, 2546; Whistler and BeMiller, 1999)

5.3 ผลของน้ำตาลและเกลือต่ออุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันของสตาร์ช

น้ำตาลซูโครส เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิด ไดแซคคาไรด์ (disaccharide) เป็นสารประกอบของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{12}H_{22}O_{11}$ โมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส ต่อกับน้ำตาลฟรักโทส ลักษณะการจัดเรียงตัวของน้ำตาลซูโครสคือ β -D-Fructofuranosyl-D-Glucopyranoside หรือ α -D-Glucopyranosyl-(1-2)-Fructofuranoside ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส

ที่มา: Mallery (2005)

Hodge and Osman (1976) รายงานว่าการลดปริมาณน้ำหรือลดค่า A_w ในสารละลายแป้ง โดยการเติมน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครส หรือใช้น้ำปริมาณลดน้อยลงจะทำให้จุดเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีในเซชันเกิดขึ้นช้าลง อีกทั้งการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งในสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นต่างกันจะให้ผลต่างกัน ซึ่งพบว่าสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นต่ำ 0-20 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลทำให้แป้งเกิดเจลลิตีในเซชันต่างกัน แต่เมื่อสารละลายน้ำตาลซูโครสมีความเข้มข้น 30 และ 50 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้แป้งเกิดเจลลิตีในเซชันที่อุณหภูมิสูงขึ้น

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

Bean and Setser (1992) รายงานว่าประจุบวกของเกลือ เช่น โซเดียมไอออนจะทำให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีความคงตัว ส่วนประจุลบ เช่น คลอไรด์ไอออนทำหน้าที่ในการเจลลิตี-ไนซ์ของเม็ดสตาร์ช ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1-3.5 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้ความหนืดของแป้งเปียกเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เป็น 10 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ความหนืดและอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันจะลดลง

5.4 รีโทรเกรเดชัน

เมื่อสตาร์ชผ่านการให้ความร้อนจนเกิดเจลลิตีในเซชันและมีการลดอุณหภูมิให้เย็นลง จะทำให้แป้งเปียก (starch paste) มีลักษณะแข็งขึ้น มีความยืดหยุ่น ทำให้เกิดเจลขึ้นบริเวณ junction zone การเกิดเจลบริเวณ junction zone เป็นขั้นแรกที่สตาร์ชโมเลกุลจะจัดเรียงตัวเป็นผลึกใหม่อีกครั้ง โดยสตาร์ชจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคือมีการละลายน้อยลง และเรียกการเปลี่ยนแปลงนี้ว่ารีโทรเกรเดชัน (Whistler and Bemiller, 1999)

รีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกติน โดยแอมิโลสจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วกว่าแอมิโลเพกติน ปัจจัยที่มีผลต่อการจัดเรียงตัวใหม่ของสายแอมิโลส คือ ความยาวของสายโซ่ อุณหภูมิสุดท้ายของการทำให้เย็น อัตราการลดลงของอุณหภูมิ หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไขมัน (Sievert and Würsch, 1993) อัตราเร็วในการเกิดรีโทรเกรเดชันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน สายพันธู์ของสตาร์ช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสตาร์ชและความเข้มข้นของส่วนประกอบอื่นๆในระบบ เช่น เกลือ น้ำตาล ไขมัน สารลดแรงตึงผิว (Whistler and Bemiller, 1999)

6. การจำแนกชนิดของสตาร์ช

6.1 ความสามารถในการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์

การจำแนกชนิดของสตาร์ชโดยศึกษาพฤติกรรมของสตาร์ชเมื่อมีการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์โดยไม่มีการสารเคมีอื่นร่วมด้วย สามารถจำแนกได้ดังนี้ (Berry, 1986)

6.1.1 สตาร์ชที่สามารถย่อยได้อย่างรวดเร็ว (Rapidly digestible starch; RDS)

เมื่อสตาร์ชชนิดนี้ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ พบว่าภายในเวลา 20 นาที สตาร์ชจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของน้ำตาลกลูโคส สตาร์ชชนิดนี้ได้แก่ สตาร์ชที่มีส่วนประกอบหลักเป็นส่วนอสัณฐาน พบมากในอาหารที่มีส่วนประกอบของสตาร์ชที่ผ่านการทำให้สุกโดยมีการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น

6.1.2 สตาร์ชที่สามารถย่อยได้อย่างช้าๆ (Slowly digestible starch; SDS)

สตาร์ชชนิดนี้มีคุณสมบัติคล้ายกับสตาร์ชที่สามารถย่อยได้อย่างรวดเร็ว (RDS) คือสามารถถูกย่อยได้สมบูรณ์ในลำไส้เล็ก แต่มีปัจจัยบางอย่างที่ทำให้ย่อยได้อย่างช้าๆ สตาร์ชกลุ่มนี้มีส่วนประกอบที่เป็นทั้งส่วนอสัณฐานและส่วนที่เป็นผลึก สามารถเกิดรีโทรเกรดหลังจากผ่านการหุงสุกแล้ว เมื่อมีการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์สตาร์ชจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของน้ำตาลกลูโคสภายในเวลา 100 นาที

6.1.3 สตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (Resistant starch; RS)

สตาร์ชชนิดนี้เป็นชิ้นส่วนของสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยโดยเอนไซม์ในร่างกาย เช่น เอนไซม์แอลฟาเอมิเลส (α -amylase) และพูลลูลานเนส (pullulanase) โดยสตาร์ชเหล่านี้จะไม่โดนย่อยหลังจากการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 120 นาที

6.2 ลักษณะคุณค่าทางโภชนาการ

การจำแนกสตาร์ชตามความสามารถในการย่อยโดยเอนไซม์ในร่างกาย สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทดังนี้ (Sajilata *et al.*, 2006)

6.2.1 สตาร์ชที่สามารถย่อยได้ (Digestible starches)

สตาร์ชกลุ่มนี้ประกอบด้วยสตาร์ชที่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในร่างกาย คือ สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (RDS) และสตาร์ชที่ย่อยได้อย่างช้าๆ (SDS)

6.2.2 สตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (Resistant starch)

สตาร์ชชนิดนี้จะไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในร่างกาย

7. สตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (Resistant starch; RS)

สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยคือ สตาร์ชที่ไม่สามารถย่อยและไม่สามารถดูดซึมในลำไส้เล็กแต่อย่างไรก็ตามเมื่อสตาร์ชกลุ่มนี้ไปถึงลำไส้ใหญ่จะถูกหมักโดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในลำไส้ใหญ่ (Englyst *et al.*, 1992) โดยสามารถแบ่งประเภทของ RS ตามลักษณะโครงสร้างออกเป็น 4 ประเภท (Sajilata *et al.*, 2006)

7.1 Resistant starch type I (RS1)

RS1 เป็นสตาร์ชที่มีความคงทนต่อการย่อย เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำลายเม็ดสตาร์ชได้ เช่น สตาร์ชที่พบในเซลล์หรือเนื้อเยื่อของพืช ธัญพืชที่ผ่านการบดบางส่วน และธัญพืชทั้งเมล็ด

7.2 Resistant starch type II (RS2)

RS2 พบในสตาร์ชดิบ เช่น สตาร์ชมันฝรั่งหรือสตาร์ชกล้วย สตาร์ชที่มีเอมิโลสสูง เม็ดสตาร์ชจะมีโครงสร้างอัดกันอย่างหนาแน่นในแนวของวงแหวนของเม็ดสตาร์ชทำให้ยากต่อการละลายน้ำและมีความต้านทานต่อการย่อย

7.3 Resistant starch Type III (RS3)

RS3 หมายถึงสตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรดชัน โดยส่วนใหญ่เป็นการเกิดรีโทรเกรดของโมเลกุลเอมิโลสระหว่างการทำเย็นหลังจากสตาร์ชเกิดเจลาทีไนเซชัน พบในอาหารที่มีการทำให้สุกโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น

7.4 Resistant starch Type IV (RS4)

RS4 เป็นสตาร์ชที่เกิดจากกระบวนการตัดแปรทางเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลสตาร์ช

8. การตัดแปรแป้งโดยวิธีพรีเจลาทีไนเซชัน (pregelatinized starch)

การตัดแปรสตาร์ชโดยวิธีพรีเจลาทีไนเซชันเป็นวิธีการตัดแปรทางกายภาพ โดยการพัฒนาคุณสมบัติของสตาร์ชให้ใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น โดยใช้กระบวนการทำให้สตาร์ชสุกบางส่วน กระบวนการพรีเจลาทีไนเซชันสามารถใช้การทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบต่างๆ เช่น เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum dryer) ซึ่งมีทั้งลูกกลิ้งแบบเดี่ยวนและลูกกลิ้งแบบคู่ โดยเตรียมสารแขวนลอยสตาร์ช (starch suspensions) หรือ เตรียมเป็นแป้งเปียก (starch pastes) ก่อนนำไปตัดแปร การผลิตสตาร์ชพรีเจลาทีไนเซชันด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเป็นวิธีที่นิยมแพร่หลายมากที่สุด สำหรับ

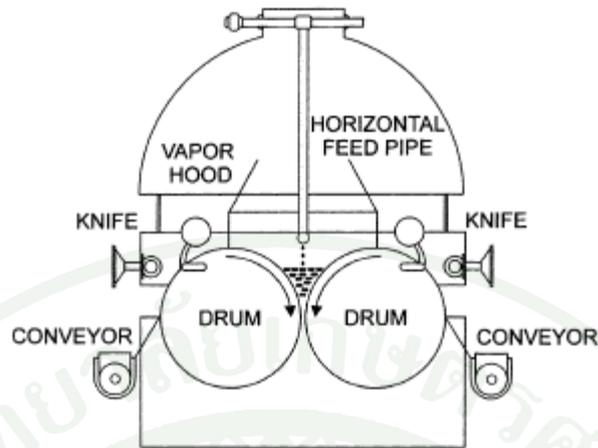
เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) จะต้องเตรียมสตาร์ชให้อยู่ในรูปสารแขวนลอยก่อนการตัดแปรร และเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) จะต้องเตรียมสตาร์ชให้มีความชื้นพอประมาณ (semi-dry starch) เครื่องทำแห้งแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมต่อวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์แตกต่างกันออกไป (Murphy, 2000)

คุณสมบัติของแป้งพรีเจลา คือสามารถกระจายตัวในน้ำเย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วให้ความหนืดทันที และไม่จับตัวเป็นก้อน สามารถใช้ได้ทันทีโดยไม่ต้องให้ความร้อน (Hodge and Osman, 1976) การผลิตแป้งพรีเจลาโดยใช้กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ทำให้เกิดการสลายโมเลกุลของสตาร์ชมากกว่าการผลิตโดยการใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ทำให้มีความสามารถในการละลายดีกว่า แต่มีกำลังการพองตัวและให้ความหนืดในน้ำเย็นน้อยกว่าแป้งที่ตัดแปรรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Doublier *et al.*, 1986)

8.1 การตัดแปรรแป้งพรีเจลาทีโนเซชันโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

การตัดแปรรแป้งโดยวิธีพรีเจลาทีโนเซชันโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งสามารถเลือกใช้ทั้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยว (single) และลูกกลิ้งคู่ (double) โดยต้องมีการปรับอุณหภูมิของผิวลูกกลิ้งและอัตราการหมุน ให้สอดคล้องกับปริมาณความชื้นและความสามารถในการเกิดเจลาทีโนเซชันของแป้งแต่ละชนิด สำหรับลูกกลิ้งคู่ต้องมีการปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้เท่ากันตลอดแนวความยาวของลูกกลิ้ง และให้สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในลูกกลิ้ง อัตราการหมุน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำลูกกลิ้ง (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2546)

การผลิตแป้งพรีเจลาทีโนซ์ (pregelatinized starch) โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ สารละลายน้ำแป้งจะถูกใส่ลงไประหว่างลูกกลิ้งทั้งสอง แป้งจะเกิดเจลาทีโนเซชันและถูกทำแห้งในเวลาต่อมา โดยแป้งที่ถูกทำแห้งแล้วจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆติดอยู่บริเวณลูกกลิ้ง จากนั้นจะมีใบมีดขูดแผ่นแป้งออกจากลูกกลิ้ง ความหนาของแผ่นแป้งที่ได้จะขึ้นอยู่กับการปรับระยะห่างของลูกกลิ้ง อัตราการป้อนสารละลาย (Gardner, 1971)



ภาพที่ 7 ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (double drum dryer)

ที่มา: Vallous *et al.* (2002)

จากการศึกษาการทำงานของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ในการทำแห้งสารละลายแป้งข้าวโพดเพื่อผลิตแป้งพรีเจลาทีไนเซชัน เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่มีลูกกลิ้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวขนาด 0.5 เมตร กำหนดอัตราการหมุนของลูกกลิ้งอยู่ที่ 2, 3, 4, 5, และ 6 รอบต่อนาที และกำหนดการให้ความร้อนโดยการใช้ความร้อนจากความดันไอน้ำที่ระดับ 6, 7 หรือ 8 บาร์ กำหนดระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งทั้งสอง 0.90 ± 0.01 มิลลิเมตร สารละลายน้ำแป้งที่ใช้มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโดยน้ำหนัก จากการทดลองครั้งนี้พบว่าระดับความดันไอน้ำ อัตราการป้อนตัวอย่าง และอัตราการหมุนของลูกกลิ้งมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยปัจจัยทั้งสามอย่างมีความสัมพันธ์กันทำให้ปริมาณความชื้นและความหนาของแผ่นแป้งพรีเจลาทีไนเซชันที่ได้แตกต่างกัน (Vallous *et al.*, 2002)

8.2 การตัดแปรแป้งพรีเจลาทีไนเซชัน โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

การผลิตสตาร์ชหรือแป้งพรีเจลาทีไนเซชัน โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีข้อจำกัดคือ ควรใช้ความเข้มข้นของสารละลายน้ำแป้งประมาณ 6-10 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสตาร์ช เนื่องจากหากสารละลายน้ำแป้งมีความหนืดมากกว่า 200 เซนติพอยส์ จะไม่สามารถพ่นออกมาเป็นละอองฝอยได้ นอกจากนี้การเกิดเจลาทีไนเซชันของสารละลายน้ำแป้งที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้เกิดความลำบากในการดูดสารละลายเพื่อนำไปพ่นฝอย การทำแห้งโดยเครื่องทำแห้ง

แบบพ่นฝอยจะเป็นการระเหยน้ำออกจากตัวอย่างและทำให้แห้งโดยทันทีที่มีการพ่นตัวอย่างออกมา โดยปกติการตัดแปรแป้งพรีเจลาทีโนเซชัน โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยจะทำให้แป้งมีความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ (Winkler, 1971)



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุดิบ (Materials)

ข้าวฟ่างสายพันธุ์ KU804 จากศูนย์วิจัยข้าว โพลและข้าวฟ่างแห่งชาติ (National Corn and Sorghum Research Center) อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

2. อุปกรณ์ (Equipments)

2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือผลิตแป้งข้าวฟ่าง

2.1.1 เครื่องตัดสีข้าว

2.1.2 เครื่องบดผสม (Blender: VA-M11L, Hitachi, Japan)

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

2.1.4 ตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมครอน (100 mesh: ASTM E11 150 micron, Retsch GmbH, Germany)

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือผลิตแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชัน

2.2.1 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (Double drum drier: T. C. Tech Ltd., Thailand)

2.2.2 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drier: Model Niro A/S, Gladsaxevej 305.DK-2860 Soeborg, Denmark)

2.2.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath: OB14, Memmert GmbH+ Co.KG., Germany)

2.2.4 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

2.2.5 ตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมครอน (100 mesh: ASTM E11 150 micron, Retsch GmbH, Germany)

2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope: JEOL JSM-6480LV, JEOL, Japan)

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

2.3.3 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC: Pyris 1, Perkin-Elmer, USA)

2.3.4 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: JEOL JDX-3530, JEOL, Japan)

2.3.5 เครื่องวัดสี (Minolta spectrophotometer: CM-3500d, Minolta CO. LTD, Japan)

2.3.6 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer: Spectronic Geneys 10 UV Scanning, Thermo Electron Corporation, USA)

2.3.7 กล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง (Confocal Laser Scanning Microscope (CLSM): LSM5 PASCAL, ZEISS, Germany)

2.3.8 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven: 400, Memmert GmbH+ Co.KG., Germany)

2.3.9 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Bench Centrifuge: Z200A, Hermle Labortechnik, Germany)

2.3.10 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (SPB31, Scale tech, Germany)

2.3.11 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter: 06071 N, Jenco Electronics Ltd, China)

2.3.12 ถ้วยอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น (Moisture can)

2.3.13 โถดูดความชื้น (Desiccators)

2.3.14 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3. สารเคมี (reagents)

3.1 สารเคมีสำหรับเตรียมสตาร์ชข้าวฟ่าง

3.1.1 กรดแลคติกร้อยละ 85 (Lactic acid; Ajax Finechem, Australia)

3.1.2 โซเดียมไบซัลไฟท์ (Sodium bisulfite; Merck, Germany)

3.2. สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ resistant starch

3.2.1 แพนครีเอติก แอลฟาเอมิเลส (Pancreatic α -amylase; Pancreatin, 10g, 3 Ceralpha Units/mg)

3.2.2 แอมิโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase; 12 mL, 3300 Units/mL, Megazyme International Ireland Ltd., Ireland)

3.2.3 Glucose Determination Reagent (GOPOD, Megazyme International Ireland Ltd., Ireland) (for 1 litre)

3.2.4 Glucose Reagent Buffer (concentrate, Megazyme International Ireland Ltd., Ireland) (50 mL)

3.2.5 Glucose Standard Solution (1 mg/mL in 0.2% benzoic acid, Megazyme International Ireland Ltd., Ireland)

3.2.6 Resistant Starch Control (with stated level of RS, Megazyme International Ireland Ltd., Ireland)

3.2.7 กรดมาลิก (Maleic acid; $C_4H_4O_4$; HPLC grade, Fluka, Austria)

3.2.8 กรดแอซติก (Acetic acid; CH_3COOH ; Analytical grade, J.T. Baker, Thailand)

3.2.9 แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) (Laboratory grade, Unilab, Asia Pacific Specialty Chemicals Limited, Australia)

3.2.10 โซเดียมเอไซด์ (Sodium azide; NaN_3 ; Analytical grade, SIGMA-ALDRICH, USA)

3.2.11 โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Potassium dihydrogen orthophosphate; KH_2PO_4 ; Analytical grade, Ajax Finechem, Australia)

3.2.12 เตตระไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิด (4-hydroxybenzoic acid; $C_7H_6O_3$; Analytical grade, Fluka, Germany)

- 3.2.13 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl: Analytical grade, Merck KGaA, Germany)
- 3.2.14 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH: Analytical grade, Merck KGaA, Germany)
- 3.2.15 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH: Analytical grade, Merck KGaA, Germany)
- 3.2.16 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethanol; C₂H₆O: Analytical reagent, LAB-SCAN LTD., Ireland)
- 3.3 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน
- 3.3.1 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H₂SO₄: Analytical grade, lot. E16W60, J.T. Barker, Mallinckrodt Barker, USA)
- 3.3.2 กรดบอรัริก (Boric acid; H₃BO₃: Analytical grade, lot. A577065 442 , Merck KGaA, Germany)
- 3.3.3 คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulfate; CuSO₄: Analytical grade, lot. 0236071A, Fisher Chemicals, Fisher Scientific UK Limited, UK)
- 3.3.4 โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulfate; K₂SO₄: Analytical grade, lot. AF505372, UNIVAR, Ajax Finechem, New Zealand)
- 3.3.5 เมทิลเรด (Methyl red; C₁₅H₁₅N₃O₂: Analytical grade, lot. 810278KP, Panreac, Panreac Quimica SK, Spain)
- 3.3.6 โบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol green; C₂₁H₁₄Br₄O₅S: Analytical grade, lot.AF404011, LABCHEM, Ajax Finechem, New Zealand)
- 3.3.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH: Commercial grade, Thasco Chemical Co., Thailand)

3.4 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

3.4.1 ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether: Analytical grade, lot. B42752, Mallinckrodt CHEMICALS, USA)

3.5 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์เส้นใยหยาบ

3.5.1 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H₂SO₄: Analytical grade, lot. E16W60, J.T. Barker, Mallinckrodt Barker, USA)

3.5.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH: Analytical grade, lot. B888598630, Merck KGaA, Germany)

3.5.3 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethanol; C₂H₅OH: Analytical grade, lot. K364776983 634, Merck KGaA, Germany)

3.5.4 ออกทานอล (Octan-1-ol; CH₃(CH₂)₇OH: Laboratory grade, lot. B/NO. H1F223, Asia Pacific Specialty Chemicals Limited, Australia)

3.6 สารเคมีสำหรับศึกษาโครงสร้างของเจลแป้งข้าวฟ่างและเจลแป้งข้าวฟ่างตัดแปรโดยกลีโองคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง

3.6.1 โรดามีน บี (Rhodamine B; C₂₈H₃₄N₂O₇: Analytical grade, lot. R648MP, Invitrogen, USA)

3.6.2 ฟลูออเรสซินไอโซไทโอไซยาเนต (Fluorescein-5-isothiocyanate; FITC 'Isomer': lot. 41423A, Invitrogen, USA)

4. ชุดตรวจสอบ Resistant starch

ชุดตรวจสอบปริมาณ resistant starch (Resistant starch assay kit catalogue no. K-RSTAR, assay procedure RSTAR 11/02; 100 assays per kit: Megazyme International Ireland Ltd., Ireland)

วิธีการ

1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 การเตรียมแป้งข้าวฟ่าง

นำเมล็ดข้าวฟ่างที่ขัดสีเปลือกออกโดยเครื่องขัดสีเปลือกข้าวสาร จากนั้นนำเมล็ดข้าวฟ่างมาคัดแยกเมล็ดเสียออกก่อนนำไปโม่เปียก โดยนำเมล็ดข้าวฟ่างที่ขัดสีเปลือกออกแล้วมาแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วนำมาโม่ด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ โดยใช้อัตราส่วนเมล็ดข้าวฟ่างต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 2 จากนั้นเทียงแยกน้ำด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง และนำเข้าอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะแห้ง นำแป้งหลังอบมาบดโดยใช้เครื่องปั่นผลไม้แบบแห้ง จากนั้นร่อนแป้งที่ได้โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช (หทัยชนก, 2551)

1.2 การเตรียมสตาร์ชข้าวฟ่าง

นำเมล็ดข้าวฟ่างมาแช่ในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไบซัลไฟท์ความเข้มข้น 0.25% (w/v) กับกรดแลคติกความเข้มข้น 0.5% (w/v) ที่อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเมล็ดและสารละลายแช่ 1 ต่อ 2 ก่อนทำการสกัดสตาร์ชข้าวฟ่างโดยวิธีการโม่เปียก (หทัยชนก, 2551)

2. สถานะในการตัดแปรแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างโดยพรีเจลลาทีนเซชัน

2.1 สถานะในการตัดแปรแป้งข้าวฟ่าง

2.1.1 การเตรียมแป้งตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

นำสารละลายน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 20 มาผ่านเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีอุณหภูมิที่ผิวหน้าลูกกลิ้ง 120 และ 130 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15, 0.25 และ 0.35 มิลลิเมตร

2.1.2 การเตรียมแปรงตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

นำสารละลายน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 10 มาให้ความร้อนที่ระดับ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ก่อนนำไปเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยให้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีอุณหภูมิขาเข้า 180 องศาเซลเซียส ขาออก 80 องศาเซลเซียส

2.2 สภาวะในการตัดแปรสสารข้าวฟ่าง

2.2.1 การเตรียมสสารตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

นำสารละลายสสารความเข้มข้นร้อยละ 20 นำมาผ่านเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีอุณหภูมิที่ผิวหน้าลูกกลิ้ง 130 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.35 มิลลิเมตร

2.1.2 การเตรียมสสารตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

นำสารละลายสสารความเข้มข้นร้อยละ 10 มาให้ความร้อนที่ระดับ 85 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยให้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีอุณหภูมิขาเข้า 180 องศาเซลเซียส ขาออก 80 องศาเซลเซียส

3. การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทีน-เซชัน

3.1 ตรวจสอบลักษณะเม็ดสสารภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

นำตัวอย่างมาโรยลงบนแท่นอลูมิเนียม ฉาบด้วยไอของคาร์บอน แล้วนำส่วนผิวมาเคลือบทับด้วยทอง จากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราด

3.2 ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสีแป้งและสสารข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยใช้เครื่องวัดสี

ตรวจสอบสีของตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง Minolta spectrophotometer รุ่น 3500d บันทึกค่าที่วัดได้ในระบบ Hunter Lab เป็นค่า $L^* a^* b^*$ โดยอ่านค่าอย่างน้อย 5 ตำแหน่งของตัวอย่าง

4. ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทีไนเซชัน

4.1 ตรวจสอบความสามารถในการละลายน้ำเย็น (Cold water solubility, CWS)

นำตัวอย่างมาละลายน้ำ แล้วนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่น จากนั้นนำไปหมนเหวี่ยงประมาณ 15 นาที ดูคส่วนใสด้านบนเพื่อนำไปอบหาน้ำหนัก นำมาคำนวณหาความสามารถในการละลายน้ำเย็น (Chen and Jane, 1994)

4.2 ตรวจสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (water retention capacity, WRC)

นำตัวอย่างมาผสมกับน้ำ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จากนั้นนำไปหมนเหวี่ยง นำส่วนของตะกอนไปชั่ง นำมาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับน้ำ (Wang and Kinsella, 1976; Achinewhu *et al.*, 1998)

4.3 ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงลักษณะ โครงสร้างผลึกด้วย X-ray diffractometer

ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกโดยใช้ X-ray diffractometer โดยกำหนดสภาวะการทดลองโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลท์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ เก็บข้อมูลมุมหักเหตั้งแต่ 3 ถึง 40 องศา 2θ และอัตราเร็วในการเปลี่ยนองศา 0.02 องศาต่อวินาที

4.4 สมบัติการเกิดเจลลาทีไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชัน

เตรียมตัวอย่างแป้งต่อน้ำความเข้มข้นเท่ากับ 30:70 โดยมีน้ำหนักรวมสุดท้ายเท่ากับ 20 มิลลิกรัม บรรจุลงด้วยใส่ตัวอย่างปิดฝาให้สนิท และวางตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำวิเคราะห์การเกิดเจลลาทีไนเซชันด้วย Differential scanning calorimeter, (DSC) ใช้ด้วยใส่ตัวอย่างสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอ้างอิง และกำหนดอุณหภูมิในการให้ความร้อนที่ 25 ถึง 130 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นนำ

ด้วยตัวอย่างไปเก็บไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 14 วัน เพื่อวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันด้วย DSC โดยการให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 25 ถึง 130 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที วิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีไนเซชันและรีโทรเกรเดชัน จากอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, T_c) และพลังงานเอนทัลปี (enthalpy, ΔH) (Zhang and Hamaker, 1998)

4.5 ตรวจสอบสมบัติด้านความหนืด

ตรวจสอบสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) ตามวิธีของ AACC (2000) (ภาคผนวก ก) เตรียมสารละลายน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักแห้ง ให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส กวนเพื่อให้แป้งกระจายตัว จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 95 องศาเซลเซียสและคงไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส จากนั้นทำให้เย็นลงที่ 50 องศาเซลเซียส บันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าเบรกดาวน์ (breakdown) และค่าเซตแบค (setback)

5. ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีพรีเจลลิตีไนเซชัน (ภาคผนวก ข)

5.1 ตรวจสอบความชื้น ตามวิธีของ AOAC (2000)

5.2 ปริมาณโปรตีน ดัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (2000)

5.3 ปริมาณไขมัน ดัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (2000)

5.4 ปริมาณเถ้า ตามวิธีของ AOAC (2000)

5.5 ปริมาณเส้นใยหยาบ ดัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (2000)

5.6 ตรวจสอบสมบัติความเป็น resistant starch โดยใช้ชุดตรวจสอบ Resistant assay kit ของ Megazyme (ภาคผนวก ข)

6. การศึกษาผลของน้ำตาลต่อสมบัติของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างพรีเจลลิ่งในเซชัน

6.1 สมบัติด้านความหนืด

การศึกษาผลของน้ำตาลต่อคุณสมบัติด้านความหนืด ตรวจสอบสมบัติด้านความหนืด ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) ตามวิธีของ AACC (2000) (ภาคผนวก ก) เตรียม สารละลายน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักแห้ง ในสารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 0, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

6.2 ตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างเจล โดยเครื่องคอลโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง

นำตัวอย่างจากข้อ 6.1 มาบรรจุในหลอดฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร เก็บไว้ที่ -18 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเจลมาตัดเป็นแผ่นบางๆ ย้อมด้วยสีย้อม ฟลูออเรสซิน ไอโซโทไอโซยานเนต (FITC) ที่มีคุณสมบัติในการย้อมติดส่วนของสตาร์ช และย้อม ทับด้วยสีย้อมโรดามีน บี (Rhodamine B) ที่มีคุณสมบัติในการย้อมติดโปรตีน นำมาตรวจสอบ ลักษณะโครงสร้างเจลโดยใช้กล้องคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง

7. การศึกษาผลของเกลือต่อสมบัติแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างพรีเจลลิ่งในเซชัน

7.1 สมบัติด้านความหนืด

การศึกษาผลของเกลือต่อคุณสมบัติด้านความหนืด ตรวจสอบสมบัติด้านความหนืด ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) ตามวิธีของ AACC (2000) (ภาคผนวก ก) เตรียม สารละลายน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนักแห้ง ในสารละลายเกลือความเข้มข้น 0, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

7.2 ตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างเจล โดยเครื่องคอลโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง

นำตัวอย่างจากข้อ 7.1 มาบรรจุในหลอดฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร เก็บไว้ที่ -18 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเจลมาตัดเป็นแผ่นบางๆ ย้อมด้วยสีย้อม

ฟลูออเรสซิน ไอโซโทโอไซยานต (FITC) ที่มีคุณสมบัติในการย้อมติดส่วนของสตาร์ช และย้อม
ทับด้วยสีย้อมโรดามีน บี (Rhodamine B) ที่มีคุณสมบัติในการย้อมติดโปรตีน นำมาตรวจสอบ
ลักษณะโครงสร้างเจลโดยใช้กล้องคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง

10. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติจากแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Random Design;
CRD) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่าง
ของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Science; version 11.5)

11. สถานที่ทดลอง

ห้องปฏิบัติการและอาคารแปรรูป ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะ
อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

1. ปริมาณร้อยละของผลได้

เมื่อนำข้าวฟ่างที่ขัดสีเปลือกออกแล้วมาผลิตแป้งโดยวิธีการไม่เปียก จากนั้นนำมาผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช จะได้แป้งที่มีลักษณะสีน้ำตาลอ่อน มีร้อยละของผลได้ 75.35 โดยคิดจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ผ่านการขัดสีแล้ว สำหรับสตาร์ชข้าวฟ่างมีร้อยละของผลได้เท่ากับ 42.25 โดยคิดจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ผ่านการขัดสีแล้ว จากนั้นนำแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างที่ได้ไปตัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทีนในเซชัน โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย การเตรียมแป้งด้วยวิธีพรีเจลาทีนในเซชันโดยใช้เครื่องทำแห้งทั้งสองแบบมีร้อยละของผลได้ดังตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 แป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (DSF) และแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SSF) มีร้อยละของผลได้ 81.96-87.43 และ 67.77-84.39 ตามลำดับ โดยคิดจากแป้งข้าวฟ่างก่อนการตัดแปร สำหรับร้อยละของผลได้ของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีนในเซชันขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดแปร โดยพบว่าการใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยจะทำให้แป้งมีโอกาสตกค้างอยู่ภายในเครื่องมากกว่าการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยจะมีแป้งติดอยู่ภายในบริเวณถังอบ (chamber) และตกค้างในท่อที่ใช้ส่งแป้งที่แห้งแล้วสู่ขวดเก็บตัวอย่างจึงทำให้มีการสูญเสียมาก ในขณะที่การตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เกิดการสูญเสียแป้งในปริมาณน้อย โดยการสูญเสียแป้งจะเกิดขึ้นได้เนื่องจากแป้งที่หลุดออกมาจากลูกกลิ้งไม่ตกลงในถาดสำหรับรับตัวอย่าง สำหรับแป้งข้าวฟ่างที่ตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที (SSF75) พบว่ามีร้อยละของผลได้น้อยที่สุดเนื่องจากพบว่าในระหว่างการทำแห้งเกิดการอุดตันของหัวฉีดพ่นฝอย (Nozzles) มีส่วนของแป้งติดอยู่บริเวณนี้จำนวนมากจึงต้องมีการหยุดการป้อนตัวอย่างเพื่อนำส่วนของหัวฉีดพ่นฝอยไปทำความสะอาดทำให้ต้องสูญเสียตัวอย่างที่ติดอยู่บริเวณนี้ไปจึงทำให้มีร้อยละของผลได้น้อยที่สุด

ตารางที่ 3 ร้อยละของผลได้ (%yield) ของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างตัดแปรที่เตรียมโดยวิธีพรีเจลา-
ทีโนเซชัน

Sample	% yield
DSF1215	83.43*
DSF1225	84.70*
DSF1235	87.43*
DSF1315	81.96*
DSF1325	83.08*
DSF1335	82.58*
SSF65	75.22*
SSF75	67.77*
SSF85	84.39*
DSS	84.59**
SSS	54.12**

- หมายเหตุ: - อักษร DSF1215, DSF1225 และ DSF1235 คือแป้งข้าวฟ่างที่ตัดแปรโดยใช้เครื่องทำ
แห้งแบบลูกกลิ้ง อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 120 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง
0.15, 0.25 และ 0.35 มิลลิเมตร ตามลำดับ
- อักษร DSF1315, DSF1325 และ DSF1335 คือแป้งข้าวฟ่างที่ตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้ง
แบบลูกกลิ้ง อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 130 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15,
0.25 และ 0.35 มิลลิเมตร ตามลำดับ
- อักษร SSF65, SSF75 และ SSF85 คือแป้งข้าวฟ่างที่มีการให้ความร้อนแก่สารละลาย
น้ำแป้งที่ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียสตามลำดับ ก่อนการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำ
แห้งแบบพ่นฝอย
- อักษร DSS คือ สตาร์ชข้าวฟ่างที่ตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง อุณหภูมิผิวหน้า
ลูกกลิ้ง 130 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.35 มิลลิเมตร
- อักษร SSS คือสตาร์ชข้าวฟ่างที่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ชที่ 85 องศา-
เซลเซียส ก่อนการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย
- * base on flour, ** base on starch

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตัดแปรสตราซ์เช่นกัน จากตารางที่ 3 สตราซ์ข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยใช้อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 130 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.35 มิลลิเมตร (DSS) มีร้อยละของผลได้ 84.59 และสตราซ์ที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งก่อนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ก่อนการทำแห้ง (SSS) มีร้อยละของผลได้ 54.12 ร้อยละของผลได้คิดจากสตราซ์ข้าวฟ่างก่อนการตัดแปร

2. องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตราซ์ข้าวฟ่าง

เมื่อทำการตัดแปรแป้งและสตราซ์ข้าวฟ่างด้วยวิธีพรีเจลาทิไนเซชัน จากนั้นจึงได้ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีตามวิธีการของ AOAC (2000) จากผลการวิเคราะห์พบว่า ปริมาณโปรตีน เถ้า เส้นใยหยาบของแป้งและสตราซ์ข้าวฟ่างก่อนและหลังการตัดแปร ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่เมื่อพิจารณาปริมาณไขมันของแป้งข้าวฟ่าง พบว่า แป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปร โดยวิธีพรีเจลาทิไนเซชันจะมีปริมาณไขมันน้อยกว่าแป้งข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านการตัดแปร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในระหว่างกระบวนการตัดแปรอาจทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสตราซ์และไขมัน จึงทำให้ไขมันของแป้งข้าวฟ่างหลังการตัดแปรมีปริมาณลดลง

เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นของแป้งและสตราซ์ข้าวฟ่าง (ตารางที่ 4) พบว่า เมื่อผ่านการตัดแปร โดยวิธีพรีเจลาทิไนเซชันปริมาณความชื้นมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการตัดแปรทั้งการใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นการใช้ความร้อนในการทำแห้งสารละลายน้ำแป้ง อีกทั้งอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนส่งผลให้ภายหลังการตัดแปรแป้งมีความชื้นต่ำกว่าแป้งข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านการตัดแปร และพบว่า แป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งในทุกสภาวะ (DSF) มีความชื้นต่ำกว่าแป้งที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยในทุกสภาวะ (SSF) เนื่องจาก ในการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง สารละลายน้ำแป้งได้รับความร้อนจากผิวหน้าลูกกลิ้งโดยตรง อีกทั้งเม็ดสตราซ์โดนทำลายจากความร้อนและแรงเฉือนที่ได้รับจากลูกกลิ้ง จึงอาจทำให้เมื่อผ่านกระบวนการตัดแปรจึงมีความชื้นต่ำกว่าแป้งที่ทำการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

สำหรับ DSF พบว่าอุณหภูมิและช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งที่ใช้ในการตัดแปรไม่ส่งผลต่อความชื้นของแป้งตัดแปรอย่างชัดเจน (ตารางที่ 4) สำหรับความชื้นที่ต่างกันของ DSF อาจจะเป็นผล

จากอุณหภูมิและความชื้นในอากาศของแต่ละวันที่ทำการตัดแปร เนื่องจากแป้งพรีเจลาทีไนเซชันมีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้เร็ว

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง

Sample	Moisture (%)	Protein (%)	Fat (%)	Ash (%)	Fiber (%)
NSF	9.43±0.03f	8.49±0.08b	0.83±0.14c	0.55±0.08b	0.13±0.06ns
DSF1215	4.91±0.16a	8.38±0.06b	0.23±0.07b	0.58±0.07b	0.11±0.02ns
DSF1225	5.06±0.11a	8.40±0.11b	0.22±0.06b	0.67±0.03b	0.12±0.02ns
DSF1235	5.58±0.08b	8.33±0.15b	0.22±0.06b	0.62±0.03b	0.11±0.03ns
DSF1315	5.98±0.12c	8.44±0.07b	0.21±0.05b	0.66±0.06b	0.12±0.04ns
DSF1325	5.04±0.07a	8.41±0.09b	0.20±0.04b	0.51±0.08b	0.10±0.08ns
DSF1335	5.11±0.03a	8.34±0.05b	0.20±0.03b	0.52±0.03b	0.13±0.07ns
SSF65	6.03±0.60c	8.35±0.04b	0.21±0.08b	0.60±0.04b	0.13±0.04ns
SSF 75	6.65±0.09d	8.50±0.08b	0.20±0.09b	0.59±0.06b	0.11±0.01ns
SSF85	6.58±0.04d	8.45±0.09b	0.22±0.01b	0.56±0.05b	0.11±0.06ns
NSS	14.10±0.10g	0.35±0.07a	0.02±0.00a	0.06±0.05a	0.12±0.00ns
DSS	7.64±0.15e	0.33±0.08a	0.02±0.01a	0.07±0.01a	0.12±0.04ns
SSS	7.95±0.11e	0.33±0.06a	0.02±0.00a	0.04±0.08a	0.13±0.02ns

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มนี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p \leq 0.05$)

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

3. ปริมาณ Resistant starch

ในธรรมชาติสตาร์ชของวัตถุดิบบางชนิดมีคุณสมบัติเป็น resistant starch ดังนั้นในงานวิจัยจึงทำการตรวจสอบสมบัติ resistant starch นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบสมบัติเม็ดแป้งและสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปร เนื่องจากเมื่อผ่านกระบวนการต่างๆในการแปรรูปอาหารจะมีผลต่อการ

เกิดเจลาทีนในเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ซึ่งส่งผลต่อรูปแบบของ resistant starch แป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นการทำให้สตาร์ชเกิดเจลาทีนในเซชันและทำให้แห้ง ซึ่งกระบวนการต่างๆเหล่านี้คาดว่าจะทำให้มีปริมาณ resistant starch type III ในอาหารเพิ่มขึ้น

ปริมาณ resistant starch ของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีนในเซชันซึ่งทำการวัดโดยใช้ resistant starch assay kit ของ megazyme (ตารางที่ 5) พบว่าแป้งข้าวฟ่างเมื่อผ่านการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยจะมีปริมาณ resistant starch เพิ่มขึ้นโดยแป้งพรีเจลาทีนในเซชันมีปริมาณ resistant starch เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 5 ปริมาณ Resistant starch ของ แป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง

Sample	Resistant starch (g/100g sample)
NSF	0.11±0.00a
DSF1215	0.18±0.00c
DSF1225	0.16±0.00bc
DSF1235	0.26±0.01d
DSD1315	0.17±0.02bc
DSF1325	0.14±0.01ab
DSF1335	0.28±0.01d
SSF65	0.45±0.03f
SSF75	0.37±0.02e
SSF85	0.27±0.01d
NSS	1.58±0.01g
DSS	2.97±0.07h
SSS	3.14±0.03i

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

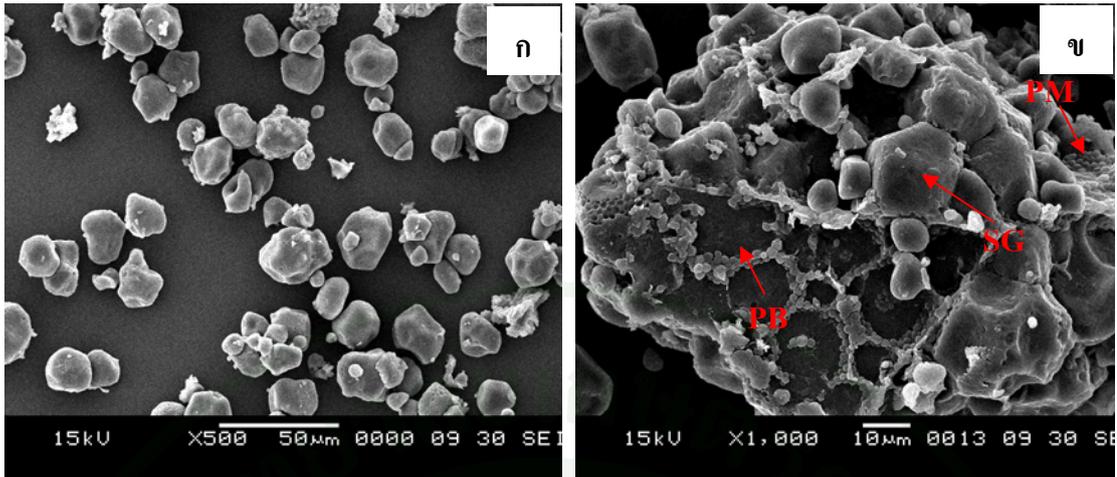
จากตารางที่ 5 พบว่า แป้ง DSF โดยใช้ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.35 เซนติเมตร ทำให้ปริมาณ resistant starch เพิ่มขึ้นมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อุณหภูมิในการตัดแปรต่างกัน พบว่ามีปริมาณ resistant starch ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับ SSF พบว่าในการตัดแปรโดยมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งที่อุณหภูมิต่างๆก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่า ความร้อนที่ระดับแตกต่างกันทำให้มีปริมาณ resistant starch แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งตัวอย่างที่มีการให้ความร้อนที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จะทำให้ปริมาณ resistant starch เพิ่มขึ้นมากที่สุด

เมื่อทำการตรวจสอบปริมาณ resistant starch ของสตาร์ชข้าวฟ่าง (ตารางที่ 5) พบว่า สตาร์ชข้าวฟ่างมีปริมาณ resistant starch สูงกว่าแป้งข้าวฟ่างทั้งนี้อาจเนื่องจากการนำตัวอย่างแป้งและสตาร์ชมาวิเคราะห์หาปริมาณ resistant starch คิดจากน้ำหนักแห้ง (dry basis) ดังนั้นในแป้งข้าวฟ่างจึงมีปริมาณสตาร์ชอยู่น้อยกว่าเพราะแป้งข้าวฟ่างยังคงมีองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่สตาร์ชอยู่ด้วย เช่น โปรตีน ไขมัน และเมื่อนำสตาร์ชข้าวฟ่างมาผ่านการตัดแปรพบว่า การตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีค่า resistant starch เพิ่มขึ้นสูงกว่าการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณ resistant starch ของสตาร์ชข้าวฟ่างมีแนวโน้มเดียวกับ การเปลี่ยนแปลงปริมาณ resistant starch ของแป้งข้าวฟ่าง

การตัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทีไนเซชันโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยทำให้ปริมาณ resistant starch เพิ่มขึ้นสูงกว่า การตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ทั้งนี้เนื่องจากการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีการอุ่นสารละลายน้ำแป้งก่อนการทำแห้ง จากนั้นจึงมีการทำแห้ง ขั้นตอนการอุ่นสารละลายน้ำแป้งอาจทำให้โมเลกุลเอมิโลส สามารถละลายออกมานอกเม็ดสตาร์ชและมีโอกาสเกิดรีโทรเกรดชันได้ หรืออาจเนื่องมาจากแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีลักษณะการเกาะกันเป็นกลุ่ม (ภาพที่ 10) จึงอาจเป็นผลให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาได้น้อยกว่า

4. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปร

จากภาพที่ 8 พบว่าเม็ดสตาร์ชมีลักษณะกลม หลายเหลี่ยม เม็ดสตาร์ชมีทั้งส่วนที่กระจายตัว และส่วนที่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน โดยส่วนที่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนจะประกอบด้วยเม็ดสตาร์ช โปรตีนบอดี (protein body) และ โปรตีนเมทริกซ์ (protein matrix) โดยโปรตีนบอดีจะฝังอยู่บนผิวของเม็ดสตาร์ช และ โปรตีนเมทริกซ์ทำหน้าที่เป็นเสมือนกาวเชื่อมให้เม็ดสตาร์ชอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (หทัยชนก, 2551)

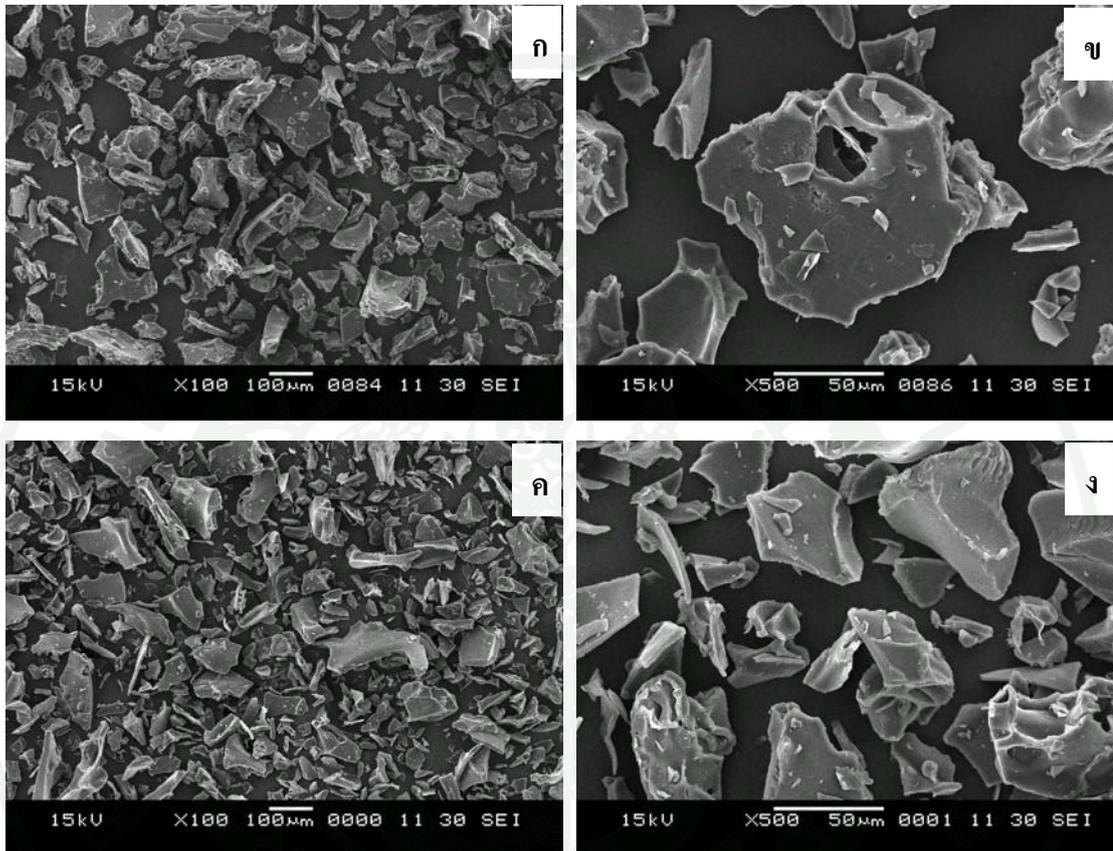


ภาพที่ 8 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งข้าวฟ่าง NSF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กำลังขยาย 500 และ (ข) 1,000 เท่า
หมายเหตุ SG คือ เม็ดสตาร์ช, PB คือ โพรตีนบอดี และ PM คือ โพรตีนเมทริกซ์

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 9 โดยแป้งที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (DSF) พบว่าขนาดของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งและการใช้อุณหภูมิที่ผิวหน้าลูกกลิ้งที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยทุกสภาวะจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ เม็ดสตาร์ชจะโดนทำลายจนหมดโดยความร้อนและแรงเฉือนจากลูกกลิ้ง ลักษณะที่ตรวจสอบได้มีลักษณะเป็นแผ่น มีรูปร่างไม่แน่นอน (ภาพที่ 9) สำหรับสตาร์ชข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (DSS) พบว่ามีลักษณะทางสัณฐานวิทยาคล้ายกับแป้งข้าวฟ่างตัดแปร คือไม่เหลือลักษณะของเม็ดสตาร์ชแต่จะปรากฏลักษณะเป็นแผ่นมีรูปร่างไม่แน่นอน

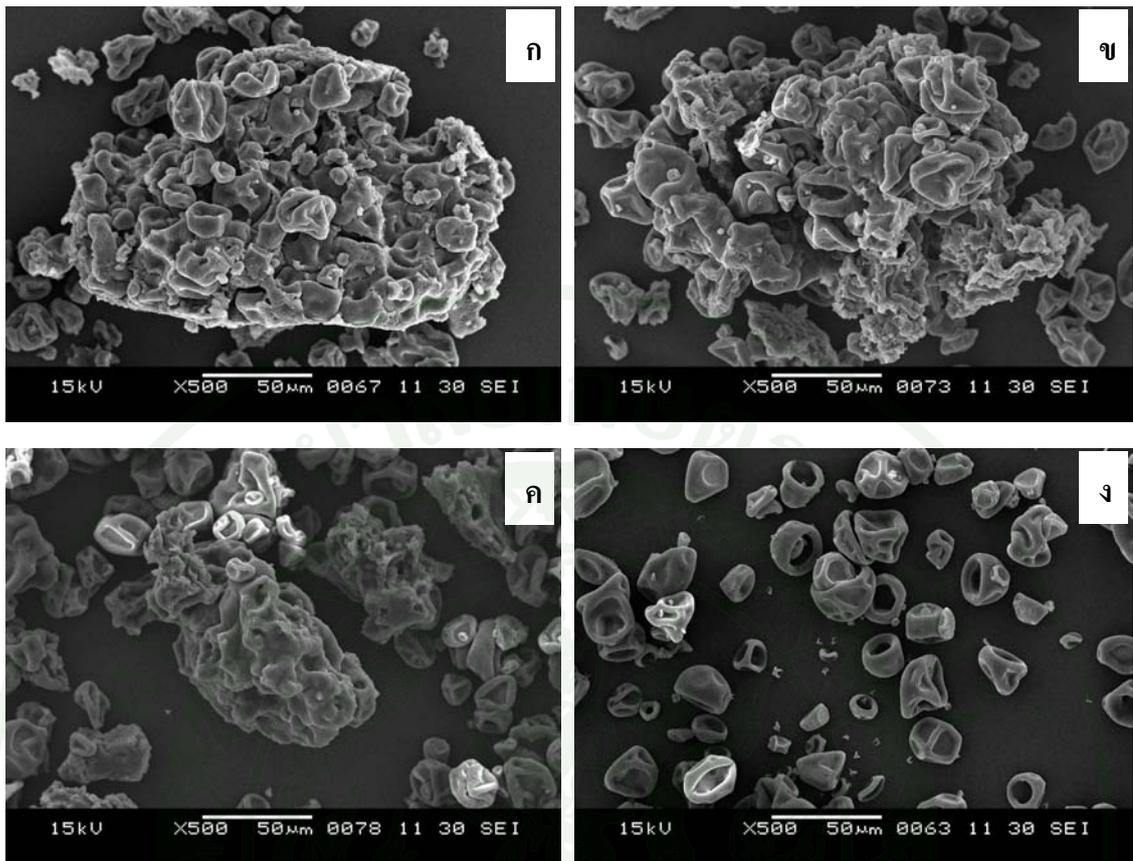
เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งข้าวฟ่างตัดแปรที่ผ่านการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยมีการอุ่นสารละลายน้ำแป้งที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 10) พบว่าแป้งที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยทั้ง 3 สภาวะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ เม็ดสตาร์ชไม่ได้โดนทำลายแต่มีลักษณะพัวตัว บิดเบี้ยว อาจเนื่องมาจากในระหว่างการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งก่อนการตัดแปร ทำให้พันธะภายในเกิดการคลายตัว เม็ดสตาร์ชสามารถดูดน้ำเข้าไปจนเกิดการพองตัว เมื่อมีการทำแห้งอย่างรวดเร็วจึงทำให้เม็ดสตาร์ชยุบตัวลง นอกจากนี้ยังมีเม็ดสตาร์ชบางส่วนที่เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มอีกด้วย โดยการที่เม็ดสตาร์ชเกาะกันเป็นกลุ่มอาจเนื่องมาจากการเกิดการเสียดสีสภาพของโปรตีนที่มีอยู่ในแป้งเนื่องจากเมื่อ

พิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (ภาพที่ 10 ง) พบว่าเม็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวไม่เกาะติดกันเป็นกลุ่ม เม็ดสตาร์ชมีลักษณะยวบตัว เช่นเดียวกับแป้งตัดแปร (ภาพที่ 10 ก-ค)



ภาพที่ 9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ DSF และ DSS ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) DSF กำลังขยาย 100 เท่า, (ข) DSF กำลังขยาย 500 เท่า, (ค) DSS กำลังขยาย 100 เท่า และ (ง) DSS กำลังขยาย 500 เท่า

หมายเหตุ อักษร DSF และ DSS คือแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชันที่ตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง



ภาพที่ 10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้ง SSF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 500 เท่า (ก) SSF65, (ข) SSF75, (ค) SSF85 และ (ง) SSS

หมายเหตุ - อักษร SSF65, SSF75 และ SSF85 คือแป้งข้าวฟ่างที่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งที่ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียสตามลำดับ ก่อนการตัดแปรแบบพรีเจลาทีไนเซชัน โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

- อักษร SSS คือ สตาร์ชข้าวฟ่างที่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ชที่ 85 องศาเซลเซียส ก่อนการตัดแปรแบบพรีเจลาทีไนเซชัน โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

5. คุณสมบัติทางด้านสีของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง

เมื่อพิจารณาสีของแป้งข้าวฟ่างหลังการตัดแปรโดยวัดค่าออกมาเป็นค่า L^* , a^* และ b^* โดยจากตารางที่ 6 พบว่า แป้งที่ผ่านวิธีการตัดแปรทั้งสองวิธีพบว่าค่า L^* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดย DSF มีค่า L^* ต่ำกว่า SSF และ NSF ตามลำดับในขณะที่ค่า a^* สูงกว่าแป้ง SSF และ NSF ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อผ่านการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทำให้แป้งมีความ

เป็นสีแดงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า b^* ของแป้งดัดแปรทั้งสองมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายหลังการดัดแปรแป้งจะมีลักษณะความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของสีนี้อาจเกิดจากการที่เมื่อแป้งข้าวฟ่างได้รับความร้อน ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) โดยน้ำตาลรีดิวซิงของสตาร์ชจะทำปฏิกิริยากับหมู่เอมิโนของโปรตีน ได้เป็นไกลโคซิลเอมิโน (N-substituted glycosylamine) และจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปจนได้สารสีน้ำตาล (นิธิยา, 2545) ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบในแป้งข้าวฟ่างมีทั้งโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต (Barikmo *et al.*, 2004)

ตารางที่ 6 คุณสมบัติด้านสีของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง

Sample	L^*	a^*	b^*
NSF	85.93±0.18h	1.93±0.05f	4.81±0.09c
DSF1215	78.19±0.49b	3.65±0.16g	6.24±0.07h
DSF1225	77.91±0.13ab	4.17±0.02h	5.59±0.15f
DSF1235	77.73±0.29a	4.11±0.06h	5.75±0.15g
DSF1315	79.38±0.21cd	4.38±0.04i	5.30±0.05d
DSF1325	79.60±0.15d	4.85±0.02j	5.61±0.04f
DSF1335	79.67±0.10d	4.30±0.05i	5.36±0.15de
SSF65	85.45±0.16g	1.05±0.06c	5.30±0.08d
SSF75	84.59±0.38f	1.35±0.08e	5.25±0.08d
SSF85	83.94±0.28e	1.27±0.03d	5.47±0.09e
NSS	91.63±0.23k	0.36±0.03a	2.42±0.03a
DSS	89.64±0.29i	0.84±0.03b	3.00±0.02b
SSS	89.99±0.07j	0.78±0.04b	3.01±0.02b

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มนี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- ค่า L^* เป็นค่าที่บอกความสว่างของตัวอย่าง ค่า a^* คือค่าที่ใช้บอกความเป็นสีแดง (+) หรือความเป็นสีเขียว (-) และ ค่า b^* คือค่าที่ใช้บอกความเป็นสีเหลือง (+) หรือความเป็นสีน้ำเงิน (-)

จากตารางที่ 6 พบว่าค่าความสว่างของสสารหลังการตัดแปรมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดย DSS มีค่าความสว่างน้อยกว่า SSS ทั้งนี้อาจเนื่องจากการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทำให้สสารสัมผัสกับความร้อนที่ผิวหน้าลูกกลิ้งโดยตรงจึงมีโอกาที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีได้มากกว่าการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย นอกจากนี้เมื่อพิจารณา ค่า a^* และ b^* พบว่า หลังการตัดแปรทั้ง 2 วิธีทำให้ค่าความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีเหลือง เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 6 พบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการตัดแปรมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสี โดยแป้งที่เตรียมจากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีมากกว่าแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

6. การละลายน้ำเย็นและการดูดซับน้ำของ แป้งและสสารข้าวฟ่าง

โดยปกติเม็ดสสารจะละลายน้ำเย็นได้ยากเนื่องจากโมเลกุลของสสารประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากที่อยู่ในรูปของร่างแหไมเซลล์ (micelles) (Whistler and BeMiller, 1999) หลังการตัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทีไนเซชัน พบว่าแป้ง DSF มีความสามารถในการละลายน้ำเย็นเพิ่มขึ้น เนื่องจากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทำให้เม็ดสสารโคนทำลายจึงทำให้สามารถละลายน้ำได้ง่ายขึ้น (Doublier *et al.*, 1986) ความสามารถในการละลายน้ำเย็นของแป้ง DSF ในทุกสภาวะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 7) เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการตัดแปร (120 และ 130 องศาเซลเซียส) ทำให้เม็ดสสารเกิดเจลาทีไนเซชันได้และเมื่อได้รับแรงเสียดทานจากลูกกลิ้งร่วมด้วยทำให้เม็ดสสารแตกออกได้หมด ในขณะที่ความสามารถในการละลายน้ำเย็นของ SSF (ตารางที่ 7) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ให้แก่สารละลายน้ำแป้งก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอย เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นสามารถทำให้พันธะภายในเม็ดสสารคลายตัวออกได้มากขึ้นความสามารถในการละลายน้ำจึงเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการละลายน้ำเย็นของแป้ง SSF ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับแป้ง NSF แต่เมื่อพิจารณาความสามารถในการละลายน้ำเย็นของสสารข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (ตารางที่ 7) ที่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งก่อนการทำแห้งอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส (SSS) พบว่า SSS มีความสามารถในการละลายน้ำเย็นเท่ากับ 18.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าความสามารถในการละลายน้ำเย็นของ SSF85 (5.91%) เนื่องจากการที่แป้งข้าวฟ่างมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งโปรตีนในข้าวฟ่างจะมีลักษณะความเป็นไฮโดรโฟบิกสูง (Emmambux *et al.*, 2004) เมื่อโดนความร้อนอาจทำให้เกิดการเสียสภาพและเกาะอยู่บริเวณผิวของ

เมล็ดสตาร์ช มีผลทำให้แป้งข้าวฟ่างมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าสตาร์ช นอกจากนี้จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งและสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (ภาพที่ 9) พบว่า แป้งตัดแปรจะมีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มซึ่งอาจเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำมีค่าต่ำกว่าสตาร์ช

ตารางที่ 7 คุณสมบัติการละลายน้ำเย็นและการดูดซับน้ำของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง

Sample	Cold water solubility (%CWS)	Water retention capacity (g water/g sample)
NSF	3.05±0.2282ab	0.0328±0.0066a
DSF1215	63.02±1.2906de	6.5784±0.0719fg
DSF1225	66.17±2.4059fg	6.5174±0.2707f
DSF1235	62.45±1.6450d	6.7630±0.0525gh
DSF1315	65.56±3.6523ef	6.5228±0.0836f
DSF1325	67.98±2.3864fg	6.6411±0.1393fg
DSF1335	68.62±1.7022g	6.9073±0.0299h
SSF65	2.19±0.6006a	2.4523±0.0613c
SSF75	3.79±0.2341ab	5.5521±0.0888d
SSF85	5.91±0.5193b	6.3090±0.1201e
NSS	1.18±0.0921a	0.6165±0.0779b
DSS	84.32±0.4374h	7.9407±0.0282i
SSS	18.50±1.2332c	6.6461±0.1940fg

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มนี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้ง คือ การที่แป้งสามารถดูดน้ำเข้าไปในโครงสร้างได้ แป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 7) สำหรับแป้ง DSF เมื่อพิจารณาผลของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งและอุณหภูมิที่ใช้ในการตัดแปรพบว่า ขนาดของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งและอุณหภูมิที่ต่างกันไม่ทำให้ความสามารถใน

การดูดซับน้ำแตกต่างกัน การตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทำให้เม็ดสตาร์ชแตกออกโดยแรงเฉือนที่ได้รับจากลูกกลิ้ง ดังนั้น โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่แตกออกมีโอกาสจับกับน้ำได้มากขึ้น (Doublier *et al.*, 1986) ความสามารถในการดูดซับน้ำจึงเพิ่มขึ้น สำหรับการตัดแปรแป้งข้าวฟ่างโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ให้แก่สารละลายน้ำแป้งก่อนทำแห้งแบบพ่นฝอย (ตารางที่ 7) เนื่องจากภายในเม็ดสตาร์ชมีส่วนของโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานและโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกโดยพันธะของสองส่วนนี้จะคลายตัวออกที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (55-75 องศาเซลเซียส) พันธะบริเวณส่วนอสัณฐานซึ่งมีความแข็งแรงต่ำกว่าอาจสามารถเกิดการคลายตัวได้ก่อน หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (85-95 องศาเซลเซียส) ส่วนของผลึกจึงจะเกิดการคลายตัว (Pomeranz, 1991)

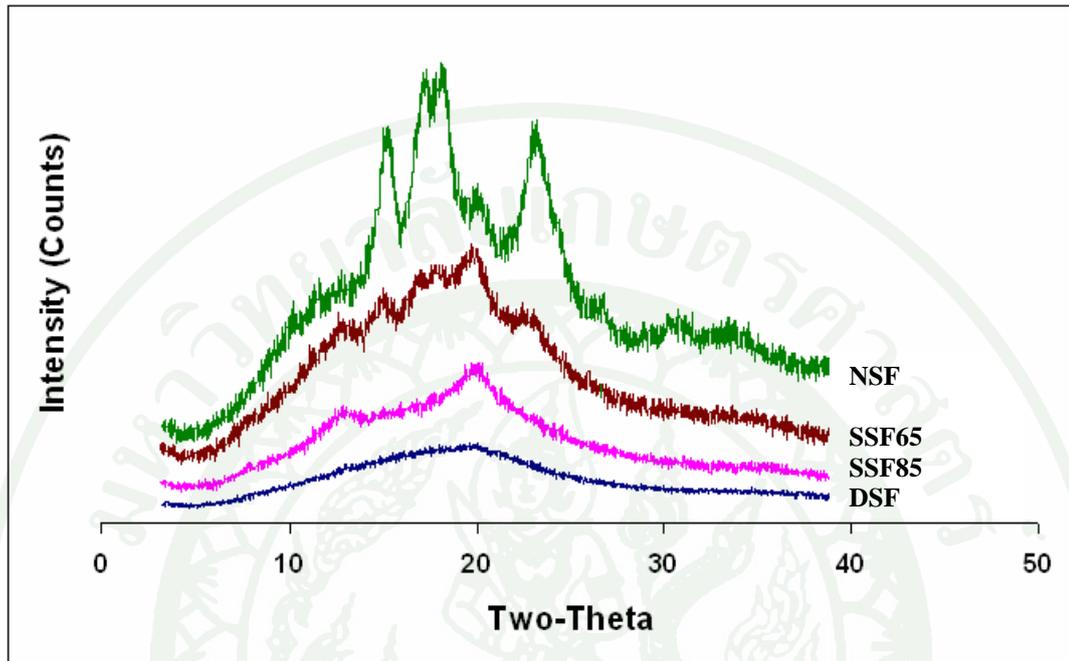
จากตารางที่ 7 เมื่อพิจารณาสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งโดยใช้ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.35 มิลลิเมตร อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 130 องศาเซลเซียส (DSS) พบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าสูงกว่า DSF1335 สำหรับสตาร์ชข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยมีการให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ชก่อนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส (SSS) มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่า SSF85 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแป้งข้าวฟ่างยังมีองค์ประกอบอื่นๆ เช่น โปรตีน ที่มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งข้าวฟ่างตัดแปรมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรที่สภาวะเดียวกัน

7. ลักษณะโครงสร้างผลึก

เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็น semi-crystalline คือ มีส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนอสัณฐาน (amorphous) ส่วนที่เป็นผลึกเกิดจากการพันธะเกลียวคู่ของสายเอมิโลเพกตินที่อยู่ใกล้เคียงกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งส่วนผลึกนี้เป็นส่วนที่ทำให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงสามารถรักษารูปร่างของเม็ดสตาร์ชไว้ได้ (Morrison *et al.*, 1994) จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของ NSF โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ พบว่า NSF ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 15.06, 17.64, 20.00 และ 23.42° ที่มุม 2 θ ซึ่งพีคที่ปรากฏมีความใกล้เคียงกับลักษณะความเป็นผลึกแบบ A-type ซึ่งจะให้พีคที่ 15.15, 17, 17.9 และ 23° ที่มุม 2 θ (Kawabata *et al.*, 1994) ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งจากธัญพืช

สำหรับการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทีนในเซชัน โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งพบว่าไม่พบพีค (ภาพที่ 11) เนื่องจากการตัดแปรโดย

เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดเงาที่ในเซชัน ทำให้โครงสร้างส่วนที่เป็นระเบียบของเม็ดสตาร์ชโดนทำลาย



ภาพที่ 11 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวฟ่าง (NSF) แป้งข้าวฟ่างดัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SSF65 และ SSF85) และแบบเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (DSF)
 หมายเหตุ อักษร DSF คือ แป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการดัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 130 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.35 มิลลิเมตร

เมื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการดัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SSF65 และ SSF85) แป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการดัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งก่อนการผลิตที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส (SSF65) พบพีคที่ 15.06, 17.64, 20.00 และ 23.42° ที่มุม 2 θ คล้ายกับแป้งข้าวฟ่างธรรมชาติแต่มีความเข้มลดลง ในขณะที่แป้งข้าวฟ่างที่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งก่อนการผลิตที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส (SSF85) พบว่าพีคที่ 15.06, 17.64 และ 23.42° ที่มุม 2 θ หายไป อย่งไรก็ตามแป้งดัดแปรทั้ง SSF65 และ SSF85 ได้แสดงพีคที่ 13.00 และ 20.00° ที่มุม 2 θ (ภาพที่ 11) ซึ่งคาดว่าอาจจะเป็นผลจากการเกิดการจับกันของโมเลกุลแอมิโลสกับโมเลกุลไขมันที่มีอยู่โดยลักษณะความเป็นผลึกของการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโมเลกุลของแอมิโลส และไขมัน (Amylose-

Lipid complexes) ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนนี้จะมีลักษณะความเป็นผลึกแบบ V-type ซึ่งมีพีคหลักที่ 7, 13.3 และ 19.8 ที่มุม 2θ (Godet *et al.*, 1993)

ตารางที่ 8 ร้อยละความเป็นผลึกของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปร

Sample	%crystallinity
NSF	20.84
DSF	nd
SSF65	4.60
SSF85	2.41

หมายเหตุ nd (not detect): ไม่สามารถพบลักษณะความเป็นผลึก

เมื่อตรวจสอบร้อยละความเป็นผลึกของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปร (ตารางที่ 8) พบว่า แป้งข้าวฟ่างตัดแปรทั้ง 2 วิธี มีร้อยละความเป็นผลึกลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการตัดแปรดังที่กล่าวมาแล้ว

8. สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชัน

การศึกษาอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน โดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ที่มีหลักการในการใช้พลังงานในการสลายพันธะภายในโมเลกุลและวัดการเปลี่ยนแปลง โดยพิจารณาจากอุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (onset temperature; T_o) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (peak temperature; T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (conclusion temperature; T_c) และค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (gelatinization enthalpy; ΔH (J/g)) โดยค่า T_o - T_p - T_c สามารถบอกถึงช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชันได้

จากตารางที่ 9 พบว่า NSF มีช่วงอุณหภูมิเจลลิตินในเซชัน 67.93-71.32-75.98 องศาเซลเซียส มีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชัน 9.63 จูลต่อกรัม สำหรับแป้ง DSF ไม่สามารถตรวจพบช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชถูกทำลายไปใน

ระหว่างกระบวนการตัดแปรโดยความร้อนและแรงเฉือนจากลูกกลิ้ง สอดคล้องกับการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึก แสดงในภาพที่ 11 และตารางที่ 8 ซึ่งพบว่า DSF ไม่สามารถตรวจพบลักษณะโครงสร้างผลึก เมื่อทำการศึกษาอุณหภูมิการเกิดเจลาทีโนเซชันของแป้ง SSF พบว่าแป้ง SSF65, SSF75 และ SSF85 มีช่วงอุณหภูมิเจลาทีโนเซชันสูงกว่า NSF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาทีโนเซชันพบว่ามีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาทีโนเซชันของ NSF ($p \leq 0.05$) เนื่องจากเมื่อผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยแล้ว จะทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเกาะกลุ่มกันดังภาพที่ 10 ก-ค ดังนั้นจึงอาจทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่เนื่องจากแป้ง SSF ได้ผ่านความร้อนมาแล้วในระหว่างกระบวนการตัดแปรจึงทำให้โครงสร้างผลึกบางส่วน ได้ถูกทำลายไปแล้ว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกในภาพที่ 11 และตารางที่ 8 จึงทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกมีค่าต่ำกว่า NSF นอกจากนี้การที่ SSF มีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาทีโนเซชันสูงกว่า NSF อาจเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบอื่นที่มีในแป้ง ซึ่งจากการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกในภาพที่ 11 และปริมาณไขมันในตารางที่ 4 พบว่า SSF จะมีปริมาณไขมันต่ำกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปร อีกทั้ง SSF แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V-type ดังนั้นการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยอาจทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโมเลกุลของแอมิโลส และไขมัน (Amylose-Lipid complexes) ได้

จากตารางที่ 9 การศึกษาอุณหภูมิการเกิดเจลาทีโนเซชันของสตาร์ช (NSS) พบว่ามีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาทีโนเซชัน 69.91-72.15-76.27 องศาเซลเซียส มีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาทีโนเซชัน 12.32 จูลต่อกรัม ซึ่งพบว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาทีโนเซชันและค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาทีโนเซชันของ NSS มีค่าสูงกว่า NSF การที่ค่าพลังงานในการเกิดเจลาทีโนเซชันของ NSS สูงกว่า NSF ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาทีโนเซชันจะคิดเป็นหน่วยจูลต่อหนึ่งกรัมน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ไม่ได้คิดในฐานน้ำหนักแห้งของสตาร์ช ซึ่ง NSS มีปริมาณของสตาร์ช มากกว่า จึงมีค่าพลังงานในการเกิดเจลาทีโนเซชันสูงกว่า

ตารางที่ 9 ช่วงอุณหภูมิเจลลาทีในเซชันและเอนทัลปีของการเกิดเจลลาทีในเซชันของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปร

Sample	To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	ΔH (J/g)
NSF	67.93±0.12a	71.32±0.12a	75.98±0.22a	9.63±0.16b
SSF65	73.84±0.41b	76.49±0.59b	80.08±0.55b	2.67±0.08a
SSF75	88.08±3.33d	99.39±2.59c	107.42±1.51c	3.09±1.15a
SSF85	81.91±3.66c	98.93±1.82c	107.89±0.93c	3.02±2.45a
NSS	69.91±0.19ab	72.15±0.35a	76.27±0.51a	12.32±0.57c

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- DSF1215, DSF1225, DSF1235, DSF1315, DSF1325, DSF1335, SSS และ DSS ตรวจไม่พบช่วงอุณหภูมิและเอนทัลปีของการเกิดเจลลาทีในเซชัน

9. สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน

การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นกระบวนการที่เกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลสตาร์ช (แอมิโลส และ แอมิโลเพกติน) ภายหลังจากเกิดเจลลาทีในเซชันและอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำซึ่งจากการศึกษาของ Goodfellow and Wilson (1990) พบว่าหลังการเกิดเจลลาทีในเซชัน โมเลกุลแอมิโลสสามารถเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ได้เร็วกว่าการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกติน โดยสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันสามารถตรวจสอบได้โดยเครื่อง DSC

จากการศึกษาสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 1 วัน ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ระยะเวลาสั้นมักเกิดจากการจัดเรียงตัวกันของโมเลกุลแอมิโลส (Biliaderis and Zawistowski, 1990) พบว่า NSF มีช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชัน 48.08-60.07 องศาเซลเซียส มีค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึก 0.91 จูลต่อกรัม ในขณะที่ NSS มีช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชัน 44.51-62.36 องศาเซลเซียส มีค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึก 2.09 จูลต่อกรัม ซึ่งพบว่าพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิด

จากการจัดเรียงตัวกันใหม่หลังการเกิดเจลาทีโนเซชันของ NSS มีค่าสูงกว่า NSF ทั้งนี้เนื่องจาก NSS มีปริมาณสตาร์ชมากกว่าจึงทำให้มีค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกที่สูงกว่า

จากตารางที่ 10 สำหรับแป้ง DSF พบว่าการใช้ อุณหภูมิและช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งในการตัดแปรที่ต่างกันไม่มีผลทำให้ช่วงอุณหภูมิโทรเกรเดชันเกิดความแตกต่างกัน แต่เมื่อช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นทำให้พลังงานที่ใช้สลายโครงสร้างผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น โดยช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งขนาด 0.35 มิลลิเมตร มีค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกมีสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชันของ DSF และ DSS พบว่า DSS มีพลังงานที่ใช้สลายโครงสร้างผลึกที่สูงกว่า

สำหรับ SSF เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย DSC (ตารางที่ 10) พบว่าปรากฏพีค 2 พีค (ภาคผนวก ก1) โดยพีคที่ 1 จะพบอยู่ในช่วงเดียวกับอุณหภูมิโทรเกรเดชันของ NSF และ DSF สำหรับพีคที่ 2 พบที่อุณหภูมิสูงและมีพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างสูงกว่าพีคที่ 1 ซึ่งช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชันของพีคที่ 2 มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเกิดเจลาทีโนเซชันของแป้งที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย(ตารางที่ 9) ซึ่งการตรวจพบช่วงอุณหภูมิโทรเกรเดชันที่ 1 (พีคที่ 1) อาจเกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลสตาร์ช และ ช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ 2 (พีคที่ 2) อาจเนื่องมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนขององค์ประกอบอื่นๆที่มีในแป้งข้าวฟ่าง หรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากการที่เมล็ดสตาร์ชที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการตัดแปรไม่สามารถเกิดเจลาทีโนเซชันได้หมด ในการวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลาทีโนเซชัน จึงทำให้ยังคงเหลือเมล็ดสตาร์ชกลุ่มนี้อยู่ในตัวอย่างเมื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันจึงทำให้ปรากฏเป็นพีคที่ 2 ขึ้น ในขณะที่สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของ SSS ปรากฏช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชันเพียงช่วงเดียว โดยมีค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึก สูงกว่า SSF85

สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 14 วัน แสดงดังตารางที่ 11 พบว่าพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกของทุกตัวอย่างมีค่าสูงกว่าพลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกที่เก็บรักษาตัวอย่างระยะเวลา 1 วัน เนื่องจากเมื่อระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างนานขึ้นทำให้โมเลกุลเอมิโลเพกตินสามารถเกิดการจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกใหม่อีกครั้ง (Vodovotz and Chinachoti, 1998) ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกที่แข็งแรงขึ้น (Sievert and Würsch, 1993)

ตารางที่ 10 ช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทเกรเดชันของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปรเมื่อเก็บรักษาไว้ 1 วัน

Sample	Peak 1				Peak 2			
	To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	ΔH	To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	ΔH
NSF	48.08±0.00e	54.84±0.11e	60.07±0.46a	0.91±0.14a	-	-	-	-
DSF1215	44.78±1.20c	53.73±0.48bcd	60.93±0.54ab	1.51±0.06b	-	-	-	-
DSF1225	44.91±0.09c	53.58±0.00bc	61.29±0.44ab	2.05±0.09cd	-	-	-	-
DSF1235	45.05±0.36c	53.58±0.00bc	61.28±0.47ab	2.64±0.08e	-	-	-	-
DSF1315	43.57±0.30b	53.23±0.49b	60.38±0.17a	1.64±0.03bc	-	-	-	-
DSF1325	45.32±0.20cd	53.66±0.36bc	61.68±1.02ab	1.88±0.09bc	-	-	-	-
DSF1335	44.93±0.19c	53.58±0.00bc	61.37±0.77ab	2.51±0.35de	-	-	-	-
SSF65	46.47±0.46d	54.24±0.00cde	61.33±0.26ab	1.36±0.19ab	89.97±1.17b	99.14±0.12c	105.47±0.92a	1.64±0.55a
SSF75	45.42±1.01cd	54.24±0.00cde	61.10±0.39ab	1.51±0.32b	80.35±1.21a	98.56±0.01b	106.15±0.41a	2.99±0.62a
SSF85	45.32±0.11cd	54.41±0.00cde	61.65±0.10ab	2.46±0.03de	88.49±0.71b	97.73±0.23a	105.67±0.25a	2.68±0.67a
NSS	44.51±0.51bc	54.49±0.58cde	62.36±0.47b	2.09±0.14cd	-	-	-	-
DSS	41.55±0.02a	52.06±0.96a	61.76±0.79ab	3.40±0.54f	-	-	-	-
SSS	45.60±0.23cd	54.66±0.59de	64.39±1.87c	3.32±1.87f	-	-	-	-

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มนี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

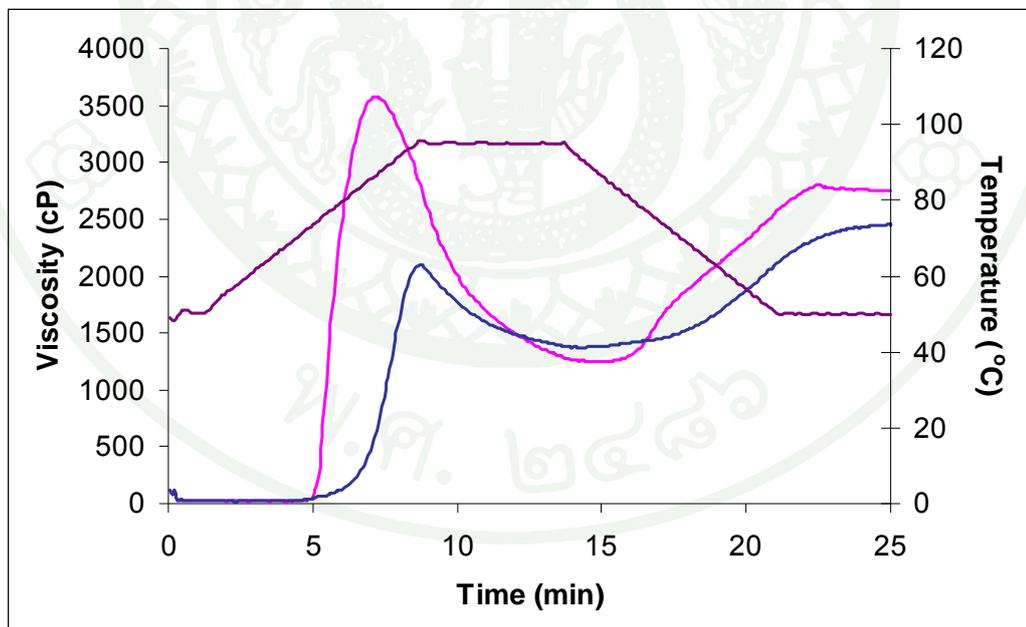
ตารางที่ 11 ช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปรเมื่อเก็บรักษาไว้ 14 วัน

Sample	Peak 1				Peak 2			
	To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	ΔH	To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	ΔH
NSF	42.90±0.05bc	51.83±0.35bc	60.74±0.55abcd	3.86±0.36bcde	-	-	-	-
DSF1215	43.46±0.11c	51.15±0.34ab	58.79±1.25ab	1.92±0.66a	-	-	-	-
DSF1225	42.58±0.01bc	50.91±0.71ab	60.78±1.01abcd	3.67±0.40bc	-	-	-	-
DSF1235	43.27±0.23bc	51.41±0.00ab	60.38±0.88abc	3.59±0.21b	-	-	-	-
DSF1315	42.89±0.75bc	50.65±1.07a	59.64±0.07ab	2.37±0.20a	-	-	-	-
DSF1325	42.77±0.43bc	50.83±0.12ab	60.56±0.93abcd	3.50±0.71bc	-	-	-	-
DSF1335	42.83±0.39bc	51.66±0.36abc	60.27±0.19abc	3.75±0.34bcd	-	-	-	-
SSF65	45.46±0.11d	53.57±0.00e	61.72±0.06bcd	4.56±0.15de	81.13±0.54a	98.23±0.47b	105.72±0.07a	2.54±0.13a
SSF75	43.31±0.51bc	53.08±0.00de	61.38±0.12bcd	4.07±0.02bcde	80.91±1.34a	96.82±0.59a	106.18±1.58a	1.78±0.70a
SSF85	44.05±0.06c	53.58±0.00e	61.65±0.13bcd	4.50±0.08bcde	91.25±0.15b	99.05±0.00b	106.68±0.21a	1.72±0.11a
NSS	42.46±0.53b	51.82±0.10bc	61.31±0.64bcd	4.04±0.12bcde	-	-	-	-
DSS	41.38±0.42a	51.06±0.46ab	62.65±1.62cd	5.70±0.30f	-	-	-	-
SSS	43.34±0.58bc	52.41±0.24cd	62.88±2.15d	4.67±0.35e	-	-	-	-

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มนี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

10. สมบัติด้านความหนืด

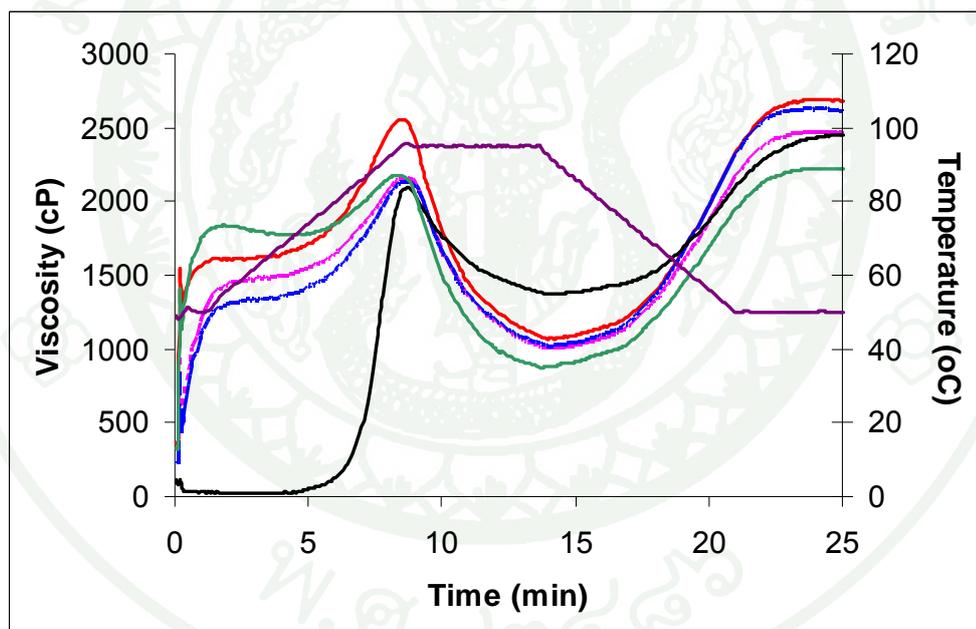
สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชในสถานะที่มีน้ำมากและมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยการให้ความร้อนและทำให้เย็นซึ่งสมบัติด้านความหนืดที่วัดได้สามารถบ่งบอกถึงสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูป การศึกษาสมบัติด้านความหนืดสามารถศึกษาด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid viscosity analyzer: RVA) ซึ่งสามารถแบ่งการให้ความร้อนกับตัวอย่างออกเป็น 3 ช่วง คือช่วงให้ความร้อนกับตัวอย่างจาก 50-95 องศาเซลเซียส ช่วงคงอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส และช่วงการลดอุณหภูมิตัวอย่างลงจาก 95-50 องศาเซลเซียส โดยการวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดจะถูกแสดงผลออกมาเป็นกราฟและค่าที่เกี่ยวข้องกับสมบัติด้านความหนืด ได้แก่ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Trough) ความแตกต่างของความหนืดต่ำสุดและความหนืดสูงสุดหรือค่าเบรกดาวน์ (Breakdown) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดหรือค่าเซตแบค (Setback from trough) (Newport Scientific, 1995)



ภาพที่ 12 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง (NSF) และสตาร์ชข้าวฟ่าง (NSS)

หมายเหตุ ตัวอย่าง NSF (—), NSS (—)

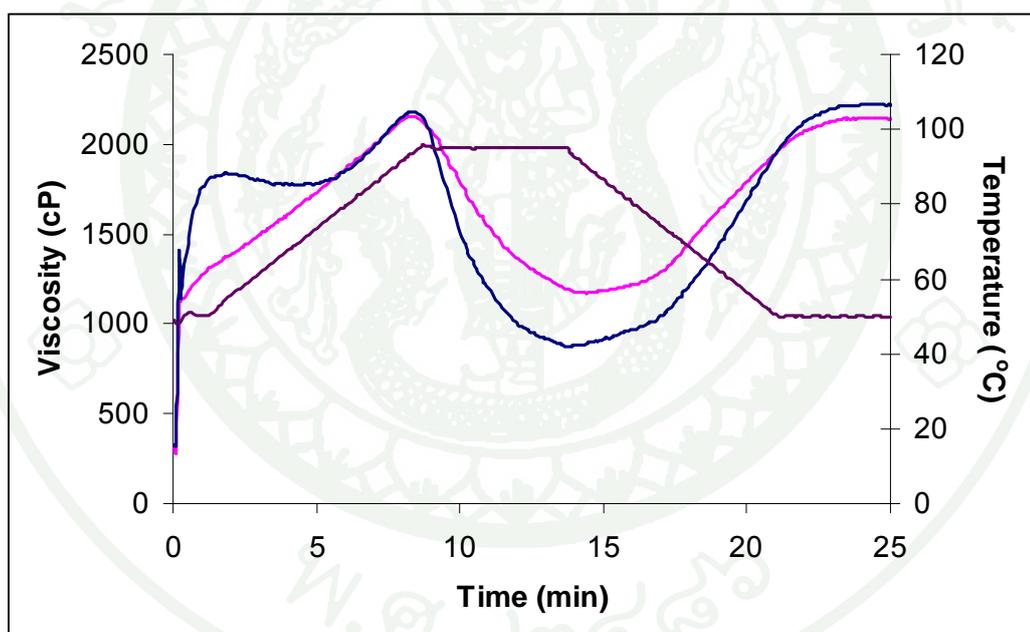
จากภาพที่ 12 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่าง ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งในการนำสตาร์ชและแป้งไปใช้ประโยชน์ จากผลการทดลองพบว่า NSS มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความร้อนต่ำกว่า NSF ในขณะที่ความหนืดสูงสุด และค่าเบรกดาวน์สูงกว่า NSF ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่า NSS สามารถเกิดการพองตัวและเกิดเจลลาทีโนเซชันได้เร็วกว่า และสามารถพองตัวได้มากกว่า NSF ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแป้งมีองค์ประกอบของโปรตีนไขมัน เต้า และเส้นใยหยาบสูงกว่าสตาร์ช ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อสมบัติทางความหนืดของสตาร์ช โดยเฉพาะโปรตีนและไขมันที่มีผลในการยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช และเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ช (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2546; Kim and Seib, 1993) แต่จากค่าเบรกดาวน์พบว่าเม็ดสตาร์ชที่พองตัวของ NSS มีความอ่อนแอสามารถโดนทำลายได้ง่ายกว่าเม็ดสตาร์ชของ NSF จากค่าความหนืดสุดท้ายและค่าเซตแบค พบว่า NSF มีความสามารถในการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทินต่ำกว่า NSS



ภาพที่ 13 สมบัติด้านความหนืดของแป้งและแป้งข้าวฟ่างพรีเจลลาทีโนเซชันตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

หมายเหตุ ตัวอย่าง NSF (—), DSF1215 (—), DSF1225 (—), DSF1235 (—), DSF1335 (—)

จากภาพที่ 13 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยพบว่า DSF สามารถให้ความหนืดได้ทันที (initial viscosity) ทั้งนี้เนื่องจากหลังการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำ เย็นและการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการให้ความร้อนและแรงเฉือนต่อไป DSF จะมีความหนืด เพิ่มขึ้นอีกในพีค 2 (viscosity peak 2) เมื่อพิจารณาผลของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งพบว่า การตัดแปร โดยใช้ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 มิลลิเมตร (DSF1215) มีความหนืดเริ่มต้นและความหนืดในพีค 2 สูงกว่าการตัดแปรโดยใช้ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.25 และ 0.35 มิลลิเมตร (DSF1225 และ DSF1235) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก การตัดแปร โดยใช้ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งที่มีขนาดแคบจะ ทำให้แรงเฉือนจากลูกกลิ้งมีโอกากระง่ำต่อเม็ดสตาร์ชได้มากกว่า ทำให้แป้งตัดแปรมีความ แข็งแรงของโครงสร้างน้อย เมื่อมีการให้ความร้อนทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ มากกว่า



ภาพที่ 14 สมบัติด้านความหนืดของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชันตัดแปร โดย เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

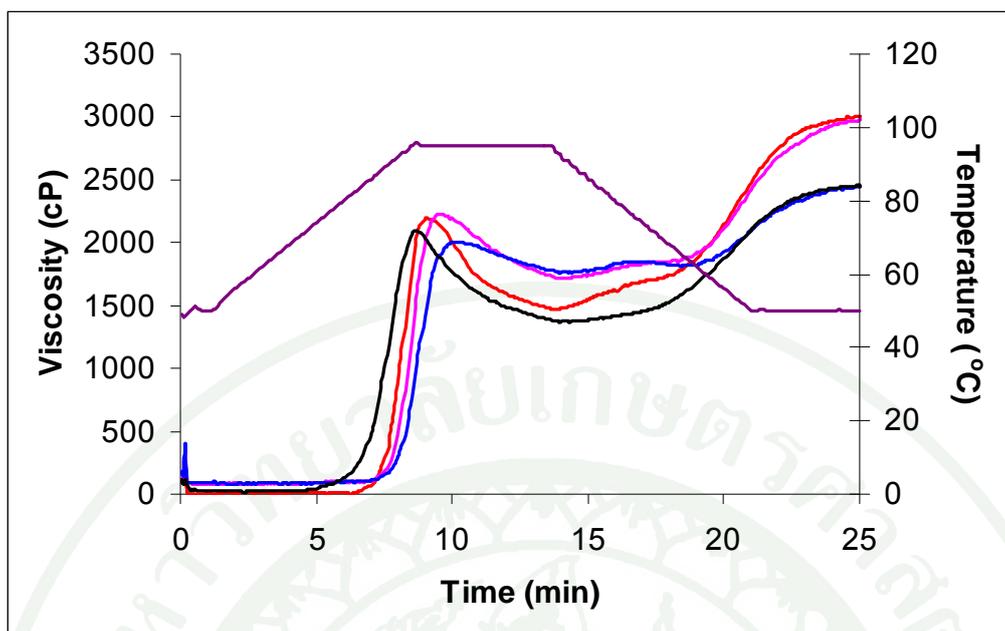
หมายเหตุ - ตัวอย่าง DSF1335 (—), DSS (—)

- อักษร DSS คือ สตาร์ชข้าวฟ่างที่ตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง อุณหภูมิผิวหน้า ลูกกลิ้ง 130 ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.35 มิลลิเมตร

สำหรับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างที่ทำการตัดแปรโดยใช้ อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 130 องศาเซลเซียส พบว่าผลของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงความหนืดในลักษณะเดียวกับการตัดแปร โดยใช้อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 120 องศา เซลเซียส เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการตัดแปร พบว่า การตัดแปร โดยใช้อุณหภูมิผิวหน้า ลูกกลิ้ง 130 องศาเซลเซียส (DSF1335) มีค่าความหนืดเริ่มต้นสูงกว่าการตัดแปรโดยใช้อุณหภูมิ ผิวหน้าลูกกลิ้ง 120 องศาเซลเซียส (DSF1235) (ภาพที่ 13) ในขณะที่ค่าเซตแบคมีค่าต่ำกว่า

แป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่สภาวะเดียวกัน จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดแสดงดังภาพที่ 14 โดยแป้งและสตาร์ชพรีเจลาทีไนเซชันจะ สามารถให้ความหนืดได้ทันที แต่พบว่า DSF1335 จะให้ความหนืดเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ในขณะที่ DSS จะมีลักษณะการเกิดความหนืดที่ช้ากว่า และ DSF1335 มีค่าเบรกควาน์และค่าเซต-แบคสูงกว่า DSS จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของ DSF1335 และ DSS พบว่าจะมีลักษณะ การเปลี่ยนแปลงความหนืดที่ต่างกัน ดังนั้นความหนืดที่เกิดขึ้นของ DSF1335 น่าจะมีผลมาจาก องค์ประกอบอื่นที่มีในแป้งร่วมด้วย เช่น อาจเป็นผลมาจากโปรตีนที่มีอยู่ในแป้ง

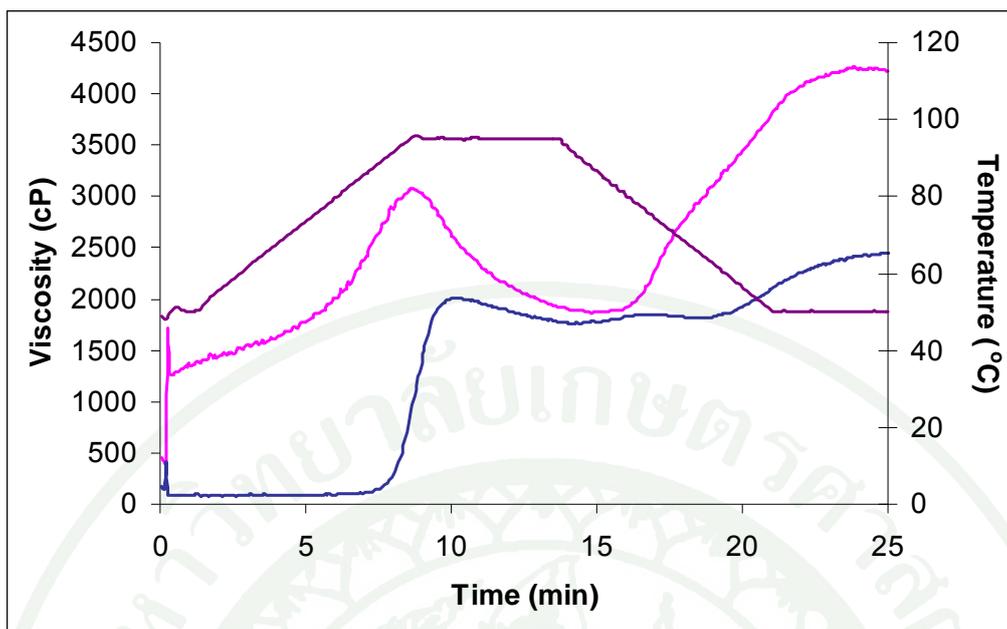
จากภาพที่ 15 พบว่าแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยจะมี อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงกว่า NSF เมื่อพิจารณาผลของการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง โดยใช้อุณหภูมิต่างกัน 3 ระดับพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ให้แก่สารละลายน้ำแป้งอุณหภูมิเริ่มเกิด ความหนืดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าเบรกควาน์และค่าเซตแบคมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการ ให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งทำให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชและองค์ประกอบอื่นๆในแป้ง ข้าวฟ่างเกิดการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งเมื่อผ่านการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยจะทำให้เกิด การเกาะกลุ่มกันของเม็ดสตาร์ช ซึ่งอาจมีผลทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการทำให้เม็ดสตาร์ช เหล่านั้นเกิดการพองตัว เกิดความหนืด และเม็ดสตาร์ชที่เกาะกลุ่มกันอาจมีความแข็งแรงมากกว่า เม็ดสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร



ภาพที่ 15 สมบัติด้านความหนืดของแป้งและแป้งข้าวฟ่างพรีเจลลาคีโนเซชันคัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

หมายเหตุ NSF (—), SSF65 (—), SSF75 (—), SSF85 (—)

เมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างที่ผ่านการคัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะเดียวกัน (ภาพที่ 16) พบว่า SSS สามารถให้ความหนืดได้ทันที และเมื่อมีการให้ความร้อนต่อไปพบว่าจะให้ความหนืดเพิ่มขึ้นในฟิสิกส์ 2 อีกทั้งมีค่าเบรคดาวน์ ค่าความหนืดสุดท้ายและค่าเซตแบคสูงกว่า SSF85 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบอื่นๆที่มีในแป้งข้าวฟ่างทำให้ ความสามารถในการดูดซับน้ำ การละลาย และการพองตัวเม็ดสตาร์ช มีค่าต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่ายังมีผลต่อความสามารถในการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกตินหลังผ่านการให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวลง



ภาพที่ 16 สมบัติด้านความหนืดของแป้งและสตาร์ชข้าวฟ่างพรีเจลลาคีในเซชันที่ตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

หมายเหตุ - ตัวอย่าง SSF85 (—), SSS (—)

- อักษร SSS คือ สตาร์ชข้าวฟ่างที่ตัดแปรโยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยมีการให้ความร้อนสารละลายน้ำแป้งก่อนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

การนำแป้งและสตาร์ชมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่างๆมักมีน้ำตาลและเกลือเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย อีกทั้งน้ำตาลและเกลือนั้นยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความหนืด ดังนั้นการศึกษาถึงผลของน้ำตาลและเกลือจึงมีความสำคัญต่อการนำแป้งและสตาร์ชไปใช้พัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ

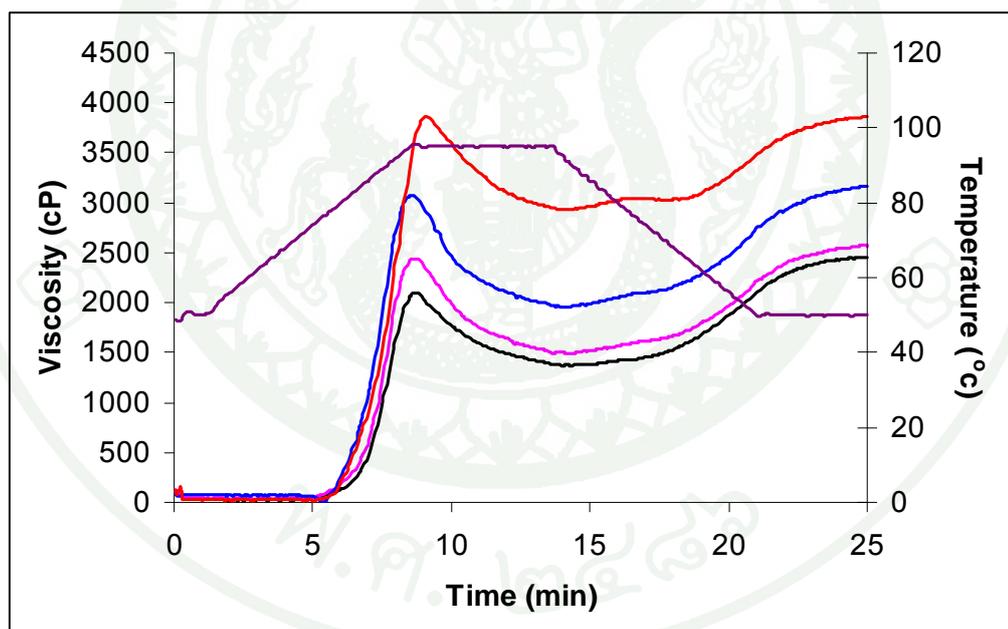
11. ผลของซูโครสต่อสมบัติด้านความหนืด

11.1 ผลของซูโครสต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง (NSF)

เมื่อพิจารณาผลของซูโครสต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง (NSF) โดยทำการพิจารณาในระบบที่มีการเติมซูโครส 0, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 17 พบว่าเมื่อมีการ

เติมซูโครสลงในระบบทำให้ความหนืดโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซูโครสทำให้ค่าความหนืดรวมของระบบเพิ่มสูงขึ้นด้วย (ภาพที่ 17)

จากภาพที่ 17 พบว่า เมื่อมีซูโครสในระบบเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนืดสูงสุด ค่าเบรคควาน์ และค่าความหนืดสุดท้าย ของ NSF มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมซูโครสทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถพองตัวได้มากขึ้น แต่เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากซูโครสที่เติมลงไปในระบบอาจมีผลต่อโปรตีนที่มีอยู่ในแป้งข้าวฟ่าง จึงทำให้ NSF ที่มีการเติมซูโครส มีค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อมีการเติมซูโครสลงไปทำให้ปริมาณของแข็งในระบบเพิ่มขึ้น และซูโครสสามารถให้ความหนืดได้จึงอาจมีผลต่อความหนืดรวมของระบบ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าเบรคควาน์พบว่าค่าเบรคควาน์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมซูโครส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชของ NSF มีความสามารถในการทนต่อความร้อนและแรงเฉือนลดลง



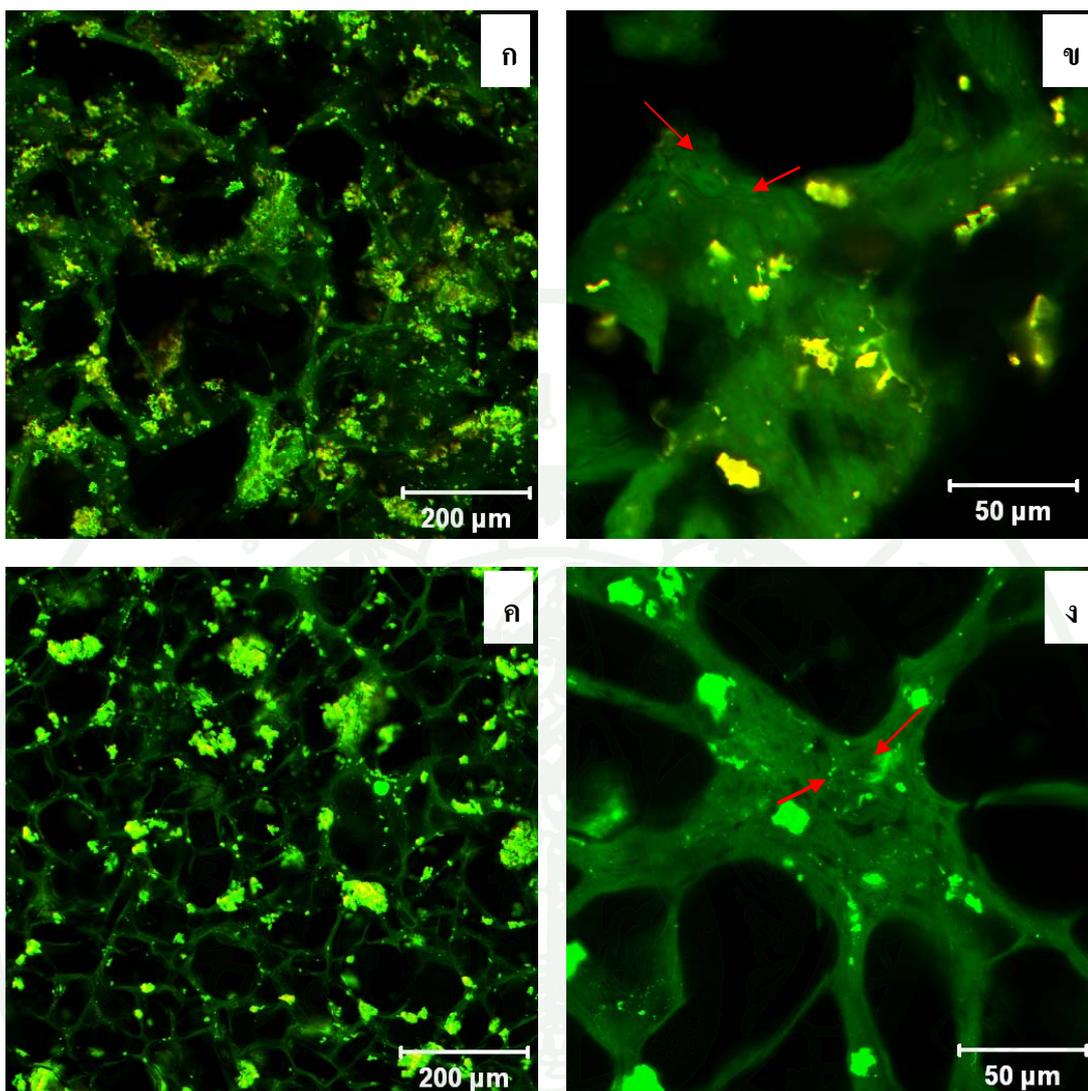
ภาพที่ 17 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง (NSF) เมื่อเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน
หมายเหตุ ความเข้มข้นของซูโครส 0% (—), 5% (—), 10% (—) และ 20% (—)

เมื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเจล NSF ในระบบที่ไม่มีการเติมซูโครสและมีการเติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 18) โดยเตรียมเจลความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเครื่องวัด

ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyser; RVA) จากนั้นนำมาเชื่อมด้วยสี fluorescein-5-isothiocyanate (FITC) ซึ่งใช้เชื่อมส่วนที่เป็นสตาร์ช โดยจะเชื่อมส่วนของสตาร์ชติดสีเขียว และ โรดามีน บี (Rhodamine B) เพื่อเชื่อมส่วนโปรตีน โดยจะเชื่อมส่วนของโปรตีนติดสีแดง จากนั้นนำมาศึกษาด้วยกล้องคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง จากภาพที่ 18 พบว่า เมื่อมีการเติมซูโครสลงในระบบทำให้เจลมีลักษณะ โครงสร้างร่างแหที่มีความสม่ำเสมอ ส่วนของโปรตีนที่มีการจับกันเป็นกลุ่มขนาดเล็กกระจายตัวอยู่นอกโครงสร้างของเจล โดยโปรตีนในภาพที่ 18 จะปรากฏเป็นสีเหลือง ซึ่งเกิดเนื่องจากการติดสีร่วมกันระหว่าง FITC และ Rhodamine B ในขณะที่โครงสร้างของเจล NSF เมื่อทำการเตรียมในระบบที่ไม่มีการเติมซูโครส (ภาพที่ 18) มีลักษณะโครงสร้างแบบร่างแห แต่ไม่มีความสม่ำเสมอของร่างแห การเติมซูโครสลงไปในระบบจะทำให้การจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลเอมิโลสเกิดซ้ำลง ทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแหที่มีขนาดของช่องว่างระหว่างร่างแหที่มีขนาดเล็ก (Arunyanart and Charoenrein, 2008) มีกลุ่มของโปรตีนขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ในบริเวณโครงสร้างของเจล และเมื่อทำการศึกษาโครงสร้างของเจล NSF ในระบบที่ไม่มีการเติมซูโครสและระบบที่มีการเติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 18) เมื่อกำลังขยายสูงขึ้น พบว่ายังคงมีเม็ดสตาร์ชอยู่ภายใน โครงสร้างร่างแห (บริเวณลูกศรชี้)

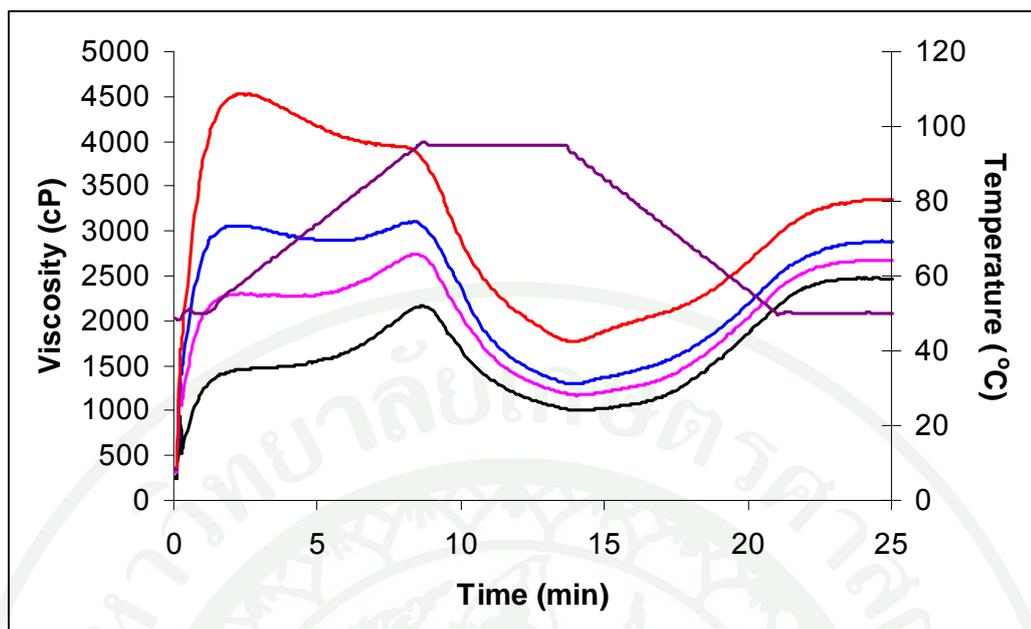
11.2 ผลของซูโครสต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (DSF)

เมื่อทำการตัดแปรแป้งข้าวฟ่างโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง อุณหภูมิพินหน้าลูกกลิ้ง 120 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15, 0.25 และ 0.35 มิลลิเมตร (DSF1215, DSF1225 และ DSF1235) จะทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันและโดนทำลายโครงสร้าง ทำให้มีความสามารถในการละลายน้ำเย็นและการดูดซับน้ำได้สูง เมื่อนำมาศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดในระบบที่มีการเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความหนืดดังภาพที่ 19 คือ เมื่อปริมาณซูโครสในระบบเพิ่มขึ้นความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 18 ลักษณะของโครงสร้างเจลแข็งข้าวฟ่าง (NSF) ในระบบที่มีชูโครส 0 เปอร์เซ็นต์และระบบ ที่มีชูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้กล้องคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง ก และ ข คือ ตัวอย่าง NSF; ค และ ง คือ ตัวอย่าง NSF ที่มีการเติมชูโครส 20%

หมายเหตุ สีเขียวคือสตาร์ชที่เชื่อมด้วย FITC
 สีแดงและเหลืองคือ โปรตีนที่เชื่อมด้วยโรดามิน บี
 ตำแหน่งที่ถูกครีซคือเม็ดสตาร์ช



ภาพที่ 19 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีไนเซชัน คัดแปร โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 120 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.35 มิลลิเมตร (DSF1235) เมื่อเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน

หมายเหตุ ความเข้มข้นของซูโครส 0% (—), 5% (—), 10% (—) และ 20% (—)

จากภาพที่ 19 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืดของแป้ง DSF1235 พบว่าสามารถให้ความหนืดได้ทันที (ความหนืดเริ่มต้น) แต่เมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องพบว่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งในพีคที่ 2 (peak 2) และเมื่อมีการเติมซูโครสพบว่า ความหนืดเริ่มต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มขึ้น แต่ยังปรากฏพีคที่ 2 อยู่ (ภาพที่ 19) โดยพบว่าแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการคัดแปรที่ระดับลูกกลิ้งต่างกัน (DSF1215, DSF1225 และ DSF1235) มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดคล้ายคลึงกัน และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากตารางที่ 12 พบว่า ค่าความหนืดเริ่มต้นของ DSF1215, DSF1225 และ DSF1235 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อซูโครสในระบบเพิ่มขึ้น โดยเมื่อมีซูโครสในระบบ 20 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าความหนืดเริ่มต้นสูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องจากซูโครสซึ่งเป็นไดแซคคาไรด์สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำจึงทำให้เหลือน้ำอิสระน้อยลง (นิธิยา, 2545) และซูโครสที่เติมลงไปอาจมีผลต่อโปรตีนที่มีอยู่ในแป้งข้าวฟ่าง โดยซูโครสจะมีผลทำให้โปรตีนมีความสามารถทนต่อความร้อนได้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อมีซูโครสในระบบจะทำให้โปรตีนเสียสภาพที่อุณหภูมิสูงขึ้น (Back *et al.*, 1979) จากการพิจารณาลักษณะโครงสร้างเจลในภาพที่ 20 พบว่าเมื่อมีการเติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ โปรตีนจะจับกันเป็นกลุ่ม

ขนาดเล็กกระจายตัวอยู่นอกโครงสร้างเจล ในขณะที่โครงสร้างเจลที่เตรียมโดยไม่มีการเติมซูโครส จะมีโปรตีนขนาดใหญ่ฝังตัวอยู่ในโครงสร้าง

จากตารางที่ 12 เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสุดท้ายและเซตแบคพบว่า ค่าความหนืดสุดท้ายและเซตแบคของ DSF1215, DSF1225 และ DSF1235 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมซูโครสที่ความเข้มข้นสูงขึ้น และจากภาพที่ 20 พบว่าเมื่อมีการเติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะโครงสร้างของเจล DSF1215, DSF1225 และ DSF1235 มีลักษณะ โครงสร้างแบบร่างแหที่มีความสม่ำเสมอ โครงสร้างเจลมีความละเอียดกว่าการเตรียมเจลโดยไม่มีการเติมซูโครส

11.3 ผลของซูโครสต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SSF)

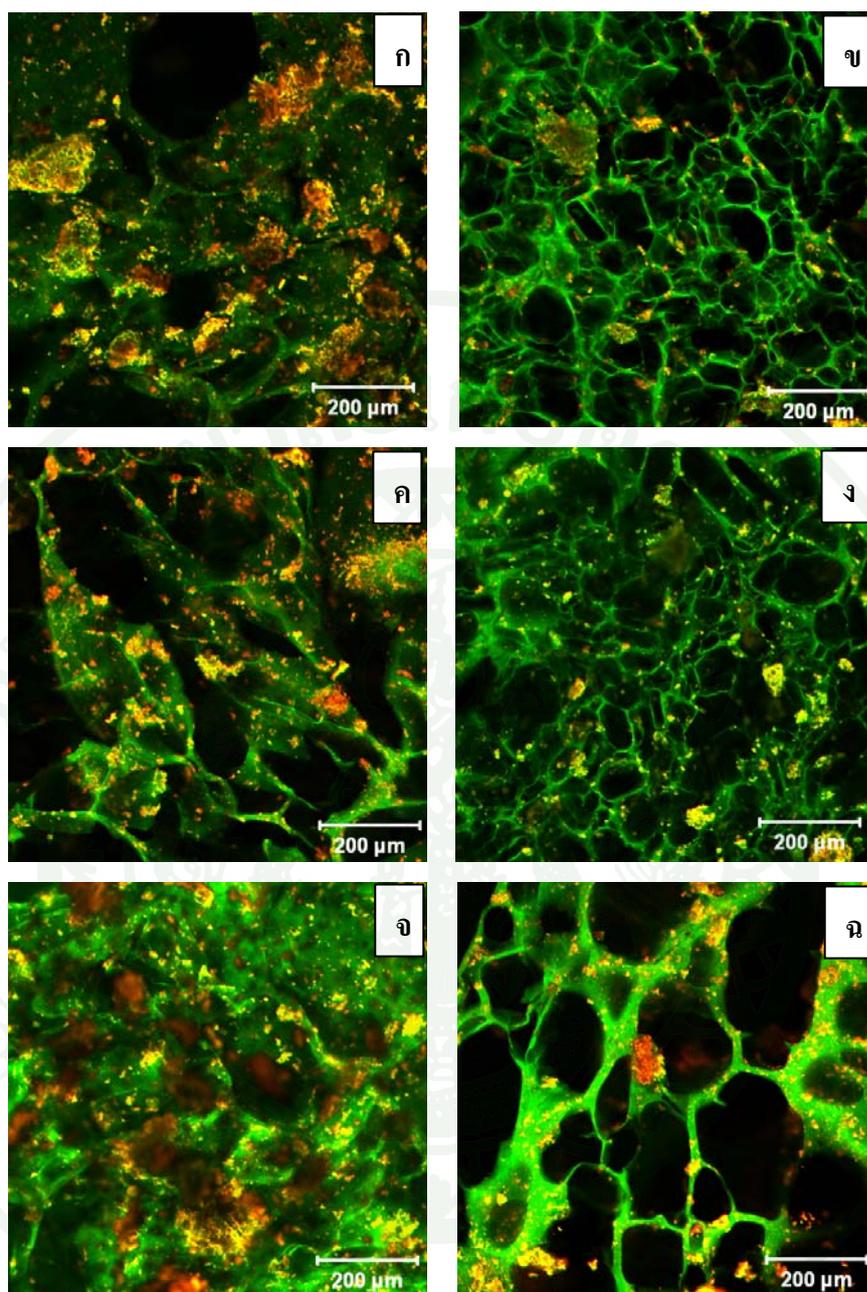
แป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยมีการอุ่นสารละลายน้ำแป้งก่อนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส (SSF65, SSF75 และ SSF85) หลังการตัดแปรพบว่าเม็ดสตาร์ชไม่โดนทำลาย แต่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยหลังการตัดแปรเม็ดสตาร์ชจะมีลักษณะยวบตัว บิดเบี้ยว เม็ดสตาร์ชบางส่วนมีการเกาะกันเป็นกลุ่ม ความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น และมีความสามารถในการทนต่อความร้อนและแรงเฉือนได้สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนืดของแป้ง SSF ในระบบที่มีการเติมซูโครสความเข้มข้น 0, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความหนืดของ SSF65, SSF75 และ SSF85 มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่มีแนวโน้มเดียวกัน โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแสดงดังกราฟในภาพที่ 21 โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของซูโครสในระบบสูงขึ้นความหนืดโดยรวมของระบบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจเนื่องจากปริมาณของแข็งในระบบมีมากขึ้น อีกทั้งซูโครสสามารถให้ความหนืดได้ จึงอาจส่งผลต่อความหนืดรวมของระบบ

ตารางที่ 12 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลลาทีไนเซชัน DSF1215, DSF1225 และ DSF1235 เมื่อเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน

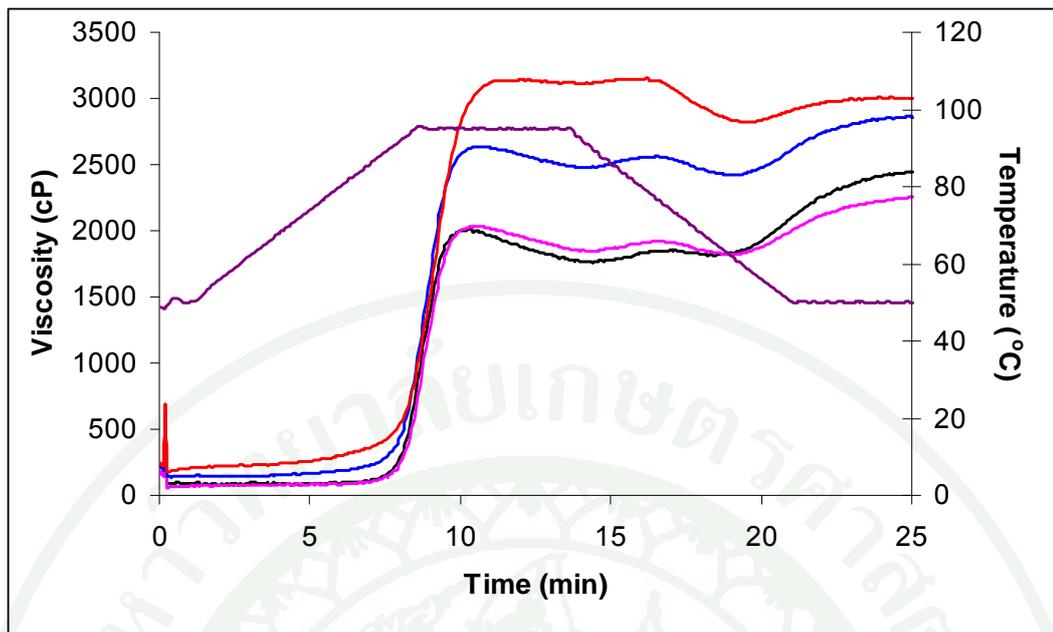
Sample	% Sucrose	Viscosity (cP)					
		Initial Viscosity	Viscosity (Peak2)	Trough	Breakdown	Final viscosity	Setback
DSF1215	0	1600.50±27.57a	2558.00±67.88b	1067.00±24.04ab	1244.00±28.28a	2682.50±16.26b	1615.50±7.78bc
	5	1605.00±73.54a	2634.50±30.41b	1395.00±4.24cd	1492.50±89.80bc	3071.50±17.68de	1676.50±21.92c
	10	2195.00±86.27b	2999.00±24.04c	1455.50±41.72d	1544.00±18.38bcd	3116.50±2.12e	1661.00±43.84c
	20	3218.50±67.18d	3550.00±38.18d	1840.50±70.50f	1709.50±43.50cde	3441.00±14.00f	1600.50±56.50abc
DSF1225	0	1335.00±93.38a	2162.50±40.31a	1000.50±30.41a	1164.00±7.07a	2464.00±35.36a	1463.50±4.95a
	5	2189.00±74.95b	2691.50±60.10b	1171.00±130.11abc	1575.00±36.77bcd	2668.50±123.74b	1497.50±6.36ab
	10	2928.50±61.52cd	3102.00±24.04c	1294.00±84.85bcd	1811.50±65.76e	2885.50±19.09c	1591.50±65.76abc
	20	4530.00±548.71f	3892.00±367.70e	1763.00±252.00ef	2760.50±135.50g	3353.50±142.50f	1590.50±109.50abc
DSF1235	0	1476.50±50.20a	2129.00±2.83a	1016.50±34.65ab	1117.50±41.72a	2616.50±30.41ab	1600.00±4.24abc
	5	2054.00±95.46b	2695.00±101.82b	1275.50±54.45abcd	1422.00±43.84b	2926.50±55.86cd	1651.00±1.41c
	10	2660.50±53.03c	3184.50±116.67c	1514.00±4.24de	1674.50±106.77cde	3173.50±43.13e	1659.50±38.89c
	20	3876.50±17.68e	3627.50±62.93d	1799.00±4.00f	2050.50±50.55f	3462.50±1.50f	1663.50±5.50c

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มนี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 20 ลักษณะของ โครงสร้างเจดแบ่งข้าวฟ่างตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เจด DSF1215 ไม่มีการเติมซูโครส (ก), เจด DSF1215 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ข), เจด DSF1225 ไม่มีการเติมซูโครส (ค), เจด DSF1225 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ง), เจด DSF1235 ไม่มีการเติมซูโครส (จ), เจด DSF1235 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ฉ) โดยใช้ กล้องคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง

หมายเหตุ สีเขียวคือสสารที่เชื่อมด้วย FITC, สีแดงและเหลืองคือโปรตีนที่เชื่อมด้วยโรดามิน บี



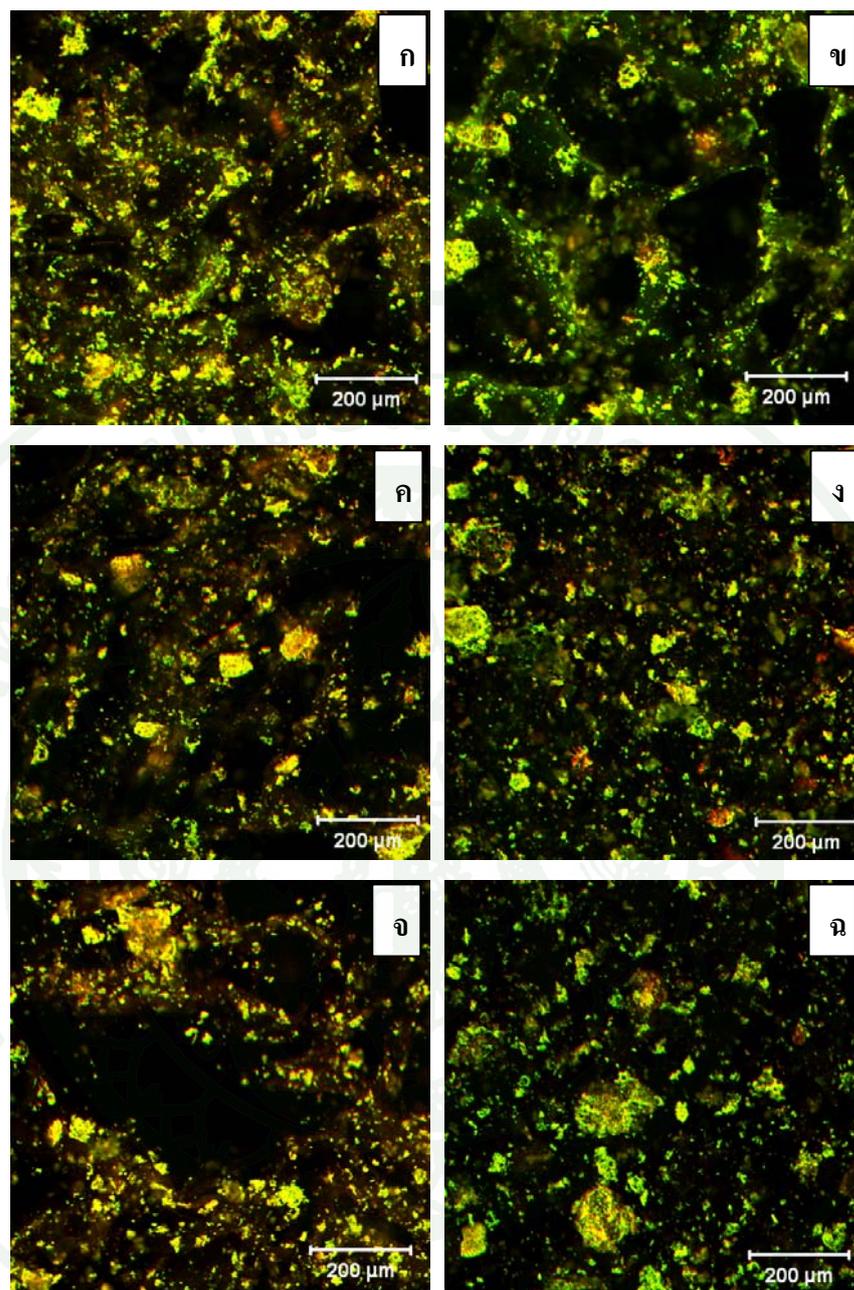
ภาพที่ 21 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างฟรีเจลาทีโนเซชัน คัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีการความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 5 นาที ก่อนการทำแห้ง (SSF65) เมื่อเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน
 หมายเหตุ ความเข้มข้นของซูโครส 0% (—), 5% (—), 10% (—) และ 20% (—)

จากตารางที่ 13 พบว่าเมื่อมีการเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกันทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความร้อนของ SSF มีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน แต่พบว่าเมื่อความเข้มข้นของซูโครสในระบบสูงขึ้นค่าความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจเนื่องจากผลของซูโครสที่มีต่อองค์ประกอบอื่นๆในแป้ง โดยซูโครสอาจทำให้โครงสร้างโปรตีนมีความเสถียรมากขึ้น (ปาริฉัตร, 2548) หรือเกิดการจับตัวกันเอง เนื่องจากโปรตีนที่ติดอยู่บนผิวเมล็ดสตาร์ชจะไปขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในเมล็ดสตาร์ช ทำให้เมล็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำลดลงและพองตัวได้น้อย (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543) ดังนั้นซูโครสอาจทำให้โปรตีนที่บริเวณผิวของเมล็ดสตาร์ชหลุดออกมาจึงทำให้เมล็ดสตาร์ชมีการพองตัวเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าเบรกดาว์พบว่า ค่าเบรกดาว์ของ SSF65 จะมีค่าต่ำลงเมื่อมีการเติมซูโครสความเข้มข้นสูงขึ้น ในขณะที่ค่าเบรกดาว์ของ SSF75 และ SSF85 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาในระบบที่มีการเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน (ตารางที่ 13)

ตารางที่ 13 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลที่ในเซชัน SSF65, SSF75 และ SSF85 เมื่อเติมซูโครสความเข้มข้นต่างกัน

Sample	% Sucrose	Pasting temperature (°C)	Viscosity (cP)				
			Peak viscosity	Trough	Breakdown	Final viscosity	Setback
SSF65	0	84.33±0.04a	2201.50±19.09b	1467.00±94.75a	734.50±113.84f	3010.50±17.68de	1543.50±77.07h
	5	86.43±0.25b	2053.00±45.25a	1497.50±12.02a	555.50±57.28e	2500.00±87.68b	1002.50±99.70f
	10	88.30±1.20c	2692.00±104.65c	2301.50±84.15c	390.50±20.51cd	3108.00±90.51de	806.50±6.36e
	20	88.03±0.39c	3211.00±97.58e	2776.50±92.63e	434.50±4.95d	3139.50±113.84e	363.00±21.21b
SSF75	0	87.58±0.04c	2227.00±18.38b	1715.00±14.14b	512.00±4.24de	2974.50±3.54cd	1259.50±10.61g
	5	87.88±0.04c	2228.00±28.28b	1799.00±15.56b	429.00±12.73d	2384.00±5.66b	585.00±21.21c
	10	87.60±0.00c	2920.00±11.31d	2459.00±25.46d	461.00±36.77d	3029.50±31.82de	570.50±57.28c
	20	87.93±0.04c	3453.50±12.02f	2879.50±9.19e	574.00±2.83e	3093.50±20.51de	214.00±29.70a
SSF85	0	87.58±0.04c	2010.00±5.66a	1760.00±25.46b	250.00±19.80ab	2449.50±16.26b	689.50±9.19d
	5	88.08±0.25c	2035.00±39.60a	1815.50±12.02b	219.50±27.58a	2250.50±67.18a	435.00±55.15b
	10	87.63±0.04c	2637.00±18.38c	2415.50±2.12d	221.50±20.51a	2858.50±37.48c	443.00±35.36b
	20	87.90±0.00c	3146.50±23.33e	2819.50±26.16e	327.00±2.83bc	3000.00±26.87d	180.50±0.71a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มนี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 22 ลักษณะของ โครงสร้างเจลแข็งข้าวฟ่างตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย เจล SSF65 ไม่เติมซูโครส (ก), เจล SSF65 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ข), เจล SSF75 ไม่เติมซูโครส (ค), เจล SSF75 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ง), เจล SSF85 ไม่เติมซูโครส (จ), เจล SSF85 เติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ฉ) โดยใช้กล้องคอนโฟคอลเลเซอร์สแกนนิ่ง
 หมายเหตุ สีเขียวคือสตาร์ชที่เชื่อมด้วย FITC, สีแดงและเหลืองคือ โพรตีนที่เชื่อมด้วยโรดามิน บี

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสุดท้าย (ตารางที่ 13) พบว่าค่าความหนืดสุดท้ายซึ่งเป็นค่าความหนืดของแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวลง ของ SSF65, SSF75 และ SSF85 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของซูโครสในระบบเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาค่าเซตแบค พบว่าค่าเซตแบคจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของซูโครสในระบบสูงขึ้น

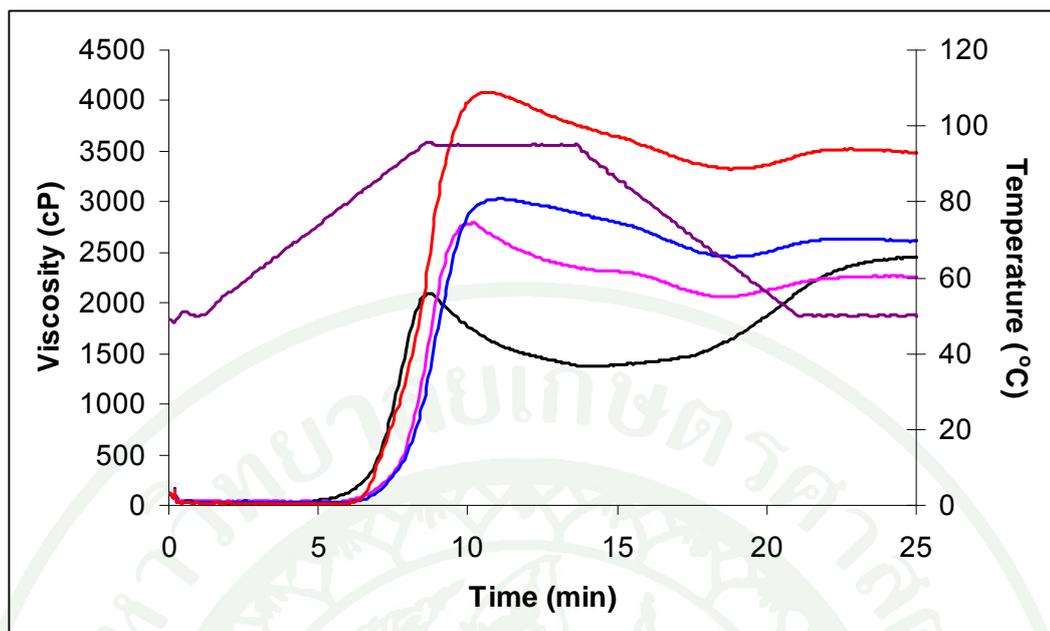
เมื่อพิจารณาลักษณะ โครงสร้างเจลในภาพที่ 22 พบว่า เจล SSF65 ในระบบที่ไม่มีการเติมซูโครส (ภาพที่ 22) ไม่พบลักษณะ โครงสร้างเจลแบบร่างแห มีกลุ่มของโปรตีนกระจายอยู่ แต่เมื่อมีการเติมซูโครสความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 22) พบว่าสามารถสังเกตพบลักษณะ โครงสร้างเจลแบบร่างแห มีโปรตีนจับกันเป็นกลุ่มขนาดเล็ก สำหรับเจล SSF75 และ SSF85 ในระบบที่ไม่มีการเติมซูโครส และในระบบที่มีการเติมซูโครส 20 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 22) ไม่พบลักษณะ โครงสร้างแบบร่างแห แต่มีกลุ่มของโปรตีนกระจายตัวอย่างชัดเจน

12. ผลของโซเดียมคลอไรด์ต่อสมบัติด้านความหนืด

12.1 ผลของ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง (NSF)

จากการศึกษาผลของ โซเดียมคลอไรด์ต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้ง NSF โดยทำการศึกษาในระบบที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ 0, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เมื่อมีโซเดียมคลอไรด์อยู่ในระบบทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความหนืดต่ำสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าเซตแบคมีแนวโน้มลดลง โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดแสดงดังภาพที่ 23

จากภาพที่ 23 เมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปในระบบ อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของระบบที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดแต่เมื่อมีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดมีค่าลดต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจะทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลภายในเซชันเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดนี้ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลภายในเซชันจะลดลง (Evans and Haisman, 1996; Lii and Lee, 1993; Maarf *et al.*, 2001)



ภาพที่ 23 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่าง (NSF) เมื่อเติมไชเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน

หมายเหตุ ความเข้มข้นของไชเดียมคลอไรด์ 0% (—), 5% (—), 10% (—) และ 20% (—)

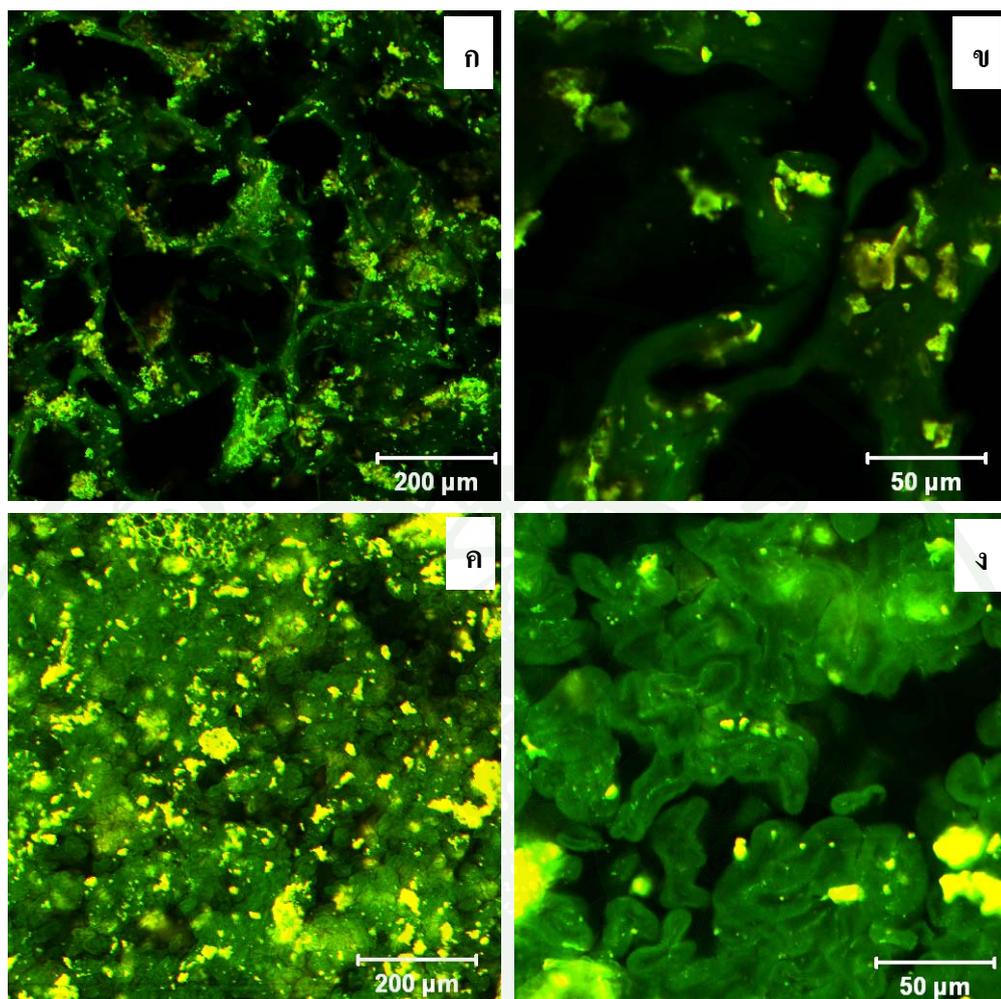
จากภาพที่ 23 เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุด พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไชเดียมคลอไรด์ในระบบสูงขึ้น ค่าความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งการเติมไชเดียมคลอไรด์ลงไปในระบบอาจมีผลต่อโปรตีนที่มีอยู่ใน NSF ซึ่งจากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเจล NSF (ภาพที่ 24) พบว่า เจล NSF จะมีโปรตีนที่มีการจับกันเป็นกลุ่มขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ ในขณะที่เจล NSF ในระบบที่ไม่มีการเติมไชเดียมคลอไรด์จะมีโปรตีนกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างเจล โดยโปรตีนที่กระจายตัวอยู่จะมีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่ ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนอาจมีผลต่อค่าความหนืดของ NSF

เมื่อพิจารณาค่าเซตแบค (ภาพที่ 23) พบว่า ค่าเซตแบคมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมไชเดียมคลอไรด์ลงในระบบ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างเจลในภาพที่ 24 โดยเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างเจลในภาพที่ 24 พบว่า เจลที่มีการเติมไชเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ จะมีเม็ดสตาร์ชที่มีลักษณะบิดเบี้ยวเรียงตัวกันแน่น โดยจะไม่พบลักษณะโครงสร้างเจลแบบร่างแห ซึ่งอาจเนื่องจากไชเดียมคลอไรด์ที่เติมลงไปอาจทำให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชแข็งแรงขึ้น

เม็ดสตาร์ชจึงไม่โดนทำลาย การเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปมีผลทำให้โมเลกุลแอมิโลสหลุดออกมา นอกเม็ดสตาร์ชได้น้อยลง อีกทั้งโซเดียมอออนที่อยู่ในระบบสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลของสตาร์ช ทำให้โมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกตินของสตาร์ชมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระน้อยลง ทำให้ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดได้น้อยลง (Ahmad and Williams, 1999) ในขณะที่เจล NSF ที่เตรียมโดยไม่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ พบว่า มีลักษณะ โครงสร้างเจลแบบร่างแห มีกลุ่มของโปรตีนที่มีขนาดใหญ่กระจายตัวในโครงสร้างเจล และเมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้น พบว่าไม่มีเม็ดสตาร์ชเหลืออยู่ (ภาพที่ 24)

12.2 ผลของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (DSF)

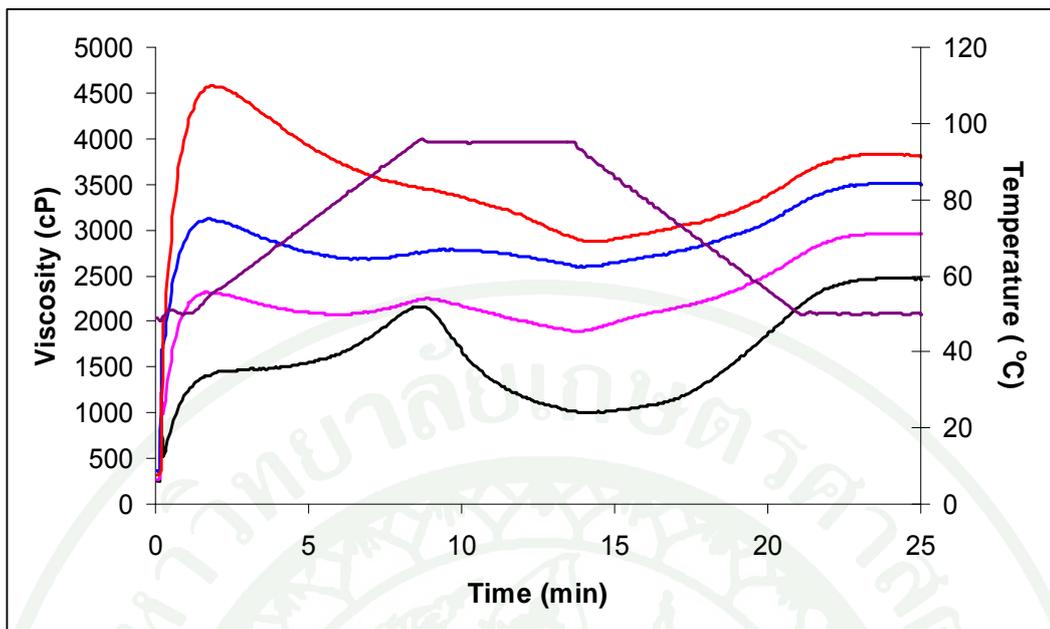
การตัดแปรแป้งข้าวฟ่างด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทำให้แป้งมีสมบัติในการละลายน้ำเย็นและให้ความหนืดได้ทันที โดยทำการตัดแปรโดยใช้อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 120 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15, 0.25 และ 0.35 มิลลิเมตร (DSF1215, DSF1225 และ DSF1235) จากนั้นนำมาศึกษาสมบัติด้านความหนืดในระบบที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 0, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ แป้งที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทุกสภาวะจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความหนืดในลักษณะเดียวกัน ดังภาพที่ 25 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง DSF สามารถให้ความหนืดได้ทันที แต่เมื่อมีการให้ความร้อนต่อไปความหนืดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นพิกที่ 2 แต่เมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปในระบบพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจนถึงระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ จะไม่ปรากฏลักษณะพิกที่ 2 (ภาพที่ 25 และ ตารางที่ 14) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการที่เม็ดสตาร์ชของแป้ง DSF โดนทำลายดังนั้นโมเลกุลแอมิโลส และแอมิโลเพกตินของสตาร์ชจึงสามารถดูดซับน้ำได้เร็ว ทำให้น้ำในระบบเหลือน้อยจึงให้ความหนืดได้ทันที เมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ในระบบทำให้ค่าความหนืดเริ่มต้นมีค่าสูงขึ้น โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นค่าความหนืดเริ่มต้นมีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากอออนของเกลือที่เติมลงไป มีผลต่อโมเลกุลของสตาร์ชและโปรตีนที่มีอยู่ในแป้ง



ภาพที่ 24 ลักษณะของโครงสร้างเจลแป็งข้าวฟ่าง (NSF) ในระบบที่มีโซเดียมคลอไรด์ 0 เปอร์เซ็นต์ และระบบที่มีโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ ก และ ข คือ ตัวอย่าง NSF; ค และ ง คือ ตัวอย่าง NSF ที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ คอนโฟลลลเซอร์สแกนนิ่ง

หมายเหตุ สีเขียวคือสตาร์ชที่ย้อมด้วย FITC

สีแดงและเหลืองคือโปรตีนที่ย้อมด้วยโรดามิน บี



ภาพที่ 25 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลลาคีโนเซชัน ดัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง อุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้ง 120 องศาเซลเซียส ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.35 มิลลิเมตร (DSF1235) เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน

หมายเหตุ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0% (—), 5% (—), 10% (—) และ 20% (—)

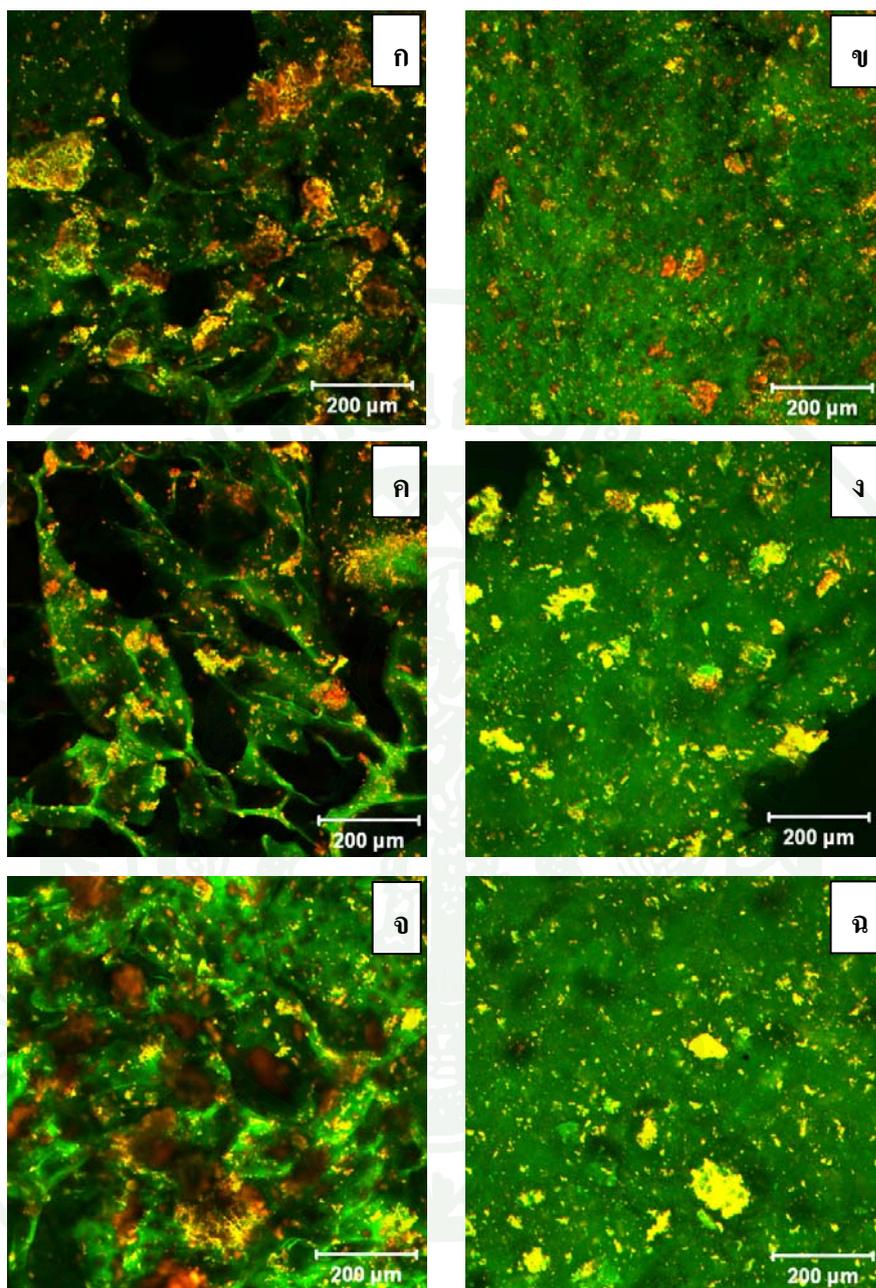
จากการศึกษาลักษณะ โครงสร้างของเจล DSF1215, DSF1225 และ DSF1235 ที่เตรียมโดยไม่เติมและการเติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเจลที่เตรียมโดยไม่เติมโซเดียมคลอไรด์จะมีโปรตีนขนาดใหญ่กระจายอยู่ในโครงสร้างเจล ในขณะที่เจลที่เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าจะมีกลุ่มของโปรตีนที่มีขนาดเล็กกว่ากระจายตัวอยู่ในโครงสร้างเจล (ภาพที่ 26)

เมื่อพิจารณาค่าเบรกคาวน์ (ภาพที่ 25 และ ตารางที่ 14) พบว่า ค่าเบรกคาวน์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในระบบสูงขึ้น แต่เมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เบรกคาวน์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการตรวจไม่พบพีคที่ 2 โดยค่าเบรกคาวน์ที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแป้งที่ดัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง สามารถโดนทำลายโดยความร้อนและแรงเฉือนได้ง่าย ดังนั้นจึงไม่สามารถตรวจเจอพีคที่ 2 เมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 14) และเมื่อ

ตารางที่ 14 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลลาทีนเซชัน DSF1215, DSG1225 และ DSF1235 เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน

Sample	% NaCl	Viscosity (cP)					
		Initial Viscosity	Viscosity (Peak2)	Trough	Breakdown	Final viscosity	Setback
DSF1215	0	1600.50±27.57b	2558.00±67.88c	1067.00±24.04a	1492.50±89.80d	2682.50±16.26ab	1615.50±7.78d
	5	1642.50±9.19b	2260.00±87.68ab	1990.50±126.57b	273.50±37.48ab	2924.50±47.38bc	934.00±79.20abc
	10	2142.00±56.57c	2340.00±101.82b	2232.50±115.26bc	111.50±9.19a	3161.00±67.88c	928.50±47.38abc
	20	4301.00±141.42f	nd	3068.50±521.14ef	980.50±372.65c	3942.50±299.11e	874.00±222.03ab
DSF1225	0	1335.00±93.38a	2162.50±40.31a	1000.50±30.41a	1164.00±7.07c	2464.00±35.36a	1463.50±4.95d
	5	2315.00±26.87c	2251.50±60.10ab	1887.50±137.89b	375.00±69.30ab	2957.50±48.79bc	1070.00±89.10bc
	10	3121.00±96.17e	2782.51±61.52d	2600.00±41.01cde	524.00±53.74b	3500.00±5.66d	900.00±46.67ab
	20	4570.00±169.71g	nd	2875.50±355.67def	1701.50±193.04d	3803.50±183.14e	928.00±172.53abc
DSF1235	0	1476.50±50.20ab	2129.00±2.83a	1016.50±34.65a	1117.50±41.72c	2616.50±30.41a	1600.00±4.24d
	5	2077.00±22.63c	2232.50±19.09ab	1866.00±36.77b	386.00±38.18ab	3019.00±12.73c	1153.00±49.50c
	10	2855.00±56.57d	2688.50±27.58cd	2494.00±25.46cd	371.00±29.70ab	3432.00±31.11d	938.00±56.57abc
	20	4748.00±261.63g	nd	3130.50±273.65f	1617.50±12.02d	3959.00±202.23e	828.50±71.42a

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มนี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ; nd (not detect): ไม่สามารถตรวจเจอพีคที่ 2



ภาพที่ 26 ลักษณะของโครงสร้างเจลแป้งข้าวฟ่างตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เจล DSF1215 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (ก), เจล DSF1215 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ข), เจล DSF1225 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (ค), เจล DSF1225 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ง), เจล DSF1235 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (จ) เจล DSF1235 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ฉ)

หมายเหตุ สีเขียวคือสตาร์ชที่เชื่อมด้วย FITC, สีแดงและเหลืองคือโปรตีนที่เชื่อมด้วยโรดามิน บี

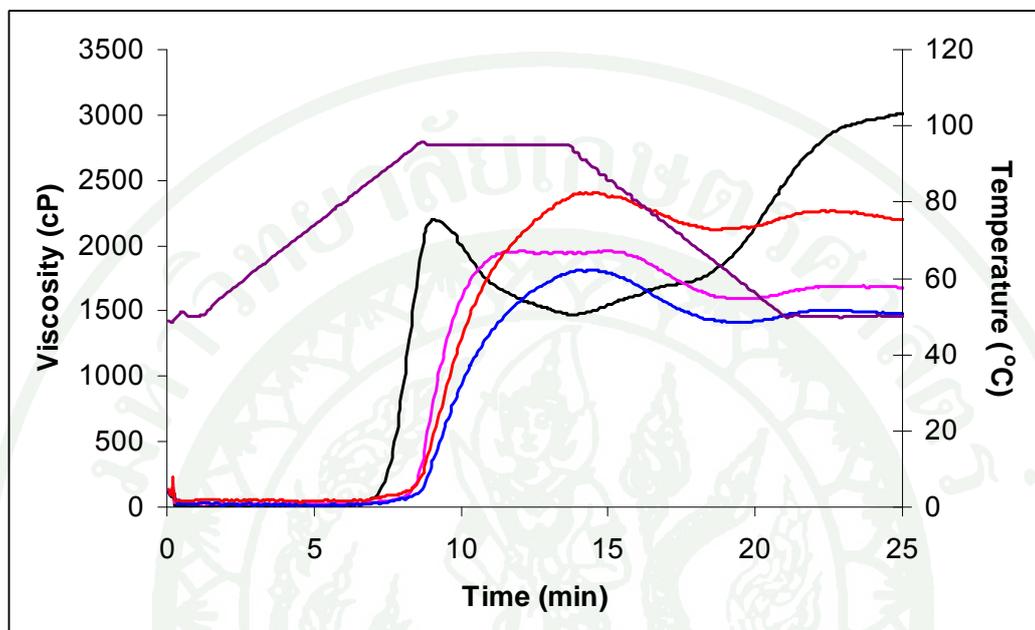
พิจารณาค่าเซตแบค พบว่า ค่าเซตแบคมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีโซเดียมคลอไรด์อยู่ในระบบ (ตารางที่ 14) ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างเจลที่ทำการศึกษาในภาพที่ 26 ซึ่งพบว่ามีลักษณะของสตาร์ชที่มีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) และมีกลุ่มของ โปรตีนที่มีขนาดเล็กเป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (disperse phase) โดยพบว่าเจล DSF1215, DSF1225 และ DSF1235 จะมีลักษณะโครงสร้างแบบร่างแห แต่เมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เจลจะไม่เกิดโครงสร้างแบบร่างแห

12.3 ผลของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SSF)

แป้งข้าวฟ่างเมื่อผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งทำการตัดแปรโดยมีการอุ่นสารละลายน้ำแป้งก่อนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส (SSF65, SSF75 และ SSF85) เม็ดสตาร์ชจะไม่โดนทำลายแต่จะทำให้รูปร่างเปลี่ยนไปและเม็ดสตาร์ชจะมีความสามารถในการทนต่อความร้อนและแรงเฉือนได้มากขึ้น เมื่อนำมาศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดในระบบที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ 0, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์พบว่า มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดดังภาพที่ 27

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของ SSF65, SSF75 และ SSF85 พบว่า เมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปในระบบจะทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 27 และ ตารางที่ 15) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างอออนของเกลือ แป้ง และน้ำ โดย อออนของเกลืออาจเพิ่มโครงสร้างที่เป็นระเบียบของน้ำ และลดจำนวนโมเลกุลของน้ำอิสระ (Zobel, 1984) อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดในระบบที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์จึงมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุดของ SSF65, SSF75 และ SSF85 พบว่าค่าความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อมีการเติมโซเดียม-คลอไรด์ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และเมื่อพิจารณาค่าเบรกควาน์พบว่า ค่าเบรกควาน์มีค่าต่ำลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในระบบเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 15) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทนต่อความร้อนและแรงเฉือนของเม็ดสตาร์ชในระบบที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ และเมื่อพิจารณาค่าเซตแบคของ SSF65, SSF75 และ SSF85 (ตารางที่ 15) พบว่า เซตแบคมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ในระบบ ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างเจลในภาพที่ 28 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอออนของเกลือที่เติมลงไป ทำให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงไม่โดนทำลายจากความร้อนและแรงเฉือนที่ได้รับ อีกทั้งการเติม

โซเดียมคลอไรด์ลงไปมีผลทำให้โมเลกุลเอมิโลสหลุดออกมานอกเม็ดสตาร์ชได้น้อยลง (Ahmad and Williams, 1999) และไม่เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จึงไม่สามารถเกิดลักษณะของโครงสร้างเจลได้ (ภาพที่ 28)



ภาพที่ 27 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลลาคีโนเซชัน ดัดแปร โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย มีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส 5 นาทีก่อนการทำแห้ง (SSF65)เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน

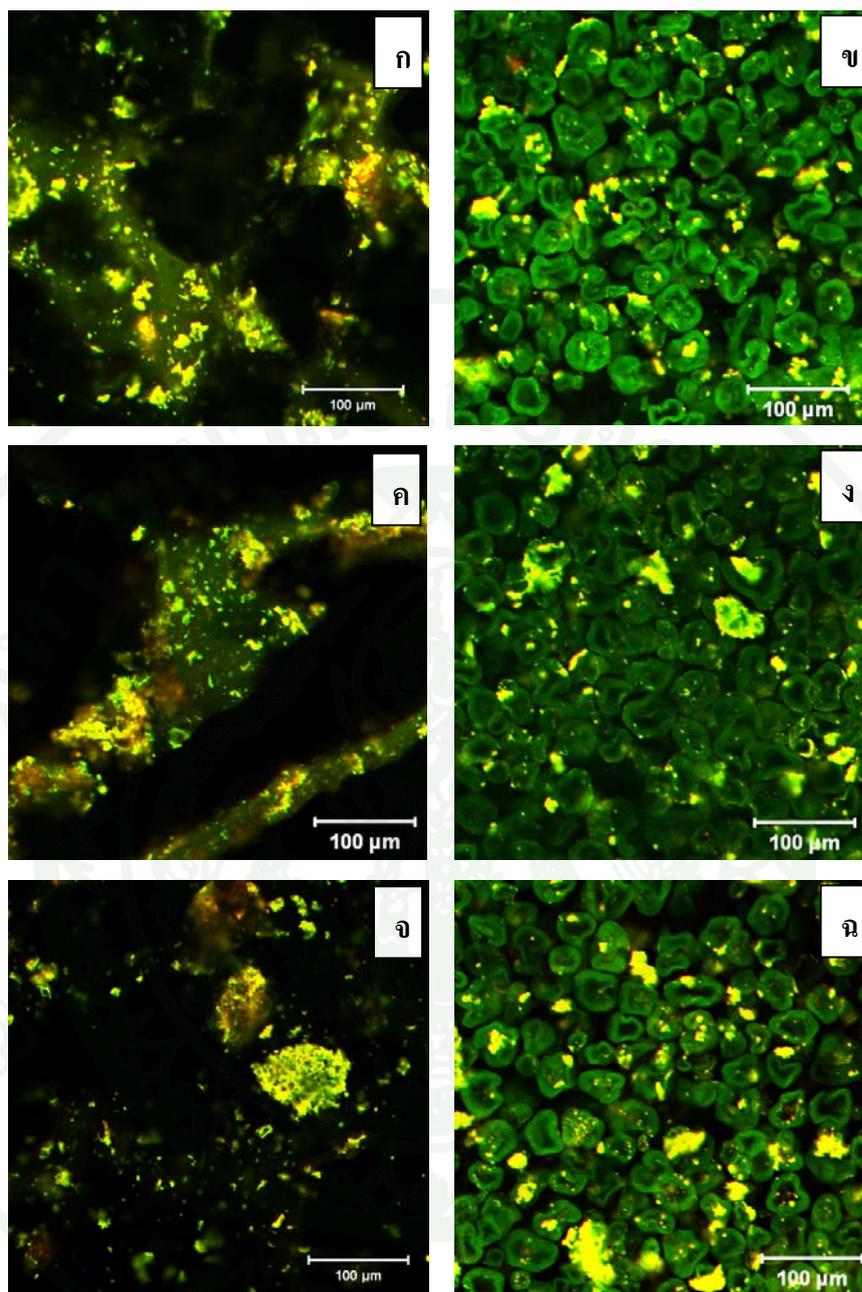
หมายเหตุ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0% (—), 5% (—), 10% (—) และ 20% (—)

เมื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างเจลของ SSF65, SSF75 และ SSF85 (ภาพที่ 28) พบว่าเจลของแป้งดัดแปรทั้ง 3 สภาวะจะมีลักษณะคล้ายกัน โดยเจลที่เตรียมโดยไม่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์สามารถเกิดโครงสร้างเจลแบบร่างแห มีกลุ่มของโปรตีนขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วบริเวณโครงสร้างเจล แต่เมื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างเจลที่เตรียมโดยการเติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 28) พบว่า ยังคงปรากฏลักษณะของเม็ดสตาร์ชที่มีลักษณะบิดเบี้ยว เรียงตัวกัน มีกลุ่มของโปรตีนขนาดเล็กกระจายตัวแยกกับส่วนของเม็ดสตาร์ช

ตารางที่ 15 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลที่ในเซชัน SSF65, SSF75 และ SSF85 เมื่อมีเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน

Sample	% NaCl	Pasting temperature (°C)	Viscosity (cP)				
			Peak viscosity	Trough	Breakdown	Final viscosity	Setback
SSF65	0	84.33±0.04 ^a	2201.50±19.09 ^f	1467.00±94.75 ^{cd}	734.50±113.84 ^g	3010.50±17.68 ^j	1543.50±77.07 ^c
	5	92.45±0.07 ^d	1957.00±1.41 ^d	1587.00±8.49 ^{ef}	370.00±7.07 ^{de}	1680.50±7.78 ^d	93.50±0.71 ^a
	10	89.28±0.04 ^c	1817.50±20.51 ^c	1410.00±4.24 ^{bc}	407.50±16.26 ^c	1478.50±2.12 ^b	68.50±2.12 ^a
	20	89.18±0.04 ^c	2406.00±59.40 ^g	2114.00±46.67 ^j	292.00±12.73 ^{cd}	2196.00±33.94 ^h	82.00±12.73 ^a
SSF75	0	87.58±0.04 ^b	2227.00±18.38 ^f	1715.00±14.14 ^{gh}	512.00±4.24 ^f	2974.50±3.54 ⁱ	1259.50±10.61 ^d
	5	92.45±0.00 ^d	2043.50±14.85 ^e	1662.50±33.23 ^{fg}	381.00±18.38 ^e	1763.50±33.23 ^e	101.00±0.00 ^a
	10	92.68±0.25 ^d	1726.50±30.41 ^b	1370.00±21.21 ^b	356.50±9.19 ^{de}	1485.50±19.09 ^b	115.50±2.12 ^a
	20	92.63±0.18 ^d	2209.50±14.85 ^f	1969.00±4.24 ⁱ	240.50±10.61 ^{bc}	2146.00±9.90 ^g	177.00±5.56 ^b
SSF85	0	87.58±0.04 ^b	2010.00±5.66 ^{de}	1760.00±25.46 ^h	250.00±19.80 ^{bc}	2449.50±16.26 ⁱ	689.50±9.19 ^c
	5	92.48±0.04 ^d	1836.00±25.46 ^c	1519.00±18.38 ^{de}	216.00±11.31 ^{bc}	1586.00±1.41 ^c	67.00±19.80 ^a
	10	92.48±0.11 ^d	1464.50±10.61 ^a	1268.50±6.36 ^a	196.00±4.24 ^{ab}	1390.50±3.54 ^a	122.00±2.83 ^a
	20	87.40±0.85 ^b	2023.00±57.98 ^{de}	1898.00±43.84 ⁱ	125.00±14.14 ^a	2087.50±47.38 ^f	189.50±3.54 ^b

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 28 ลักษณะของโครงสร้างเจลแป้งข้าวฟ่างตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SSF) เจล SSF65 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (ก), เจล SSF65 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ข), เจล SSF75 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (ค), เจล SSF75 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ง), เจล SSF85 ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (จ), เจล SSF85 เติมโซเดียมคลอไรด์ 20 เปอร์เซ็นต์ (ฉ)

หมายเหตุ สีเขียวคือสสารที่เชื่อมด้วย FITC, สีแดงและเหลืองคือโปรตีนที่เชื่อมด้วยโรดามิน บี

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีนในเซชันที่ผ่านการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่า แป้งข้าวฟ่าง พรีเจลาทีนในเซชัน ที่ทำการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งให้ร้อยละของผลได้ 81-87 (คิดจากแป้งข้าวฟ่าง) และมีความชื้น 4-6 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่น ฝอยให้ร้อยละของผลได้ 67-84 (คิดจากแป้งข้าวฟ่าง) มีความชื้น 6-7 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังการตัด แปรทั้ง 2 วิธีแป้งข้าวฟ่างจะมีปริมาณ resistant starch เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐาน วิทยาเม็ดสตาร์ชข้าวฟ่างมีลักษณะกลม หลายเหลี่ยม แต่ภายหลังการตัดแปร โดยใช้เครื่องทำแห้ง แบบลูกกลิ้งจะไม่พบลักษณะของเม็ดสตาร์ชเหลืออยู่ แต่จะมีลักษณะเป็นแผ่น ในขณะที่การ ตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่าเม็ดสตาร์ชไม่โดนทำลายแต่จะมีลักษณะบิดเบี้ยว สำหรับคุณสมบัติด้านสีของแป้งข้าวฟ่างพรีเจลาทีนในเซชันจะมีสัดส่วนของสีเหลืองและแดงเพิ่มขึ้น และมีค่าความสว่างลดลง ความสามารถในการละลายน้ำเย็นความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้ง ที่ผ่านการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่แป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีความสามารถในการละลายน้ำเย็นและความสามารถในการดูดซับ น้ำเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่แป้งเพิ่มขึ้น

แป้งข้าวฟ่างแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A-type ภายหลังการตัดแปรโดยเครื่องทำ แห้งแบบลูกกลิ้งตรวจไม่พบลักษณะโครงสร้างผลึก แต่การตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ทำให้ร้อยละความเป็นผลึกลดลง สำหรับสมบัติการเกิดเจลาทีนในเซชันและรีโทรเกรเดชันพบว่า แป้งตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งตรวจไม่พบอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีนในเซชัน และเกิด รีโทรเกรเดชัน ได้เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ในขณะที่แป้งตัดแปรโดยเครื่องทำ แห้งแบบพ่นฝอยมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาทีนในเซชันสูงกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปร โดยตรวจ พบช่วงอุณหภูมิริโทรเกรเดชัน 2 ช่วง และเมื่อศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดพบว่า แป้งตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งสามารถให้ความหนืดเริ่มต้นได้ทันที ในขณะที่แป้งตัดแปรโดยเครื่อง ทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น

ซูโครสมีผลต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปรพบว่า เมื่อความเข้มข้นของซูโครสมีค่าเพิ่มขึ้นความหนืดโดยรวมของระบบของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปรมีค่าสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของซูโครสในระบบเพิ่มขึ้นพบว่า ความหนืดสูงสุด และค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งข้าวฟ่างมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น สำหรับแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งพบว่า เมื่อมีการเติมซูโครสทำให้ค่าความหนืดเริ่มต้น มีค่าเพิ่มสูงขึ้น สำหรับแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของซูโครสในระบบเพิ่มขึ้นทำให้มีความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของซูโครสต่อลักษณะโครงสร้างเจลพบว่า ซูโครสทำให้โครงสร้างเจลของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างที่ตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีลักษณะโครงสร้างร่างแหที่มีความสม่ำเสมอ ในขณะที่โครงสร้างเจลของแป้งข้าวฟ่างที่ตัดแปร โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยไม่พบลักษณะ โครงสร้างแบบร่างแห อีกทั้งการเติมซูโครสทำให้มีการกระจายตัวของโปรตีนที่มีขนาดเล็กใน โครงสร้างของเจลแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างตัดแปร

จากการศึกษาผลของโซเดียมคลอไรด์ต่อคุณสมบัติด้านความหนืดพบว่า เมื่อมีโซเดียมคลอไรด์ในระบบจะทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่าเซตแบคมีค่าต่ำลง สำหรับแป้งที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งพบว่า เมื่อมีโซเดียมคลอไรด์ในระบบทำให้ความหนืดโดยรวมมีค่าสูงขึ้น แต่ทำให้ค่าเซตแบคมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาผลของโซเดียมคลอไรด์ต่อโครงสร้างเจลพบว่า โซเดียมคลอไรด์ทำให้เจลของแป้งข้าวฟ่างและแป้งข้าวฟ่างที่ตัดแปร โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งไม่สามารถเกิดโครงสร้างเจลแบบร่างแห อีกทั้งยังสามารถพบเม็ดสตาร์ชอยู่ในโครงสร้างของเจลแป้งข้าวฟ่าง สำหรับเจลแป้งข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่ายังสามารถเห็นเม็ดสตาร์ชแต่ไม่ปรากฏลักษณะของโครงสร้างเจล

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากแปรงข้าวฟ่างมีองค์ประกอบอื่นอยู่ด้วย เช่น โปรตีน ไขมัน เมื่อผ่านการตัดแปรโดยวิธีพรีเจลาทีนเซชันอาจทำให้องค์ประกอบเหล่านี้ส่งผลต่อคุณสมบัติของแปรงตัดแปรจึงควรศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนและไขมันในแปรงข้าวฟ่าง
2. จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของแปรงข้าวฟ่างตัดแปร พบว่าแปรงข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีมุมสะท้อนที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V-type จึงควรศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและไขมันของแปรงข้าวฟ่าง
3. จากการศึกษาผลของซูโครสและไซโตเดียมคลอไรด์ต่อคุณสมบัติด้านความหนืดควรมีการศึกษาถึงกลไกการเกิดอิทธิพลของซูโครสและไซโตเดียมคลอไรด์ที่มีต่อโมเลกุลของสตาร์ชและโครงสร้างของน้ำ เช่น วัคการพองตัวของเม็ดสตาร์ชในสารละลายซูโครสและไซโตเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ หรือศึกษาคุณสมบัติการเกิดเจลาทีนเซชันและรีโทรเกรเดชันในระบบที่มีซูโครสและไซโตเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ
4. จากการศึกษาสตาร์ชตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่าสามารถให้ความหนืดได้ทันทีในขณะที่แปรงข้าวฟ่างที่ผ่านการตัดแปรโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยไม่สามารถให้ความหนืดได้ทันทีจึงควรศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบอื่นๆ ในแปรงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. **เทคโนโลยีของแป้ง**. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 225 น.
- ณัฐกฤตา สุวรรณทิป. 2541. **การสกัดแป้งจากเมล็ดข้าวฟ่างโดยการโม่แห้ง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 2-20.
- ธีรศิลป์ โพธิ์สูง. 2530. **การปรับปรุงพันธุ์ข้าวฟ่าง**. เอกสารวิชาการ โครงการปรับปรุงพันธุ์ข้าวฟ่าง (ศ.2.1). ศูนย์วิจัยข้าวโพดข้าวฟ่างแห่งชาติ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา. 71 หน้า.
- นิธิยา รัตยาปนนท์. 2545. **เคมีอาหาร**. ครั้งที่ 1. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- ปาริฉัตร หงสประภาส. 2548. **โปรตีนในอาหาร**. (เอกสารคำสอน 052514). ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วารุณี เกียรติคุริยกุล. 2540. **โปรตีนที่พบใน Body Fluid**. ภาควิชาเคมีคลินิก คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ศิวาพร ศิวเวชช. 2533. **ผลิตภัณฑ์จากข้าวฟ่าง เล่ม 1**. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- หทัยชนก ชะนะปาโมกโข. 2551. **สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์และการเกิดเจลของสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- AACC. 2000. **Approved Method of the American Association of Cereal Chemist**. 10th ed. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota.

- Achinewhu, S. C., L. I. Barber and I.O. Ijeoma. 1998. Physicochemical properties and garification (gari yield) of selected cassava cultivars in rivers state, Nigeria. **Plant Food Hum. Nutr.** 52: 133-140
- Ahmad, F.B. and P.A. Williams. 1999. Effect of salt 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.
- Arunyanart, T. and S. Charoenrein. 2008. Effect of sucrose on the freeze-thaw stability of rice starch gel: Correlation with microstructure and freezable water. **Carbohydr. Polym.** 74: 514-518.
- Awika, J.M and L.W. Rooney. 2004. Sorghum phytochemicals and their potential aspects on human health. **Phytochem.** 65: 1199-1221.
- Back, J.F., D. Oakenfull and M.B. Smith. 1979. Increased thermal stability of protein in the presence of sugar and polyols. **Biochemistry-US.** 23 (18): 5191-5196.
- Barikmo, I., F. Ouattara and A. Oshaug. 2004. Protein, carbohydrate and fiber in cereal from Mali: how to fit the results in food composition table and database. **J. Food Compos. Anal.** 17: 291-300.
- Bean, M.M. and C.S. Setser. 1992. Polysaccharide, sugar and sweeteners, pp. 69-198. *In* J. Bowers, ed. **Food Theory and Application.** Macmillan Publishing Co., New York.
- Berry, C. S. 1986. Resistant starch: formation and measurement of starch that survives exhaustive digestion with amylolytic enzymes during the determination of dietary fiber. **J. Cereal Sci.** 4: 301-314.

- Biliaderis, C.G. 1998. Structure and phase transitions of starch polymers, pp. 57-168. *In* R. H. Walter, ed. **Polysaccharide Association Structures in Food**. Marcel Dekker Inc, New York.
- _____ and J. Zawistowski. 1990. Viscoelastic behavior of aging starch gels; Effects of concentration, temperature, and starch hydrolysates on network properties. **Cereal Chem.** 67 (7): 240-246.
- Bowers, J. 1992. **Food Theory and Applications**. Macmillian Publishing Company, New York.
- Chaplin, M. 2007. **Hofmeister Serie**. Water Structure and Science. Available source: www.lsbu.ac.uk/water/hofmeist.html, March 9, 2007.
- Cheetham, N.W.H. and L.P. Tao. 1998. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: an X-ray powder diffraction study. **Carbohydr. Polym.** 36: 277-284.
- Chen, J. and J. Jane. 1994. Preparation of granular cold water-soluble starches by alcoholic-alkaline treatment. **Cereal Chem.** 71 (6): 618-622.
- Doublier, J.L., P. Colonna and C. Mercier. 1986. Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. II Rheological characterization of starch paste. **Cereal Chem.** 63: 240-246.
- 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. and M. Gudmundsson. 2006. Starch: physicochemical and functional aspects, pp. 390-451. *In* A.C. Eliasson, ed. **Carbohydrate in Food**. Taylor and Francis group, United States of America.

- 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.
- Englyst, H.N., S.M. Ingman and J.H. Cummings. 1992. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **Eur. J. Clin. Nutr.** 46 (Suppl. 2), S33–S50.
- Evans, I.D. and D.R. Haisman. 1996. Starch: physicochemical and functional aspects. **Starch/Starke.** 34: 224-231.
- Food and Agricultural Organization (FAO). 1995. **Sorghum and millet in human nutrition.** Available Source: <http://www.fao.org/DOCREP/T0818e.htm#Content>, January 22, 2008.
- French, A.D. 1979. Allowed and preferred shapes of amylose. **Bakers Dig.** 53: 39-46.
- Gardner, A. W. 1971. **Industrial drying.** London: Leonard Hill Books.
- Godet, M.C., A. Buleon, V. Tran and P. Colonna. 1993. Structural features of fatty acid-amylose complexes. **Carbohydr. Polym.** 21: 91-95.
- Goodfellow, B. and R.H. Wilson. 1990. A Fourier transform IR study of the gelation of amylose and amylopectin. **Biopolymers.** 30: 1183-1189.
- Gudmundsson, G. 1994. Retrogradation of starch and the role of its components. **Thermochemical Acta.** 246: 239-341.
- Hamaker, B.R., A.A. Mohamed, J.E. Habben, C.P. Huang and B.A. Larkins. 1995. An efficient for extracting maize and sorghum kernel proteins reveals higher prolamin content than the conventional method. **Cereal Chem.** 72: 583-588.

Hamaker, B.R. and B.A. Bugusu. 2003. **Overview : sorghum protein and food quality.**

Department of Food Science. Purdue University and the INTSORMIL CRSP West Lafayette, Indiana, USA. Available Source: <http://www.afripro.org.uk/papers/Paper08Hammaker.pdf>, January 20, 2010.

Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectin and its significance. **Carbohydr. Res.** 147: 342-347.

Hodge, S and M. Osman. 1976. Carbohydrates, principles of food science part 1, pp. 102-114. In O.R Fennema, ed. **Food chemistry.** Marcel Dekker, New York.

Hoover, R. 2001. Composition, molecular structure and physicochemical properties of tuber and root starches. **Carbohydr. Polym.** 45: 253-267.

Kawabata, A., N. Takase, E. Miyoshi, S. Sawayama, T. Kimura and K. Kudo. 1994. Microscopic observation and X-ray diffractometry of heat/moisture-treated starch granules. **Starch/Starke.** 46 (12): 463-469.

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.

Lii, C.Y. and B.L. Lee. 1993. Heating A, B and C type starches in aqueous sodium chloride: effect of sodium chloride contraction and moisture content on differential calorimetry thermograms. **Cereal Chem.** 70 (2): 188-192.

Maaurf, A.G., Y.B. 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.

- Mallery, C.H. 2008. Department of Biology of Miami. Available Source:
<http://www.fig.cox.miami.edu/.../150/chemistry/organic.htm>, January 30, 2008.
- 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.
- Murphy, P. 2000. Starch, pp. 41-65. *In* G. O. Phillips and P. A. Williams, eds. **Handbook of Hydrocolloids.** Woodhead Publishing Limited, England.
- Newport Scientific. 1995. **Operation Manual for the Series 4 Rapid Visco Analyser.** Warriewood, Australia.
- Pomeranz, Y. 1991. **Functional Properties of Food Component.** Academic Press, Inc. New York.
- Sajilata, M. G., R. S. Singhal and P. R. Kulkarni. 2006. Resistant starch – a review. **Compr. Rev. Food Sci. F. Safety.** 5: 1-17.
- Sievert, D. and P. Wüsch. 1993. Amylose chain association based on differential scanning calorimetry. **J. Food Sci.** 58: 1332-1334.
- Tester, R.F., J. Karkalas and X. Qi. 2004. Starch-composition, fine structure and architecture. **J. Cereal Sci.** 39: 151-165.
- Vallous, N.A., M.A. Gavrielidou and T.D. Karapantsios. 2002. Performance of a double drum dryer for producing pregelatinized maize starch. **J. Food Eng.** 51: 171-183.

- Verbruggen M.A., G. Beldman., A.G.J. Voragen and M. Hollemans. 1993. Water-unextractable cell wall material from sorghum: isolation and characterization. **J. Cereal. Sci.** 17: 71-82.
- Vodovotz, Y. and P. Chinachoti. 1998. Glassy-rubbery transition and recrystallization during aging of wheat starch gel. **J. Agric. Food Chem.** 46: 446-453.
- Wang, J.C. and J.E. Kinsella. 1976. Functional properties of novel proteins: alfalfa leaf protein. **J. Food Sci.** 41: 286-292.
- 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.
- Whistler, R.L. and J.N. BeMiller. 1999. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists**. American Association of Cereal Chemistry Inc., St. Paul, MN, USA.
- Winkler, A. H. 1971. **Spray-Dried Solubilized Starch**. United States Patent 35921.
- 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(5): 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 pastes. *In* R.L. Whistler, J.N. Bemiller and E.F. Paschall, eds. **Starch: Chemistry and Technology**. Vol.2. Academic Press, New York.







การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์

ก1. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

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

1.2 วิธีการวิเคราะห์

1.2.1 ตัวอย่างสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่างที่ใช้วิเคราะห์ต้องผ่านการบดจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าหรือเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร แล้วจึงนำไปหาความชื้นตามวิธี AACC (2000) ก่อนการวิเคราะห์

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

$$\text{สำหรับปริมาณสตาร์ชหรือแป้ง} \quad s = \frac{86 \times 3}{100 - m}$$

$$\text{สำหรับปริมาณน้ำ} \quad w = 25 + (3.0 - s)$$

โดย S = น้ำหนักตัวอย่างที่ปรับค่าแล้ว หน่วยเป็นกรัม

W = น้ำหนักน้ำที่ปรับค่าแล้ว หน่วยเป็นกรัม

M = ปริมาณความชื้นที่แท้จริงของตัวอย่าง (เปอร์เซ็นต์)

1.2.3 ใส่แป้งลงบนผิวหน้าของน้ำในถ้วยทรงกระบอก ใช้ใบพายเขย่าตัวอย่างในถ้วยทรงกระบอกขึ้นลง 10 ครั้ง แต่ถ้าแป้งยังคงอยู่บนผิวหน้าหรือติดบนใบพาย ให้เขย่าตัวอย่างซ้ำอีกครั้ง

1.2.4 ใส่ใบพายในถ้วยทรงกระบอกและสวมใบพายเข้ากับที่ยึด โดยให้ใบพายอยู่กึ่งกลางถ้วย แล้วเริ่มต้นการวิเคราะห์โดยกดมอเตอร์ของเครื่องมือลง และมีสิ่งที่จะต้องระวัง คือ อย่า

ผสมตัวอย่างสตาร์ชหรือแป้งกับน้ำนานกว่า 1 นาที ก่อนการวิเคราะห์ ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับสตาร์ชและแป้งข้าวฟ่าง มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาดังนี้

ตารางผนวกที่ ก1 สภาวะที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลา

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
สิ้นสุดการทดสอบ	25:00

สำหรับความเร็วรอบเริ่มต้นที่ใช้ คือ 960 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที แล้วจึงใช้ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที คงที่ตลอดการทดสอบ

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



ภาคผนวก ข
การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี

การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี

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 ชั่งตัวอย่างแบ่งในภาชนะใส่ตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2-3 กรัม นำไปใส่ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเปิดฝาภาชนะไว้เมื่อครบเวลาแล้วนำออกจากตู้อบ 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 รองรับสิ่งกีดขวางด้วยขวด (Mask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายกรด บอริกความเข้มข้นร้อยละ 4 จำนวน 25 มิลลิลิตร โดยกลั่นประมาณ 5 นาที

2.3.6 นำไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งได้สารละลายสีเทา (จุดยุติ) บันทึกปริมาณกรดที่ใช้ แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละของ ไนโตรเจน

หมายเหตุ ให้ทำแบบล่งก์ควบคู่ไปด้วย 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 = ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบบล่งก์

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

ปิโตรเลียมอีเธอร์ที่มีจุดเดือดในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส

3.3 วิธีการวิเคราะห์

3.3.1 อบ extraction cup และทิ้งให้เย็นในภาชนะกันความชื้น ชั่งน้ำหนักไว้ (W1)

3.3.2 ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ลงบนกระดาษกรองและห่อให้มิดชิด บันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่แน่นอน (W2) แล้วนำมาใส่ลงใน thimble

3.3.3 นำ thimble ใส่ใน extraction unit แล้วเติมปิโตรเลียมอีเธอร์ 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 (W3)

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

ข4. 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 ที่ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก

4.2.2 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ใส่ลงในเป้า แล้วนำไปเผาด้วยไฟอ่อนๆ

จนหมดควัน

4.2.3 นำไปเผาในเตา muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนกว่าได้เถ้าเป็น

สีขาวหรือสีเทา

4.2.4 นำเข้าออกมาใส่ในภาชนะกันความชื้น ที่ไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

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 เผาเบ้าบรรจุสารที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในภาชนะกันความชื้น

5.3.2 ชั่งตัวอย่าง 1.0 กรัม ในเบ้าบรรจุสาร ชั่งน้ำหนักแน่นอน

5.3.3 นำเข้าบรรจุสารวางลงในตำแหน่งบรรจุเข้าของเครื่อง 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 ปล่อยน้ำเดือดออกจากคอลัมน์จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.313 นอร์มัล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ให้ความร้อนเพื่อทำการสกัดนาน 30 นาที

5.3.7 เมื่อครบเวลาปล่อยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกจากคอลัมน์ทั้งหมด จากนั้นเติมเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้หมด

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

5.3.9 นำเข้าบรรจุตัวอย่างที่อบและหาน้ำหนักแน่นอนแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 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 = น้ำหนักเข้าบรรจุตัวอย่าง + ถาด หลังอบ

W_2 = น้ำหนักเข้าบรรจุตัวอย่าง + ถาด หลังเผา

ข6. วิธีวิเคราะห์ปริมาณ resistant starch (ด้วยชุดทดสอบ Resistant Starch Assay Procedure (RSTAR 11/02) ของ Megazyme)

6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 6.1.1 อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking water baht)
- 6.2.2 เครื่องหมุนเหวี่ยงขนาดเล็ก (Bench Centrifuge)
- 6.2.3 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- 6.2.4 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
- 6.2.5 เครื่องผสมหมุนวน (Vortex mixer)
- 6.2.6 เครื่องชั่ง (Analytical balance)
- 6.2.7 นาฬิกาจับเวลา (Stop clock timer)
- 6.2.8 ชุดเครื่องแก้ว

6.2 สารเคมี

- 6.2.1 Pancreatic α -amylase (Pancreatin, 10g, 3 Ceralpha Units/mg)
- 6.2.2 Amyloglucosidase (12 mL, 3300 Units/mL)
- 6.2.3 Glucose Determination Reagent (GOPOD) (for 1 litre)
- 6.2.4 Glucose Reagent Buffer (concentrate) (50 mL)
- 6.2.5 Glucose Standard Solution (1 mg/mL in 0.2% benzoic acid)
- 6.2.6 Resistant Starch Control (with stated level of RS)
- 6.2.7 กรดมาเลอิก
- 6.2.8 กรดแอสซิติค
- 6.2.9 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
- 6.2.10 เอทิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 99 โดยปริมาตร
- 6.2.11 แคลเซียมคลอไรด์
- 6.2.12 โซเดียมไฮดรอกไซด์
- 6.2.13 กรดไฮโดรคลอริก
- 6.2.14 โซเดียมเฮไลด์

6.2.15 โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนอโทฟอสเฟต

6.2.16 เตทตระไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิด

6.3 วิธีการเตรียมสารเคมี

6.3.1 การเตรียมโซเดียมมาลิเอทบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 6.0

ละลายกรดมาเลอิก 23.2 กรัม ในน้ำกลั่น 1,600 มิลลิลิตร ทำการปรับพีเอชให้เป็น 6.0 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลาร์ จากนั้นจึงเติมแคลเซียมคลอไรด์ ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 0.6 กรัม และโซเดียมเอซิด 0.4 กรัม และปรับปริมาตรให้เป็น 2 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น (เก็บที่ 4 องศาเซลเซียสได้นาน 12 เดือน)

6.3.2 การเตรียมโซเดียมแอซิเตทบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 1.2 โมลาร์ พีเอช 3.8

เติมกรดแอซติก 69.6 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร ทำการปรับพีเอชให้เป็น 3.8 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลาร์ จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น (เก็บที่อุณหภูมิห้องได้นาน 12 เดือน)

6.3.3 การเตรียมโซเดียมแอซิเตทบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ พีเอช 4.5

เติมกรดแอซติก 5.8 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 900 มิลลิลิตร ทำการปรับพีเอชให้เป็น 4.5 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลาร์ จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น (เก็บที่ 4 องศาเซลเซียสได้นาน 12 เดือน)

6.3.4 การเตรียมโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์

ละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 112.2 กรัม ลงใน deionised water 900 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร

6.3.5 การเตรียม Aqueous IMS ร้อยละ 50 ปริมาตร โดยปริมาตร

เจือจางเอธานอล 500 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น 1 ลิตร

6.3.6 การเตรียม Dilute Amyloglucosidase solution ความเข้มข้น 300 U/ml

เจือจางสารละลาย Amyloglucosidase (AMG) เข้มข้น 2 มิลลิลิตร ลงในสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมมาลิเอท ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (ข้อ 2.3.1) 22 มิลลิลิตร (สามารถเก็บที่ -20 องศาเซลเซียสได้ 5 ปี)

หมายเหตุ

- แบ่งใส่หลอดๆละ 5 มิลลิลิตร และเก็บแช่แข็งใน polypropylene container ในระหว่างการใส่

6.3.7 การเตรียม Pancreatic α -amylase (10mg/ml) plus AMG (3 U/ml)

ละลาย Pancreatic α -amylase 1 กรัม ลงในสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมมาลิเอท ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (ข้อ 2.3.1) 100 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติม Dilute Amyloglucosidase solution ความเข้มข้น 300 U/ml (ข้อ 2.3.5) 1 มิลลิลิตร และผสมให้เข้ากันดี เหยี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 1,500g เป็นเวลา 10 นาที

หมายเหตุ

- สารละลายควรใช้ในวันที่เตรียม

6.3.8 Glucose oxidase-peroxidase-aminoantipyrine reagent (GOPOD)

เจือจาง Glucose oxidase-peroxidase-aminoantipyrine reagent ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร

6.3.9 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น

ละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนอโทฟอสเฟต 136 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 42 กรัม และเตตระไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิด 30 กรัม ในน้ำกลั่น 900 มิลลิลิตร ปรับให้เป็นพีเอช 7.4 ด้วยไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์

6.4 วิธีการวิเคราะห์

6.4.1 วิธีการย่อยและการละลาย non-resistant starch

ชั่งตัวอย่าง 100 ± 5 มิลลิกรัมลงในหลอดแก้ว เดิม Pancreatic α -amylase (10mg/ml) ที่ผสมกับ AMG (3 U/ml) (ข้อ 2.3.6) 4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นเติมเอธานอลความเข้มข้นร้อยละ 99 ปริมาตร 4 มิลลิลิตรลงในแต่ละหลอด เขย่าให้เข้ากัน นำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 1,500g (3,000 rpm) เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสออกและละลายตะกอนด้วย Aqueous IMS ร้อยละ 50 (ข้อ 2.3.4) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เดิม Aqueous IMS ร้อยละ 50 (ข้อ 2.3.4) อีก 6 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 1,500g (3,000 rpm) เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสออก ทำซ้ำอีก 1 ครั้ง และใช้กระดาษซับน้ำส่วนเกินออก

6.4.2 วิธีการหาปริมาณ resistant starch

นำตัวอย่างจากข้อ 2.4.1 มาใส่แท่งแม่เหล็ก (ขนาด 4×12 มิลลิเมตร) และเติมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 มิลลิลิตร เข้มข้น 2 โมลาร์ ลงในแต่ละหลอด กวนสารในหลอด ใน

อ่างน้ำแข็งบนเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก เป็นเวลา 20 นาที เติมสารละลายบัฟเฟอร์ โซเดียมแอซิเตท ความเข้มข้น 1.2 โมลาร์ ที่พีเอช 3.8 (ข้อ 2.3.2) ลงในแต่ละหลอด 8 มิลลิลิตร เติมสาร AMG (3300 Units/ml) 0.1 มิลลิลิตร ลงในแต่ละหลอด ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปป่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ทันที เป็นเวลา 30 นาที (เขย่าเป็นช่วงๆ) จากนั้นนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 1,500g (3,000 rpm) เป็นเวลา 10 นาที ทำการดูดส่วนใส 0.1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติม GOPOD (ข้อ 2.3.7) ปริมาตร 3 มิลลิลิตรลงในแต่ละหลอด ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปป่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสทันที เป็นเวลา 20 นาที วัดความเข้มสีโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร โดยปรับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแบลงค์เท่ากับ 0

หมายเหตุ

- สำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณ resistant starch มากกว่าร้อยละ 10 ทำการเจือจางตัวอย่างโดยใช้ขวดน้ำกลั่นค่อยๆ ไล่สารที่อยู่ในหลอดมาไว้ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรจนเป็น 100 มิลลิลิตร

- การเตรียมสารละลายแบลงค์ เตรียมโดยการนำสารละลายบัฟเฟอร์ โซเดียมแอซิเตท ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ที่พีเอช 4.5 (ข้อ 2.3.3) 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD (ข้อ 2.3.7) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปป่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสทันที เป็นเวลา 20 นาที

6.5 วิธีการคำนวณ

6.5.1 สำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณ RS มากกว่าร้อยละ 10

$$\text{Resistant starch (กรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม)} = \frac{\Delta E \times F \times 90}{W}$$

6.5.2 สำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณ RS น้อยกว่าร้อยละ 10

$$\text{Resistant starch (กรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม)} = \frac{\Delta E \times F \times 9.27}{W}$$

หมายเหตุ

ΔE = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

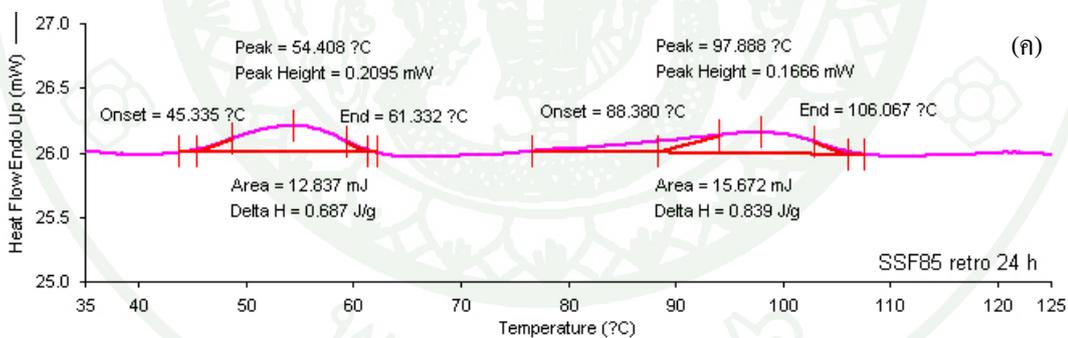
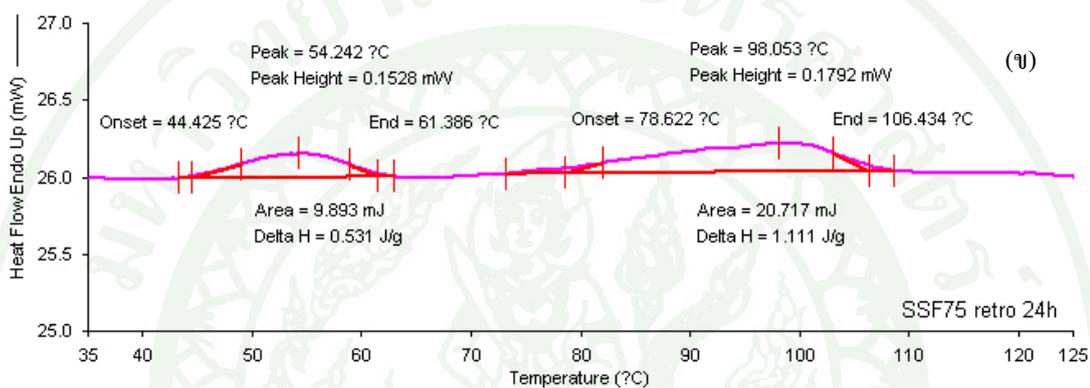
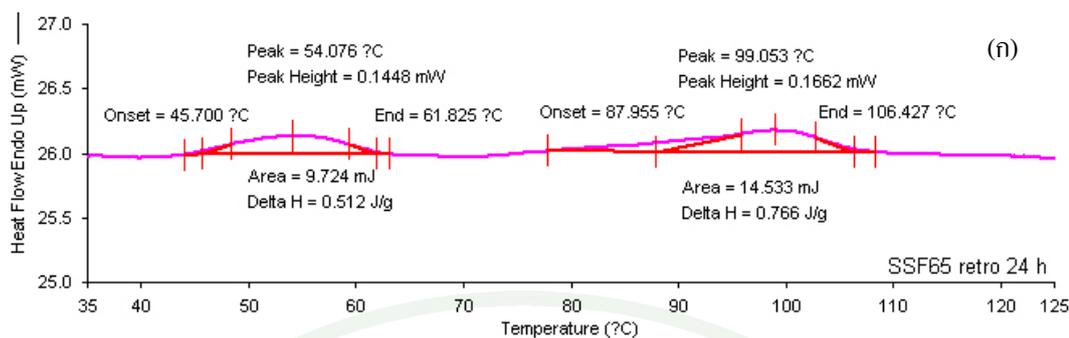
F = ค่าของส่วนกลับจากค่าดูดกลืนแสงไปเป็นไมโครกรัม

W = น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (มิลลิกรัม)

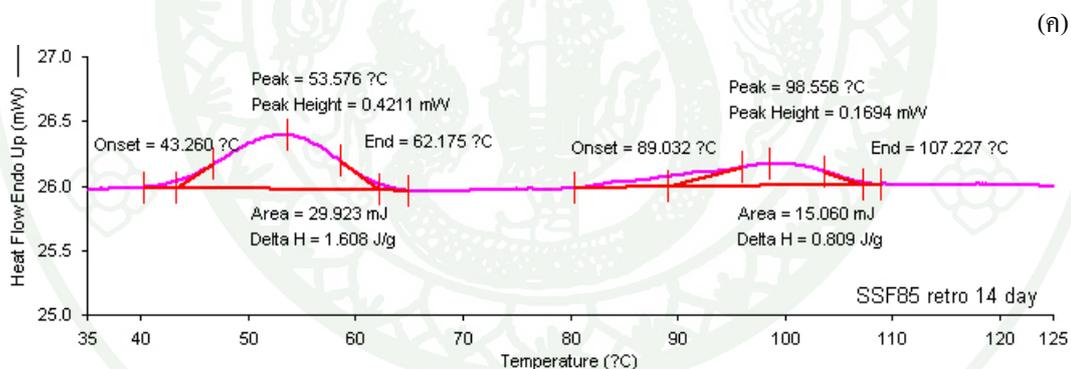
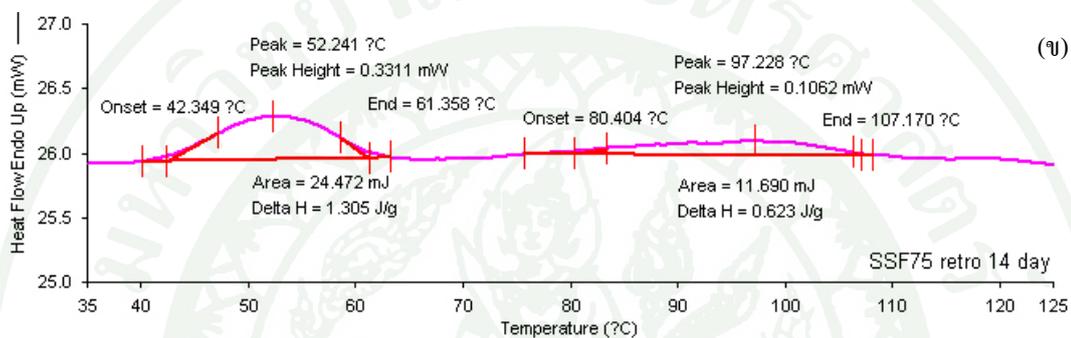
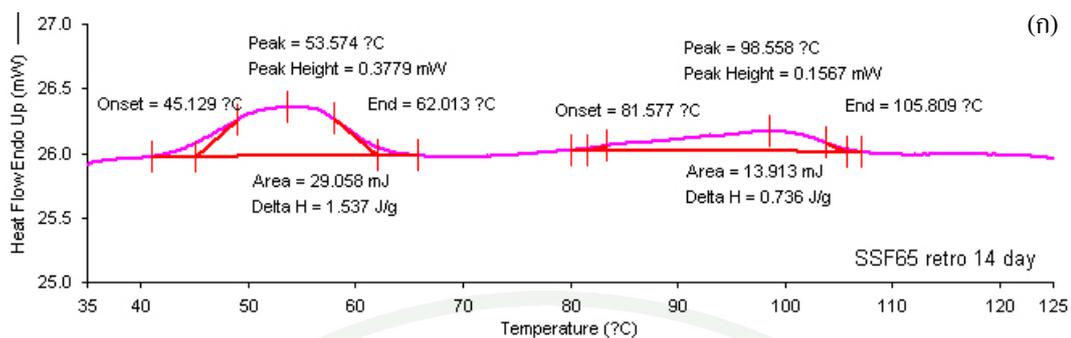




ภาคผนวก ค
สมบัติการเกิดรีโทรเกรดชัน



ภาพผนวกที่ ค1 สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อเก็บรักษาไว้ 1 วัน SSF65 (ก), SSF75 (ข), SSF85 (ค)



ภาพผนวกที่ ค2 สมบัติการเกิดรีโทรเกรดชันเมื่อเก็บรักษาไว้ 14 วัน SSF65 (ก), SSF75 (ข), SSF85 (ค)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นางสาวหทัยชนก บัววาริ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	2 พฤษภาคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดสุราษฎร์ธานี
ประวัติการศึกษา	วท. บ. (วิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-