



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

ปริญญา

.....
วิทยาศาสตรการอาหาร

.....
วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การดัดแปรแป้งและสตาร์ชกล้วยน้ำว้า (*Musa* (ABB) sp.) ด้วยวิธีพรีเจลลาทีไนซ์

The Modification of *Musa* (ABB) sp. 'Kluai Namwa' (banana) Flour and Starch by
Pregelatinization Method

นามผู้วิจัย นางสาวปัญญรัตน์ โสภิษฐ์ประภา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มาศอุบล ทองงาม, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์อรอนงค์ นัยวิกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะบุญย์ สัจจอนันตกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดัดแปรแป้งและสตาร์ชกล้วยน้ำว้า (*Musa* (ABB) sp.) ด้วยวิธีพรีเจลาทีไนซ์

The Modification of *Musa* (ABB) sp. 'Kluai Namwa' (banana) Flour and Starch
by Pregelatinization Method

โดย

นางสาวปัญญรัตน์ โสภิษฐ์ประภา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

พ.ศ. 2553

ปัญญรัตน์ โศภิตฐ์ประภา 2553: การดัดแปรแป้งและสตาร์ชกล้วยน้ำว้า (*Musa* (ABB) sp.) ด้วยวิธี
พรีเจลาไทไนซ์ ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร
ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
มาศอุบล ทองงาม, Ph. D. 137 หน้า

แป้งกล้วยมีข้อจำกัดในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากความสามารถในการละลายและการพองตัว
ที่ต่ำ พรีเจลาไทไนซ์เป็นวิธีการดัดแปรทางกายภาพ ซึ่งนิยมใช้ในการเตรียมสตาร์ชที่ละลายน้ำเย็น งานวิจัยนี้ได้ทำการ
ดัดแปรแป้งกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีพรีเจลาไทไนซ์ โดยใช้วิธีการทำแห้ง 2 แบบ คือ เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่
(double drum drier: DNWF) โดยมีระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15, 0.25 และ 0.35 มิลลิเมตร และเครื่องทำแห้งแบบพ่น
ฝอย (spray drier: SNWF) โดยเตรียมสารละลายที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที ก่อน
นำไปทำให้แห้ง จากนั้นจึงตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของ
ส่วนประกอบอาหารต่อสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างแป้งกล้วยดัดแปร เมื่อวิเคราะห์สัณฐานของตัวอย่างแป้งดัดแปร
ปรากฏความเป็นสเฟียลิ่งมากขึ้น การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NWF และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร พบว่า
ลักษณะรูปร่างของสตาร์ชแกรนูลกล้วยน้ำว้ามีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีทั้งที่เป็นทรงเปลือกหอยและทรงกลม
ในขณะที่รูปร่างสตาร์ชแกรนูลของ DNWF พบว่ามีรูปร่างเป็นแผ่น อย่างไรก็ตามลักษณะแกรนูล ของแป้ง SNWF มี
ขนาดที่ใหญ่ขึ้น มีลักษณะเหมือนกับสตาร์ชแกรนูลที่มีการพองตัวไปแล้วบางส่วน เมื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วย
เครื่อง X-ray diffractometer พบว่า NWF และ SNWF มีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นชนิด B ในขณะที่ DNWF สูญเสีย
ความเป็นผลึก เมื่อนำ SNWF มาตรวจสอบโครงสร้างผลึก พบว่าฟิสิกส์ต่างๆที่มีอยู่เดิม รวมทั้งดัชนีความเป็นผลึกลดลงเมื่อ
ตัวอย่างได้รับความร้อนสูงขึ้นก่อนการทำแห้ง ภายหลังการดัดแปรพบว่าความสามารถในการละลายของ DNWF สูงขึ้น
ในขณะที่ความสามารถในการละลายและการพองตัวของ SNWF ลดลง แต่พบว่าแป้งดัดแปรมีความสามารถในการดูดซับ
น้ำสูงกว่า NWF เมื่อตรวจสอบช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาไทไนเซชันพบว่า ในตัวอย่าง NWF มีอุณหภูมิการเกิด
เจลาไทไนเซชันเท่ากับ 74.55 องศาเซลเซียส และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเท่ากับ 14.18 จูลต่อกรัม ภายหลังการดัดแปร
พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาไทไนเซชันและเอนทัลปีของ DNWF ลดลง ในขณะที่ตัวอย่าง SNWF มีอุณหภูมิการเกิด
เจลาไทไนเซชันเพิ่มสูงขึ้น และเอนทัลปีลดลงเมื่อตัวอย่างได้รับความร้อนสูงขึ้นก่อนการทำแห้ง เมื่อวัดความหนืดของ
ตัวอย่างแป้งดัดแปร DNWF พบว่า สามารถเกิดความหนืดได้ทันทีแต่มีความหนืดลดลง อย่างไรก็ตามตัวอย่างแป้งกล้วย
น้ำว้าดัดแปร SNWF มีความหนืดที่แตกต่างไปจากแป้งกล้วยดิบ คือมีอุณหภูมิของความหนืดเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้นและมีความ
หนืดต่ำกว่า จากการทดลองพบว่าการดัดแปรมีผลทำให้ปริมาณของ resistant starch (RS) เปลี่ยนแปลง โดยพบว่าแป้งดัด
แปร DNWF มีปริมาณของ RS ต่ำกว่าร้อยละ 1.2 ในขณะที่แป้งดัดแปร SNWF ยังคงมีปริมาณ RS สูงกว่าร้อยละ 30 เมื่อ
ศึกษาอิทธิพลของส่วนประกอบอาหารต่อสมบัติด้านความหนืดของ NWF และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร พบว่าน้ำตาลและ
เกลือมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงขึ้น และมีค่าความหนืดต่ำลง

Panyarat Sophitprapa 2010: The Modification of *Musa* (ABB) sp. 'Kluai Namwa' (banana) Flour and Starch by Pregelatinization Method. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Masubon Thongngam, Ph.D. 137 pages

Banana flour is not commonly used in food industry due to their poor swelling power and solubility.

Pregelatinization is a physical modification, usually used to prepare cold water soluble starch. Pregelatinized banana flour was prepared by using Thai banana cultivar *Musa* (ABB) sp. 'Kluai Namwa' with two drying methods: double drum drier (DNWF) and spray drier (SNWF). For drum drier, the drum gaps were varied (0.15, 0.25 and 0.35 mm). For spray drier, the preheat treatments of flour suspensions were investigated by varying temperature (65, 75 and 85 °C). All modified banana flours were then examined for their physical, chemical and physicochemical properties. Furthermore, the effect of food ingredients on pasting properties of modified flours was investigated. After modification, both modified methods yielded more yellowish flour. The morphological of native and modified flours were observed by Light microscope and Scanning electron microscope. The starch granules of NWF had elongated and spheroid shape. On the other hand, the DNWF appeared flake-like shape. However, the SNWF still showed intact starch granules like native but some swollen starches were observed. NWF and SNWF both displayed the typical B-type X-ray diffraction pattern; whereas DNWF had loss their crystallinity. When compared the XRD pattern among SNWF samples, the results showed that as the preheated temperature increased, the peak intensity decreased. When swelling power (SP) of NWF and SNWF was determined, the SP of SNWF was slightly decreased as compared to that of native. After modification, the cold water soluble properties of DNWF were higher; whereas that of SNWF were lower than native. However, the water retentions of both DNWF and SNWF were increased. The gelatinization temperature of NWF was 74.55°C and the transition enthalpy was 14.18 J/g. After modification, the gelatinization temperature and enthalpy (J/g) of DNWF was decreased. In addition, as the preheated temperature increased, the gelatinization temperature of SNWF was increased; whereas their enthalpy was decreased. All DNWF samples showed an instant increase of viscosity but their peak viscosity decreased. For SNWF samples, they had higher pasting temperature and lower viscosity profile compared to native. After modification, resistant starch (RS) content was changed. The RS content of all DNWF samples were lower than 1.2%; whereas that of all SNWF samples were higher than 30%. Then the effect of food ingredients to pasting properties of NWF and modified flours was carried out. The results showed that the pasting temperature of all samples increased but their pasting profiles decreased when added salt and sugar.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีนั้น ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาณุพล ทองงาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และศาสตราจารย์ ดร. อรอนงค์ นัยวิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้ความเอาใจใส่ ช่วยเหลือและให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนการทำวิจัย รวมถึงตรวจแก้วิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. สิริชัย ส่งเสริมพงษ์ ประธานการสอบ และ ดร. เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้วิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำ จนวิทยานิพนธ์สำเร็จเรียบร้อย

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสาทความรู้ ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดการศึกษา และเจ้าหน้าที่ภาควิชา วิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่านที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทำวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นิสิตปริญญาโทและเอก สาขา วิทยาศาสตร์การอาหารทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆ และญาติทุกคนที่คอยอบรมเลี้ยงดู ให้คำปรึกษาและกำลังใจมาโดยตลอด ตลอดจนให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาเป็นอย่างดี หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้าขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ปัญญารัตน์ โสภิษฐ์ประภา

มกราคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	40
ผลและวิจารณ์	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	90
สรุป	90
ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	93
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของแป้งจากกล้วยน้ำว้า	107
ภาคผนวก ข ลักษณะด้านสัณฐานวิทยาของแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปร SNWF	
เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	124
ภาคผนวก ค การเปลี่ยนแปลงลักษณะด้านสัณฐานวิทยาของสตาร์ชกล้วยน้ำว้า	
และสตาร์ชกล้วยน้ำว้าตัดแปร SNWS เมื่อมีการให้ความร้อน	126
ภาคผนวก ง การตรวจสอบสมบัติด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้า	128
ภาคผนวก จ อิทธิพลของส่วนประกอบอาหารต่อสมบัติด้านความหนืด	
ของแป้งกล้วยน้ำว้า	130
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	137

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขนาดสสารชเกรนุลกล้วยสายพันธุ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย	10
2	องค์ประกอบทางเคมีของสสารชกล้วยสายพันธุ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย	12
3	อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตไนซ์ของสสารชกล้วยสายพันธุ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย	13
4	ร้อยละของผลได้ของแป้งกล้วยน้ำว้าและลักษณะของแป้งเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า	47
5	สีของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและดัดแปร	49
6	แสดงค่าร้อยละความเป็นผลึกของแป้งกล้วย NWF และแป้งกล้วยดัดแปร SNWF	56
7	แสดงค่าร้อยละความเป็นผลึกของสสารชกล้วย NWS และสสารชกล้วยดัดแปร SNWS	57
8	ความสามารถในการละลายน้ำเย็นของแป้งกล้วยน้ำว้า	62
9	ความสามารถในการละลายน้ำเย็นของสสารชกล้วยน้ำว้า	63
10	สมบัติเชิงความร้อนในเกิดเจลลิตไนซ์ของแป้งกล้วยน้ำว้า	66
11	สมบัติเชิงความร้อนในเกิดเจลลิตไนซ์ของสสารชกล้วยน้ำว้า	67
12	สมบัติเชิงความร้อนในเกิดรีโทรเกรเดชันภายในเวลา 24 ชั่วโมงของแป้งกล้วยน้ำว้า	69
13	สมบัติเชิงความร้อนในเกิดรีโทรเกรเดชันภายในเวลา 14 วันของแป้งกล้วยน้ำว้า	70
14	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วยน้ำว้า	78
15	ปริมาณ resistant starch ที่พบในแป้งจากกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและกล้วยน้ำว้าดัดแปร	80
16	ปริมาณ resistant starch ที่พบในสสารชจากกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและกล้วยน้ำว้าดัดแปร	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 สภาวะที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลา	122
ง1 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร	129
จ1 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ เมื่อเติมน้ำตาลซูโครสในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน	131
จ2 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร DNWF เมื่อเติมน้ำตาลซูโครสในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน	132
จ3 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF เมื่อเติมน้ำตาลซูโครสในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน	133
จ4 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ เมื่อเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน	134
จ5 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร DNWF เมื่อเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน	135
จ6 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF เมื่อเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน	136

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การจำแนกสายพันธุ์ของกล้วยตามกลุ่มของจีโนม	5
2 กล้วยน้ำว้า	6
3 รูปร่างตามขวางของผลกล้วยเมื่ออายุต่างกัน	7
4 การเปรียบเทียบปริมาณสตาร์ชและน้ำตาลในระหว่างการสุกของกล้วย	8
5 ลักษณะสตาร์ชแกรนูลกล้วย (เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)	10
6 ลักษณะสตาร์ชแกรนูลจากกล้วยดิบและกล้วยสุกเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	11
7 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการพองตัวและการละลายของสตาร์ชชนิดต่างๆ	13
8 แผ่นแป้งแอมิโลพลาสต์ (amyloplast) ที่พัฒนามาจากพลาสติด (plastids)	14
9 โครงสร้างของแอมิโลส	16
10 การเกิดสารเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไอโอดีน	16
11 โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน	17
12 ลักษณะโครงสร้างของแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสายโซ่ A, B และ C	18
13 โครงสร้างของสตาร์ชและการเกิดเป็นเกลียวคู่ของแอมิโลเพกทิน	18
14 การเรียงลำดับชั้นของส่วนอสัณฐานและส่วนโครงสร้างผลึกทำให้เกิดลักษณะเป็นวงแหวน (growth ring) และวงแหวน (growth ring) ของสตาร์ชแกรนูล (เมื่อส่องด้วยกล้อง SEM)	20
15 โครงสร้างแบบ A และ B	21
16 การเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชแกรนูล	22
17 การเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชแกรนูลและการเปลี่ยนแปลงความหนืด	23
18 ลักษณะแกรนูลสตาร์ชของ resistant starch type I และ resistant starch type II	26
19 ลักษณะการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลแอมิโลส ในการเกิดโครงสร้างแบบเกลียวคู่และทำให้เกิดสมบัติความเป็น resistant starch type III	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการทางเคมี และทำให้เกิด resistant starch type IV	27
21	เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่	31
22	เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย	33
23	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชเกรนุลกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านและแบบบิกระนาบแสง ที่กำลังขยาย 100 เท่า	50
24	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชเกรนุล DNWF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านและแบบบิกระนาบแสง ที่กำลังขยาย 100 เท่า	51
25	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชเกรนุล SNWF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านและแบบบิกระนาบแสง ที่กำลังขยาย 100 เท่า	51
26	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร ที่กำลังขยาย 500 เท่า	52
27	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF และสตาร์ชกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWS ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า	53
28	รูปแบบการสะท้อนรังสีเอกซ์ของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (NWF) และสตาร์ชกล้วยน้ำว้า (NWS) ทดสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)	54
29	รูปแบบการสะท้อนรังสีเอกซ์ของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปรทดสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)	55
30	รูปแบบการสะท้อนรังสีเอกซ์ของสตาร์ชกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (NWS) และสตาร์ชกล้วยน้ำว้าดัดแปร (SNWS)	57
31	กำลังการพองตัวของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF	58
32	กำลังการพองตัวของสตาร์ชกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและสตาร์ชกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWS	59
33	การเปลี่ยนแปลงลักษณะด้านสัณฐานวิทยาของสตาร์ชเกรนุล เมื่อให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
34 ค่าการดูดซับน้ำ (water retention capacity) ของแป้งกล้วยน้ำว้า	64
35 ค่าร้อยละการเกิดรีโทเกรเดชันของแป้งกล้วยน้ำว้าที่เก็บรักษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 14 วัน	71
36 ค่าความหนืดในน้ำเย็นจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร	73
37 อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็วของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF	74
38 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็วของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่	75
39 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปรโดยการให้ความร้อนแก่สารละลายก่อนนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย	76
40 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติในระบบที่มีการเติมน้ำตาลร้อยละ 5, 10 และ 20	83
41 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร DNWF ในระบบที่มีการเติมน้ำตาลร้อยละ 5, 10 และ 20	84
42 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF ในระบบที่มีการเติมน้ำตาลร้อยละ 5, 10 และ 20	85
43 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติในระบบที่มีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5, 10 และ 20	87
44 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร DNWF ในระบบที่มีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5, 10 และ 20	88
45 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF ในระบบที่มีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5, 10 และ 20	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ปริมาณแอมิโดสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน	114
ข1 ลักษณะด้านสัณฐานวิทยาของแป้งกล้วยน้ำว่าดัดแปร SNWF75 และ SNWF85 เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500 เท่า	125
ค1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะด้านสัณฐานวิทยาของสตาร์ชเกรนูล เมื่อให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ของสตาร์ชกล้วยน้ำว่าธรรมชาติและสตาร์ชกล้วยน้ำว่าดัดแปร SNWS	127

การดัดแปรและสตาร์ชกล้วยน้ำว้า (*Musa* (ABB) sp.) ด้วยวิธีพรีเจลาทีไนซ์

The Modification of *Musa* (ABB) sp. 'Kluai Namwa' (banana) Flour and Starch by Pregelatinization Method

คำนำ

กล้วยเป็นพืชลำต้นอ่อนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก ส่วนใหญ่มักจะเจริญเติบโตแถบบริเวณเขตร้อนชื้นอีกทั้งยังเป็นพืชที่ให้พลังงานกับประชากรที่อาศัยอยู่ในประเทศกำลังพัฒนา นอกจากนี้ในประเทศที่พัฒนาแล้วกล้วยมีความสำคัญเป็นอันดับ 4 รองมาจากธัญชาติจำพวกข้าว ข้าวสาลี และข้าวโพด (Waliszewska *et al.*, 2003)

ประเทศไทยอยู่ในบริเวณเขตร้อนชื้นจึงมีผลผลิตจากกล้วยเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะกล้วยน้ำว้า มีพื้นที่เพาะปลูกคิดเป็นร้อยละ 81 ของพื้นที่การเพาะปลูกกล้วยทั้งประเทศ ผลผลิตคิดเป็นร้อยละ 76 ของผลผลิตกล้วยทั้งหมด แต่มีการส่งออกน้อยกว่ากล้วยหอมทองและกล้วยไข่ (เบญจมาศ, 2545) ทำให้มีปริมาณกล้วยที่เป็นผลสดเกินความต้องการของผู้บริโภคภายในประเทศ และเกิดการเน่าเสียของผลสดในแต่ละครั้งเป็นจำนวนมาก จึงใช้การแปรรูปกล้วยหรือการเพิ่มมูลค่ากล้วยด้วยการสร้างความหลากหลายของสินค้า เช่น อาหารกระป๋อง พิวรีส์ (Purees) อาหารเด็กอ่อน อาหารเสริมสำหรับคนไข้พิเศษ เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ ซอสกล้วย แยม กล้วยแช่เยือกแข็ง แป้งกล้วย สตาร์ชกล้วย เส้นใยกล้วย ฯลฯ

ในกล้วยดิบจะมีองค์ประกอบของแป้งมาก ซึ่งในแป้งกล้วยจะมีส่วนประกอบหลักที่เป็นสตาร์ชและเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ได้มีผู้วิจัยพบว่ากล้วยในระยะดิบมีปริมาณสตาร์ชสูง (มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักแห้ง) กล้วยจึงสามารถนำมาแปรรูปเป็นแป้งและสตาร์ช สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งทรัพยากรสำคัญสำหรับอาหารและอุตสาหกรรมได้ (Waliszewska *et al.*, 2003) แต่การนำแป้งที่ได้จากกล้วยไปประยุกต์ใช้ยังค่อนข้างจำกัด เนื่องจากแป้งกล้วยมีคุณสมบัติในการละลายน้ำและการพองตัวต่ำกว่าแป้งชนิดอื่นๆ ที่นิยมใช้กันอยู่ในท้องตลาด ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาและดัดแปรแป้งกล้วยเพื่อให้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำที่ดีขึ้น โดยศึกษาการดัดแปรแป้งกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีพรีเจลาทีไนซ์ ทำให้ทราบถึงข้อมูลที่เป็นทั้งสมบัติทางกายภาพ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ภายหลังการดัดแปร โดยสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร หรือเพื่อใช้ปรับปรุงผลิตภัณฑ์ต่างๆ สำหรับ

งานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์การอาหารของกล้วยพบว่าสตาร์ชกล้วยดิบมีคุณสมบัติเป็น resistant starch (RS) ที่ทนต่อการย่อยของเอนไซม์ในร่างกายของมนุษย์ ทำให้ระบบลำไส้ภายในร่างกายสมดุลและยังเหมาะสำหรับใช้เป็นอาหารเพื่อสุขภาพ แต่เมื่อนำแป้งที่มีคุณสมบัติเป็น resistant starch (RS) ผ่านกระบวนการการตัดแปรโดยให้ความร้อนอาจส่งผลต่อรูปแบบของ resistant starch และอาจมีผลต่อปริมาณ resistant starch ในงานวิจัยจึงตรวจสอบปริมาณ RS เมื่อแป้งผ่านกระบวนการตัดแปร



วัตถุประสงค์

1. ผลิตและตรวจสอบปริมาณแป้งกล้วยน้ำว่าที่ดัดแปรด้วยวิธีพรีเจลาทีไนซ์ที่แตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งกล้วยน้ำว่าที่ดัดแปรด้วยวิธีพรีเจลาทีไนซ์
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการดัดแปรต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ resistant starch
4. เพื่อศึกษาอิทธิพลของส่วนประกอบอาหารต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว่าและแป้งกล้วยน้ำว่าดัดแปร

การตรวจเอกสาร

กล้วยเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในภาคพื้นเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (South East Asian Fruits) ปัจจุบันมีการเพาะปลูกอยู่ทั่วไปในแถบศูนย์สูตร ในประเทศที่มีดินฟ้าอากาศเหมาะสมแก่การเพาะปลูก และมีผลผลิตของกล้วยเพื่อบริโภคในท้องถิ่น มีทั้งประเทศในทวีปแอฟริกา เอเชีย และหมู่เกาะในมหาสมุทรแปซิฟิก (สมศักดิ์, 2546)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกล้วย

1. สายพันธุ์ของกล้วย

กล้วยเป็นไม้ล้มลุกขนาดใหญ่ มีอายุหลายปี อยู่ในวงศ์ Musaceae ลำต้นที่แท้จริงของกล้วยเกิดเป็นเหง้าอยู่ใต้ผิวดิน ลำต้นที่มองเห็นเป็นลำต้นเทียม ประกอบไปด้วยกาบใบที่อัดกันแน่น ทรงพุ่ม ส่วนบนของลำต้นประกอบด้วยใบและช่อดอกที่เกิดมาจากจุดเจริญของเหง้า (สมศักดิ์, 2546)

ผลของกล้วยเป็นแบบผลมีเนื้อหลายเมล็ด (berry) เนื้อกล้วยที่รับประทานได้เกิดจากเนื้อเยื่อชั้นนอกของช่องว่างภายในรังไข่ กล้วยที่ปลูกนี้ส่วนใหญ่จะมีเกสรตัวเมียเป็นหมัน เมล็ดจะไม่มีการพัฒนาเพราะจะเหี่ยวและเป็นเพียงจุดเล็กๆสีน้ำตาล (สมศักดิ์, 2546)

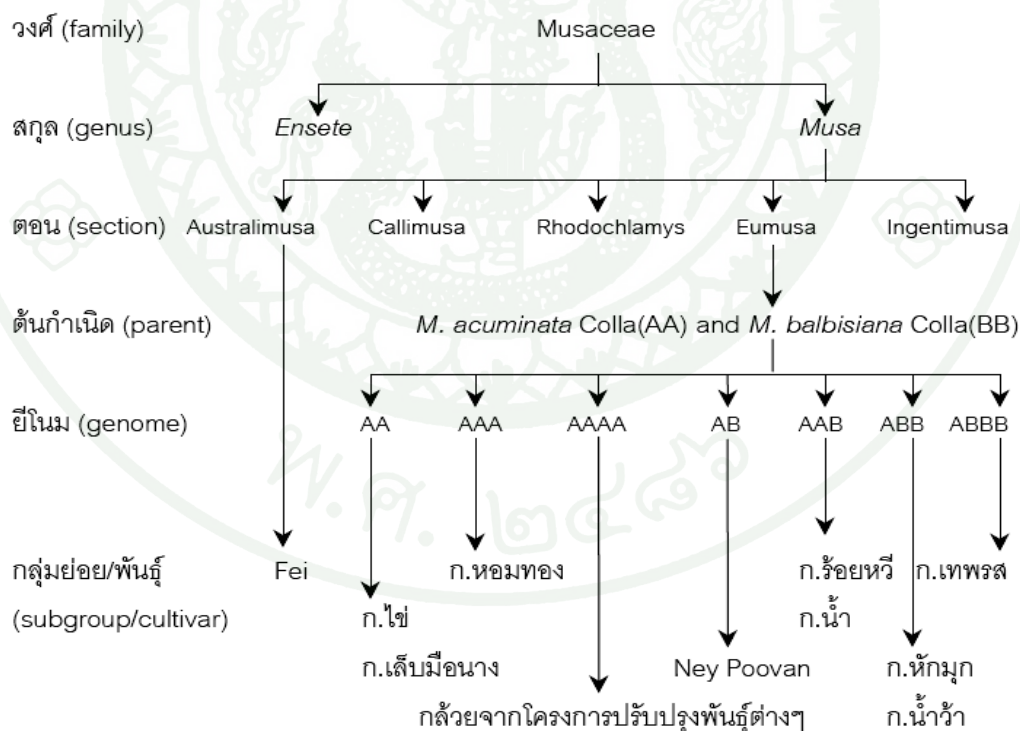
ผลกล้วยทั้งหมดบนก้านดอกรวมเรียกว่า เครือ (bunch) ส่วนผลกล้วยแต่ละกลุ่มแต่ละข้อเรียกว่า หวี (hand) ส่วนแต่ละผลเรียกว่า ผลกล้วย (finger) คุณภาพกล้วยหมายถึง จำนวนของหวีกล้วยในเครือ หนึ่งๆ กล้วยแต่ละพันธุ์จะมีความแตกต่างของผลในเรื่องของรูปร่าง สีเปลือก สีของเนื้อ รสชาติ และความละเอียดของเนื้อไม่เหมือนกัน กล้วยรับประทานสดจะมีปริมาณน้ำตาลสูง ส่วนกล้วยที่ใช้ปรุงอาหาร จะมีปริมาณของแป้งอยู่มาก (สมศักดิ์, 2546)

พืชในวงศ์ Musaceae จัดแบ่งออกได้เป็น 2 สกุล ตามลักษณะการแตกกอกคือ (ดวงแก้ว, 2544 และ สมศักดิ์, 2546)

- สกุลกล้วยโพน (Genus *Ensete*) เป็นกล้วยที่มีลำต้นเดี่ยว ไม่มีการแตกกอ ผลรับประทานไม่ได้ เมื่อให้เมล็ดแล้วต้นก็จะตายไป ใช้ทำแป้งหรือเอาเส้นใย

- สกุลกล้วยเตกกอ (Genus *Musa*) เป็นกล้วยที่มีปลุกกันอยู่ทั่วไป ลักษณะกล้วยจะแทงหน่อแตกกอไปเรื่อยๆ ต้นกล้วยประเภทนี้ขยายพันธุ์ด้วยหน่อ ผลสามารถนำมาใช้เป็นอาหารและรับประทานได้

Musa เป็นสกุลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 หมวด คือ *Eumusa*, *Australimusa*, *Callimusa*, *Rhodochlamys* และ *Ingentimusa* ดังภาพที่ 1 ซึ่งหมวด *Eumusa* เป็นกล้วยที่กินได้ ชนิดของกล้วยปลุกหรือกล้วยกินได้ เกิดมาจากกล้วยป่า 2 ชนิด (species) คือ *Musa acuminata* Colla (genome AA) และ *Musa balbisiana* Colla (genome BB) กล้วยทั้งสองสายพันธุ์สามารถผสมข้ามกันได้ จึงทำให้เกิดลูกผสมมากมายในธรรมชาติ และสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มโดยดูจากจำนวนชุดของจีโนมเป็นสำคัญได้เป็นกลุ่ม AA, AAA, AAAA, AB, AAB, ABB, AB BB, BB และ BBB แสดงดังภาพที่ 1 การจำแนกชนิดของกล้วยกินได้ และการนับจำนวนของโครโมโซม (chromosome) เป็นการบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ของกล้วยป่าที่เป็นบรรพบุรุษทั้งสองชนิด (วสันต์, 2543; เบญจมาศ, 2545)



ภาพที่ 1 การจำแนกสายพันธุ์ของกล้วยตามกลุ่มของจีโนม

ที่มา: เดช (2541)

2. กล้วยน้ำว้า [*Musa* (ABB group) ‘Kluai Namwa’]

กล้วยน้ำว้า (Kluai Namwa) (ภาพที่ 2) มีชื่อเรียกสามัญว่า Pisang Awak ชื่อวิทยาศาสตร์ *Musa* (ABB group) ‘Kluai Namwa’ นอกจากนี้ยังมีชื่อเรียกเป็นอย่างอื่นได้อีกหลายชื่อ เช่น กล้วยใต้ ตานี อ่อง มะลิอ่อง เป็นต้น (เบญจมาศ, 2545)

กลุ่ม ABB (ABB group) มีถิ่นกำเนิดแถบอินเดียและมาเลเซีย ลักษณะเครือมีผลไม่แน่น ผลใหญ่ มีเหลี่ยม เนื้อมีแป้งมาก ได้แก่ กล้วยหักมุก อีกชนิดหนึ่งคือลักษณะเครือมีผลเล็ก เมื่อสุกกินได้ เช่น กล้วยน้ำว้า ซึ่งในประเทศไทยมีการกลายพันธุ์ ทำให้เกิดกล้วยอีกหลายชนิด เช่น กล้วยน้ำว้าแดง กล้วยน้ำว้าค่อม และกล้วยน้ำว้าไส้เหลือง (ดวงแก้ว, 2544)



ภาพที่ 2 กล้วยน้ำว้า

ที่มา: นิรนาม (2551)

กล้วยน้ำว้าจัดเป็นพันธุ์กล้วยที่มีการปลูกมากที่สุดในประเทศไทย ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ได้ดีกว่ากล้วยชนิดอื่นๆ จัดเป็นพืชสารพัดประโยชน์ กล้วยน้ำว้ามีลำต้นเทียมสูงไม่เกิน 3.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 15 เซนติเมตร กาบลำต้นด้านนอกสีเขียวอ่อน ก้านใบมีร่องค่อนข้างแคบ เส้นกลางใบสีเขียว ก้านช่อดอกไม่มีขน ใบประดับรูปไข่ค่อนข้างป้อม ม้วนงอขึ้นปลายป้าน ด้านบนสีแดงอมม่วงมีนวล ด้านล่างสีแดงเข้ม เครือหนึ่งมี 7-10 หวี หวีหนึ่งมี 10-16 ผล ผลใหญ่กว่ากล้วยไข่ กว้าง 3-4 เซนติเมตร ยาว 11-13 เซนติเมตร มีเหลี่ยม ก้านผลยาว ผลมีความยาวใกล้เคียงกับกล้วยไข่แต่เปลือกหนากว่า เมื่อสุกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองปนน้ำตาล เนื้อสีขาว รสหวานที่แกนกลาง หรือเรียกว่าไส้กลาง มีสีเหลือง ชมพู หรือขาว (เบญจมาศ, 2545)

3. ระยะการเก็บเกี่ยวของกล้วย

กล้วยเป็นผลไม้ประเภท Climacteric คือ เมื่อผลสุกจะมีการหายใจเพิ่มขึ้น และต้องการเอทิลีนมาช่วยกระตุ้นให้เกิดการสุก เมื่อกล้วยสุกจะมีการสร้างเอทิลีนมากขึ้น กล้วยสุกจะมีการเปลี่ยนแปลงจากแข็งเป็นน้ำตาล สีผิวหรือเปลือกเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เนื้อในนุ่มขึ้นและมีกลิ่นหอม (เบญจมาศ, 2545) โดยทั่วไปการเก็บเกี่ยวกล้วยมักนิยมพิจารณาขนาดของเหลี่ยมกล้วยเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากความแก่ของผลกล้วยจะมีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับมุมของเหลี่ยมผล (สมศักดิ์, 2546) ดังภาพที่ 3 ที่แสดงมาตรฐานความแก่ของกล้วยโดยใช้เหลี่ยมของผลเป็นเกณฑ์ ทั้งนี้ระยะการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมอาจพิจารณาจากลักษณะอื่น เช่น การนับจำนวนวันของกล้วย โดยเริ่มนับจากวันที่ปลีกล้วยโผล่ออกมาให้เห็นจนถึงวันที่เก็บเกี่ยวได้ (สมศักดิ์, 2546)



ภาพที่ 3 รูปร่างตามขวางของผลกล้วยเมื่ออายุต่างกัน

- หมายเหตุ** Light $\frac{3}{4}$ หมายถึง ผลมีขนาดครึ่งหนึ่งของผลที่โตเต็มที่ มีความแก่ประมาณร้อยละ 70 นับจากวันแทงปลีประมาณ 15 สัปดาห์
- Light Full $\frac{3}{4}$ หมายถึง ผลที่มีเหลี่ยมชัด มีความแก่ประมาณร้อยละ 80 นับจากวันแทงปลีประมาณ 16 สัปดาห์
- Full $\frac{3}{4}$ หมายถึง ผลที่มีเหลี่ยมแต่ไม่ชัดเจน มีความแก่ประมาณร้อยละ 90 นับจากวันแทงปลีประมาณ 17 สัปดาห์
- Full หมายถึง ผลที่ไม่มีเหลี่ยมเลย เรียกว่าแก่เต็มที่ร้อยละ 100 นับจากวันแทงปลีประมาณ 18 สัปดาห์

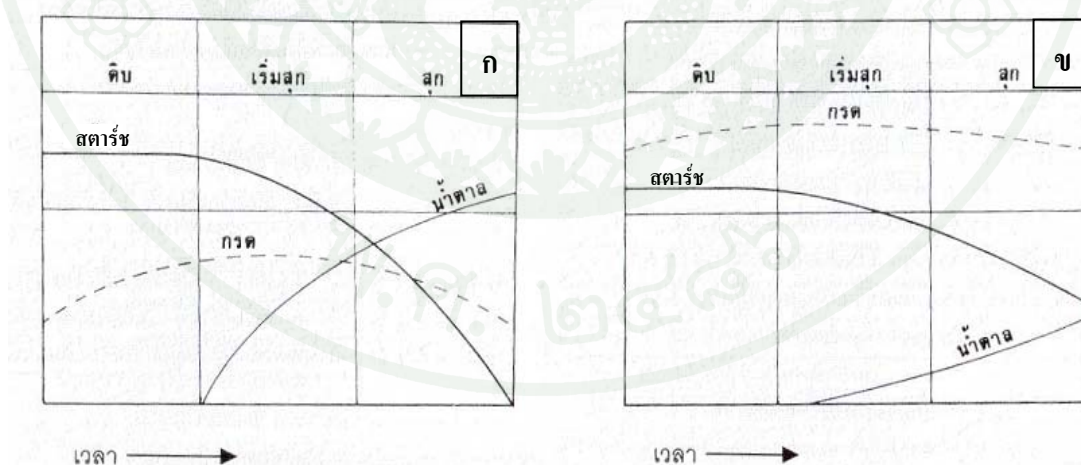
ที่มา: เบญจมาศ (2545)

สุดาพิทย์ (2545) ทำการผลิตสตาร์ชจากกล้วย โดยใช้กล้วยที่มีระดับความแก่ต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 70, 80, 90 และ 100 จากนั้นนำมาทำการวิเคราะห์ปริมาณสตาร์ช พบว่ากล้วยที่มีระดับความแก่ร้อยละ 90 มีปริมาณสตาร์ชสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 66 ของน้ำหนักกล้วย

ไพลาภา (2550) ได้ทำการสกัดแป้งและสตาrchจากกล้วย 3 สายพันธุ์ คือ กล้วยหอมทอง กล้วยน้ำว้า และกล้วยไข่ โดยเลือกกล้วยที่อายุการเก็บเกี่ยว 110-125 วันนับตั้งแต่ออกปลีกล้วย เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเกณฑ์ตัดสินความสุกของกล้วยพบว่า ลักษณะของผลกล้วยทั้ง 3 สายพันธุ์มีเหลี่ยมผลที่ชัดเจน สีผิวที่เปลือกเป็นสีเขียวไม่มีสีเหลืองปน ลักษณะของเนื้อมีสีขาวและแข็ง ซึ่งเป็นการยืนยันว่ากล้วยทั้ง 3 สายพันธุ์อยู่ในระยะดิบ และมีปริมาณของสตาrchสูง

4. ความสัมพันธ์ระหว่างสายพันธุ์กับระยะการสุกของกล้วยและองค์ประกอบทางเคมี

การสุกของกล้วยทำให้คุณค่าทางอาหารเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะสตาrchที่มีมากในผลกล้วยดิบจะเริ่มลดลง และเปลี่ยนเป็นน้ำตาลมากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นเมื่อกล้วยเริ่มมีการเปลี่ยนสี ในกล้วยกลุ่มที่มีจีโนม ABB เช่น กล้วยน้ำว้าและกล้วยหักมุก พบว่าปริมาณของสตาrchลดลง ความหวานมากขึ้นและมีปริมาณกรดค่อนข้างสูงกว่าในระยะดิบ (ดังภาพที่ 4ข) แต่การเปลี่ยนแปลงนี้ไม่มากเท่ากับกล้วยในกลุ่มจีโนม AA และ AAA เช่น กล้วยไข่และกล้วยหอม เมื่อกล้วยสุกปริมาณของสตาrchจะลดลงอย่างมาก สำหรับปริมาณของกรดตั้งแต่ดิบจนสุกค่อนข้างต่ำ (ดังภาพที่ 4ก) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า กล้วยน้ำว้าและกล้วยหักมุกมีสตาrchมากเมื่อดิบ แม้สุกสตาrchก็ยังมียู่ปริมาณมาก จึงทำให้เกิดความเหนียวและมีรสเปรี้ยวเล็กน้อย (เบญจมาศ, 2545)



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบปริมาณสตาrchและน้ำตาลในระหว่างการสุกของกล้วย

ก) กล้วยกลุ่ม AA และ AAA

ข) กล้วยกลุ่ม ABB

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก เบญจมาศ (2545)

ในระหว่างระยะเวลาการสุกของกล้วยจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีภายในผล กล้วยอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ส่วนปริมาณเถ้ามี ค่าสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ปริมาณของสตาร์ชจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด คือลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงระยะ ที่ผลกล้วยสุกเต็มที่ (ripening stage) ดังนั้นการสกัดสตาร์ชจากกล้วยจึงต้องคำนึงถึงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวของกล้วยที่ให้ปริมาณสตาร์ชมากที่สุด (Lii *et al.*, 1982)

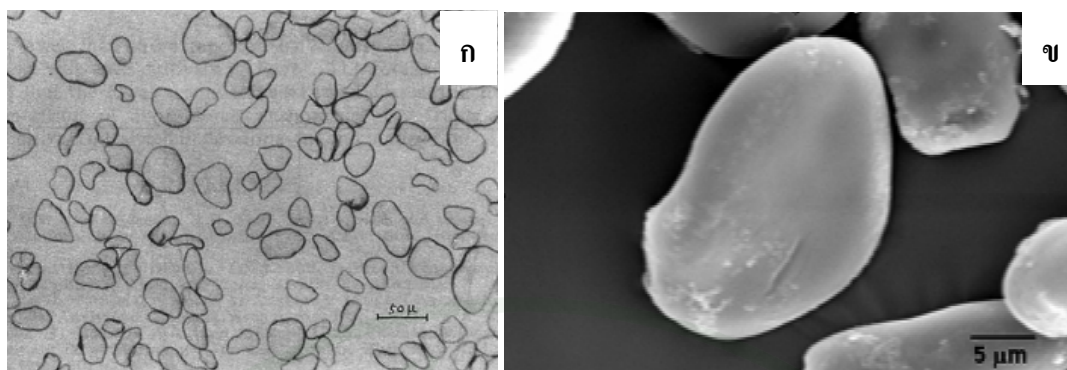
สมบัติของแป้งและสตาร์ชจากกล้วย

กล้วยเป็นพืชลำต้นอ่อนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก ส่วนใหญ่มักจะเจริญเติบโตแถบบริเวณเขตร้อนชื้นอีกทั้งยังเป็นพืชที่ให้พลังงานกับประชากรที่อาศัยอยู่ในประเทศกำลังพัฒนา นอกจากนี้ในประเทศที่พัฒนาแล้วกล้วยมีความสำคัญเป็นอันดับ 4 รองมาจากธัญพืชจำพวกข้าว ข้าวสาลี และข้าวโพด ทั้งนี้กล้วยเป็นผลไม้ตามฤดูกาล ในแต่ละครั้งให้ผลผลิตจำนวนมาก ซึ่งเกินความต้องการของผู้บริโภค ทำให้เกิดการเน่าเสียของผลสดเป็นจำนวนมาก ได้มีผู้วิจัยพบว่ากล้วยในระยะดิบมีปริมาณสตาร์ชสูง (มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักแห้ง) กล้วยจึงสามารถนำมาแปรรูปเป็นแป้งและสตาร์ช สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งทรัพยากรสำคัญสำหรับอาหารและอุตสาหกรรมได้ (Waliszewskia *et al.*, 2003)

1. สมบัติทางกายภาพ

การตรวจสอบลักษณะของสตาร์ชแกรนูลสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเป็นวิธีการที่รวดเร็วและง่าย โดยทั่วไปลักษณะที่ต้องทำการสังเกต คือ รูปร่าง ขนาด ตำแหน่งของไฮลัม (hilum) การกระจายตัวของสตาร์ชแกรนูล และสมบัติในการบิกระนาบแสง (birefringence) (Whistler and BeMiller, 1999)

ทั้งนี้สตาร์ชกล้วยมีลักษณะของโครงสร้างสตาร์ชแกรนูลไม่แน่นอน (ภาพที่ 5) กล้วยที่มีสายพันธุ์ต่างกันจะมีระยะการสุกของผลไม่เท่ากัน ซึ่งมีผลทำให้ขนาด รูปร่างสตาร์ชแกรนูลมีความแตกต่างกัน ขนาดที่พบมากที่สุดอยู่ในช่วงประมาณ 20-60 ไมโครเมตร (Zhang *et al.*, 2005) ดังตารางที่ 1 ที่แสดงขนาดสตาร์ชแกรนูลจากกล้วยสายพันธุ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย



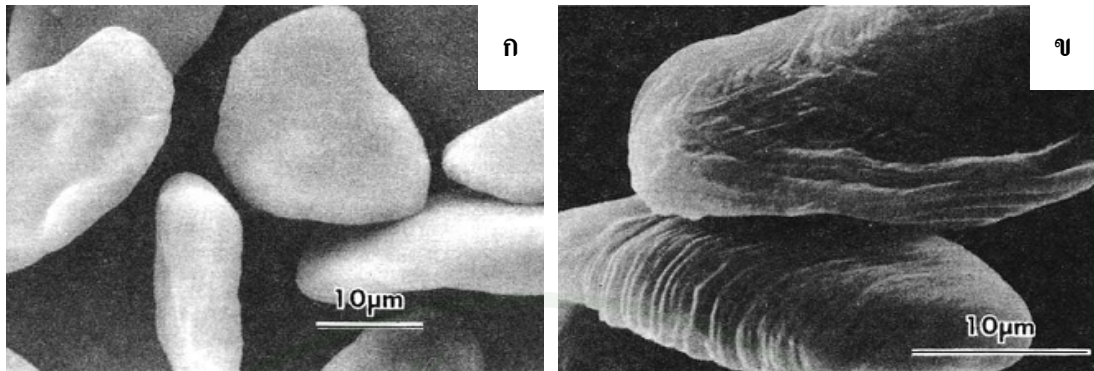
ภาพที่ 5 ก) ลักษณะสตาร์ชแกรนูลกล้วยเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านและ ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: Lii *et al.* (1982) และ Gonzalez-Sato *et al.* (2006)

ตารางที่ 1 ขนาดสตาร์ชแกรนูลกล้วยสายพันธุ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

พันธุ์กล้วย	ขนาดสตาร์ชแกรนูล (ไมโครเมตร)	แหล่งงานวิจัย
Valery (AAA)	7-50	Kayisu and Hood (1981)
Taiwan banana (ABB)	20-60	Lii <i>et al.</i> (1982)
Kluai Namwa Kom (ABB)	15.23-55.07	วสันต์ (2543)
Kluai Hak muk (ABB)	13.20-66.71	วสันต์ (2543)
Kluai Ta Nee (BB)	7.93-24.63	วสันต์ (2543)
Valery (AAA)	14-108	Waliszewskia <i>et al.</i> (2003)
Macho (AAB)	8-20	Millan-Testa <i>et al.</i> (2005)
Kluai Hom Thong (AAA)	10-60	ไพลาภา (2550)
Kluai Namwa (ABB)	18-45	ไพลาภา (2550)
Kluai Khai (AA)	12-55	ไพลาภา (2550)

จากการศึกษาโครงสร้างผิวของสตาร์ชแกรนูลจากกล้วยสุกและสตาร์ชจากกล้วยดิบสายพันธุ์ Valery (AAA) พบว่าลักษณะของสตาร์ชแกรนูลกล้วยดิบมีลักษณะผิวเรียบ (ภาพที่ 6ก) ส่วนผิวของสตาร์ชแกรนูลจากกล้วยสุกจะสังเกตเห็นเป็นรอยขนานกันบนพื้นผิว (ภาพที่ 6ข) ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของเอนไซม์เอมิเลส (amylase) ระหว่างกระบวนการสุก (Kayisu and Hood, 1981)



ภาพที่ 6 ก) ลักษณะสตา์ชเกรนูลจากกกล้วยดิบและ ข) ลักษณะสตา์ชเกรนูลจากกกล้วยสุก เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: Kayisu and Hood (1981)

2. สมบัติทางเคมีและเคมีเชิงฟิสิกส์

ถึงแม้จะเป็นแป้งและสตา์ชที่มาจากกล้วยเหมือนกัน แต่หากมีความแตกต่างของสายพันธุ์ แหล่งเพาะปลูก อายุการเก็บเกี่ยว วิธีการสกัดแป้งและสตา์ช รวมไปถึงเทคนิคและสารเคมีที่ใช้ พบว่าสตา์ชจะให้คุณสมบัติที่ต่างกันด้วย ดังนั้นสตา์ชกล้วยที่สกัดได้จากแหล่งงานวิจัยต่างๆ จะมีค่าองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน (Kayisu *et al.*, 1981; Lii *et al.*, 1982; Bello-Perez *et al.*, 1999; วสันต์, 2543; Waliszewska *et al.*, 2003; Millan-Testa *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2005; Gonzalez-Sato *et al.*, 2006; ไพลาภา, 2550) ดังตารางที่ 2 ที่แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสตา์ชกล้วยสายพันธุ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

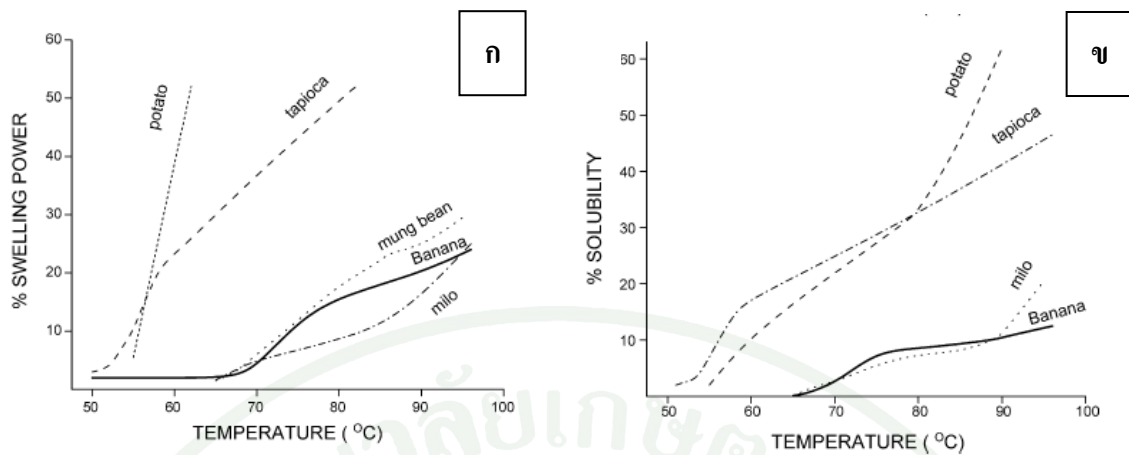
องค์ประกอบทางเคมีที่มีความสำคัญและเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของสตา์ชมีความแตกต่างกันคือ แอมิโลส ซึ่งกล้วยมีปริมาณของแอมิโลสไม่แน่นอน โดยพบอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 10-40 ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ระยะการสุก และวิธีวิเคราะห์ (Kayisu *et al.*, 1981; Zhang *et al.*, 2005)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชกล้วยสายพันธุ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

พันธุ์กล้วย	โปรตีน	ไขมัน	แอมิโลส	แหล่งงานวิจัย
Valery (AAA)	0.20	0.2	-	Kayisu <i>et al.</i> (1981)
Macho (AAB)	2.03	2.20	-	Bello-Perez <i>et al.</i> (1999)
Kluai Namwa Kom (ABB)	0.23	0.07	31.98	วสันต์ (2543)
Kluai Hak muk (ABB)	0.22	0.11	30.94	วสันต์ (2543)
Kluai Ta Nee (BB)	0.93	0.09	31.98	วสันต์ (2543)
Valery (AAA)	0.22	0.26	40.7	Waliszewska <i>et al.</i> (2003)
Macho (AAB)	2.03	2.46	-	Nunez-Santiago <i>et al.</i> (2004)
Kluai Hom Thong (AAA)	0.21	0.10	13.36	ไพลาภา (2550)
Kluai Namwa (ABB)	0.20	0.12	28.03	ไพลาภา (2550)
Kluai Khai (AA)	0.17	0.03	20.32	ไพลาภา (2550)

นอกจากนี้ยังพบว่า ในแป้งกล้วยมีองค์ประกอบที่เป็นเส้นใยอาหาร (dietary fiber) อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 9.2-15.54 (Kayisu *et al.*, 1981; Englyst and Cummings, 1986; Faisant *et al.*, 1995; Juarez-Garcia *et al.*, 2006) และลักษณะเด่นที่สุดของสตาร์ชจากกล้วยดิบ คือ การเป็น resistant starch (RS) แบบที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ (RS2) (Gonzalez-Sato *et al.*, 2006) ซึ่งลักษณะการเป็น resistant starch และเส้นใยอาหารนี้ ทำให้ไม่เกิดการย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในร่างกายของมนุษย์ และทำให้เกิดการหมักของเชื้อจุลินทรีย์ภายในลำไส้ใหญ่และสร้างกรดไขมันสายสั้นๆ (short-chain fatty acids: SCFA) โดยกรดไขมันที่เกิดขึ้นนี้ช่วยยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคได้ อีกทั้งยังเพิ่มปริมาณของของเหลว และปรับสภาพความเป็นกรด-เบสภายในลำไส้ใหญ่ และสามารถช่วยยับยั้งการเจริญของเซลล์ที่ผิดปกติในสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีบทบาทในการป้องกันมะเร็งลำไส้ใหญ่ (Kayisu *et al.*, 1981; Englyst and Cummings, 1986; Faisant *et al.*, 1995; Björck, 1996; Gonzalez-Sato *et al.*, 2006; Juarez-Garcia *et al.*, 2006; Sajilata *et al.*, 2006)

ทั้งนี้สตาร์ชกล้วยมีความสามารถในการละลายและการพองตัวที่ต่ำกว่าสตาร์ชชนิดอื่นๆ (Kayisu *et al.*, 1981; Nunez-Santiago *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2005) (ภาพที่ 7) และมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลที่ในเซชันอยู่ในช่วงประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 3 ที่แสดงช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลที่ในเซชันจากกล้วยสายพันธุ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบ ก) ความสามารถในการพองตัวและ ข) การละลายของสสารชนิดต่างๆ

ที่มา: Zhang *et al.* (2005)

ตารางที่ 3 อุณหภูมิในการเกิดเจลที่ไนซ์ของสสารกล้วยสายพันธุ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

พันธุ์กล้วย	อุณหภูมิในการเกิดเจลที่ไนซ์	แหล่งงานวิจัย
Valery (AAA)	67-70	Kayisu <i>et al.</i> (1981)
Taiwan banana (ABB)	75-80	Lii <i>et al.</i> (1982)
Kluai Namwa Kom (ABB)	71.97-82.40	วสันต์ (2543)
Kluai Hak muk (ABB)	70.96-85.47	วสันต์ (2543)
Kluai Ta Nee (BB)	71.67-84.80	วสันต์ (2543)
Valery (AAA)	69.5-81.2	Waliszewskia <i>et al.</i> (2003)
Macho (AAB)	75.46-80.70	Nunez-Santiago <i>et al.</i> (2004)
Kluai Hom Thong (AAA)	70.7-78.2	ไพลาภา (2550)
Kluai Namwa (ABB)	73.5-81.5	ไพลาภา (2550)
Kluai Khai (AA)	72.48-80.24	ไพลาภา (2550)

นอกจากนี้สสารกล้วยยังมีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting temperature) สูง รวมทั้งมีความคงตัวต่อสภาวะการแช่แข็งและการละลายต่ำ (Bello-Perez *et al.*, 1999) และมีความสามารถในการทนต่อแรงเฉือนได้น้อย ทำให้ความหลากหลายในการนำมาประยุกต์ใช้นั้นทำได้ยาก จึงต้องคัดแปรสสารเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

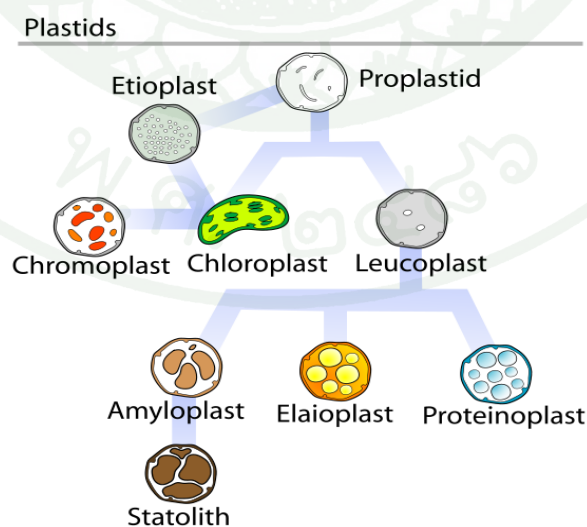
แป้ง และ สตาร์ช

แป้ง (flour) หมายถึง ผลิตภัณฑ์แป้งที่ผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตรชนิดต่างๆ จากพวกพืชหัว เช่น หัวมันสำปะหลัง มันเทศ หรือจากธัญชาติ เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี หรือจากพวกถั่วต่างๆ เช่น ถั่วเขียว ถั่วเหลืองโดยนำวัตถุดิบทั้งหมดมาโม่หรือบด หรือตีจนละเอียดมาก ดังนั้นส่วนประกอบของแป้งจึงประกอบด้วยสารอาหารและองค์ประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในวัตถุดิบเดิมทั้งหมด คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใย แร่ธาตุต่างๆ เป็นต้น (อรพิน, 2533)

สตาร์ช (starch) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตรชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผลิต เช่นเดียวกับแป้ง แต่กรรมวิธีการผลิตจะแยกเอาส่วนที่เป็นสารอาหารคาร์โบไฮเดรต โดยมีองค์ประกอบอื่นๆ น้อยที่สุด ดังนั้นสตาร์ชจึงประกอบด้วยสารอาหารที่เป็นคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ โดยจะประกอบด้วยแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน (อรพิน, 2533)

สตาร์ช

สตาร์ชคือแหล่งเก็บสะสมอาหารของพืชที่สามารถสังเคราะห์แสง ซึ่งจะพบทั่วไปในรูปแบบที่เป็นสตาร์ชเกรนูล (starch granule) โดยทั่วไปจะถูกสร้างและสะสมในแอมิโลพลาสต์ (amyloplast) (Whistler and BeMiller, 1999) ซึ่งพัฒนามาจากพลาสติด (plastids) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แผนผังแอมิโลพลาสต์ (amyloplast) ที่พัฒนามาจากพลาสติด (plastids)

ที่มา: Villarreal (2007)

สตาร์ชแกรนูลจะมีรูปร่างและโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช และปฏิกิริยา ด้านชีวเคมีของแอมิโลพลาสต์ โดยพบว่าขนาดของสตาร์ชแกรนูลจะมีขนาดแตกต่างกันไป โดยขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 110 ไมโครเมตร โดยสตาร์ชแกรนูลที่มีขนาดเล็กจะมีเส้นผ่าน ศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1 ถึง 20 ไมโครเมตร ส่วนสตาร์ชแกรนูลที่มีขนาดใหญ่ ส่วนใหญ่จะเป็นพวกสตาร์ช แกรนูลจากมันฝรั่งจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 ถึง 110 ไมโครเมตร (Singh *et al.*, 2003)

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6: 10: 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของ น้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้าน ตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า ปลายรีดิวซิง (reducing end group) เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบภายในสตาร์ชแกรนูล พบว่าสตาร์ชประกอบด้วย พอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (แอมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (แอมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมีแสดงระดับโครงสร้างของสตาร์ชแกรนูล สตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันจะมี อัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของสตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกัน (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

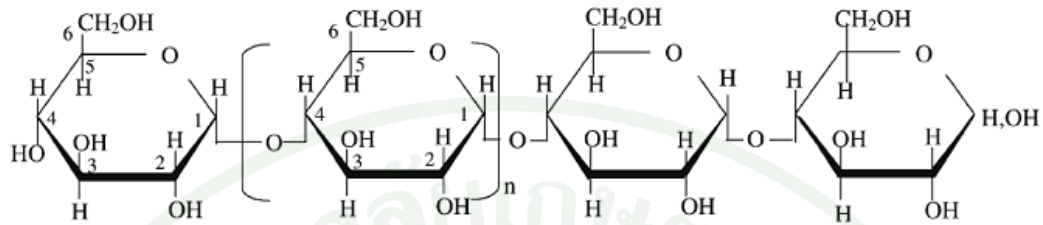
โดยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดต้องอาศัยเอนไซม์ในกระบวนการสังเคราะห์ที่ แตกต่างกัน โดยเอนไซม์จะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อโมเลกุลของอะดีโนซีนไดฟอสโฟกลูโคส (adenosine diphosphoglucose) เข้าทางด้านปลายของสายพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่มีหมู่รีดิวซิง (non-reducing end) โดย เอนไซม์ที่ใช้ในการสังเคราะห์จะแบ่ง เป็น 2 กลุ่มหลักๆ ได้แก่ เอนไซม์ที่ใช้ในการสังเคราะห์แอมิโลส คือ เอนไซม์ GBSS (granule-bound starch synthase) โดยเอนไซม์ดังกล่าวจะปรากฏอยู่ในสตาร์ช แกรนูล ในขณะที่เอนไซม์ที่สังเคราะห์แอมิโลเพกทิน มักจะปรากฏอยู่ที่ผิวของสตาร์ชแกรนูล (Jobling, 2004)

1. องค์ประกอบหลักของสตาร์ช

1.1 แอมิโลส (amylose)

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วย พันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1, 4 (α -1, 4) (ดังภาพที่ 9) ซึ่งในปัจจุบันพบว่า

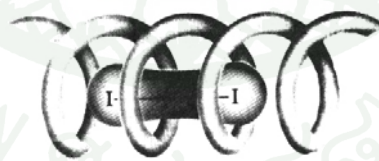
แอมิโลสยังประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ที่เป็นกิ่งแขนงที่เชื่อมด้วยพันธะชนิดแอลฟา-1, 6 (α -1, 6) บ้างเล็กน้อย (Bul  n *et al.*, 1998; กล  ณรงค   และเกื้อกุล, 2546)



ภาพที่ 9 โครงสร้างของแอมิโลส

ที่มา: Tester *et al.* (2004a)

โดยน้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 คาลตัน ซึ่งแอมิโลสในสตาร์ชแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) แตกต่างกัน นอกจากนั้นแอมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ไม่ละลายน้ำ โดยแอมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ ดังภาพที่ 10 นอกจากนี้แอมิโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงสตาร์ชที่มีองค์ประกอบของแอมิโลส (กล  ณรงค   และเกื้อกุล, 2546; Singh *et al.*, 2003)



ภาพที่ 10 การเกิดสารเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไอโอดีน

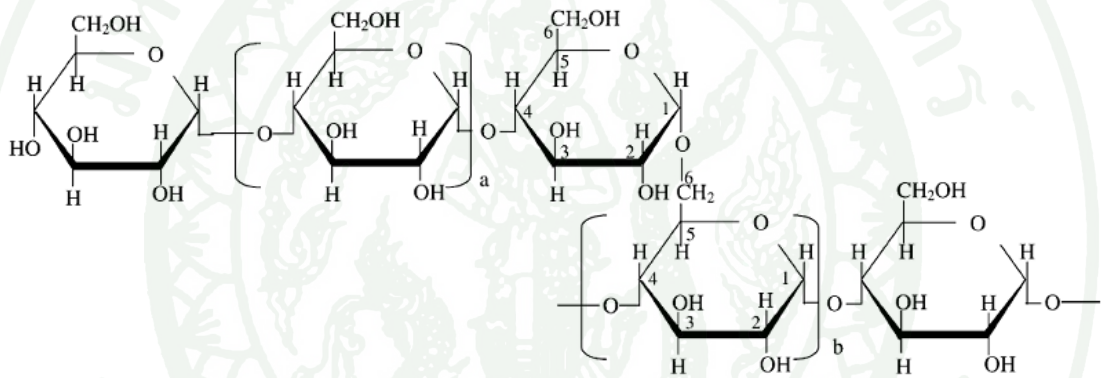
ที่มา: บุญรอด (2549)

นอกจากนี้ตำแหน่งของแอมิโลสภายในสตาร์ชแกรนูลยังขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของสตาร์ชด้วยเช่นกัน โดยสาเหตุที่สตาร์ชมีปริมาณของแอมิโลสที่ต่างกันนั้นเนื่องมาจากกิจกรรมของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์สตาร์ช (Singh *et al.*, 2003) ทั้งนี้แอมิโลสบางส่วนจะอยู่ในกลุ่มของแอมิโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystalline)

(กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546) โดยส่วนใหญ่แล้วแอมิโลสจะอยู่บริเวณผิวมากกว่าบริเวณตรงกลางของสตาร์ชเกรนูล (Hizukuri, 1996)

1.2 แอมิโลเพกทิน (amylopectin)

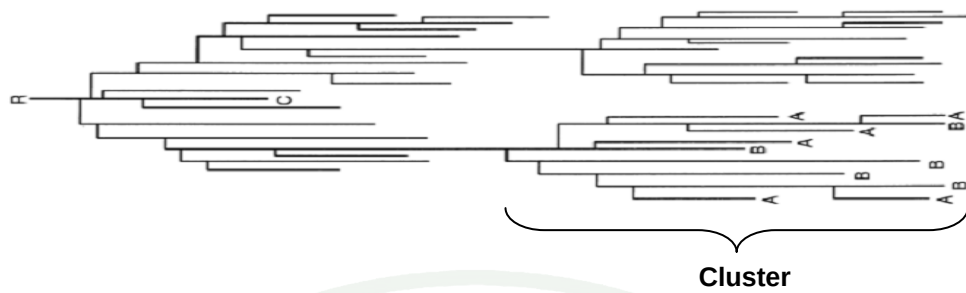
แอมิโลเพกทินมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าแอมิโลส เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีกิ่งก้านขนาดใหญ่ โครงสร้างของแอมิโลเพกทินมีการเชื่อมต่อของหน่วยกลูโคส มีพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1, 4 (α -1, 4) ประมาณร้อยละ 95 และแอลฟา-1, 6 (α -1, 6) ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในแอมิโลเพกทินทั้งหมด แอมิโลเพกทินมีขนาดประมาณ 10^7 - 10^9 ดาลตัน (Bul  n *et al.*, 1998; กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546) ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Tester *et al.* (2004a)

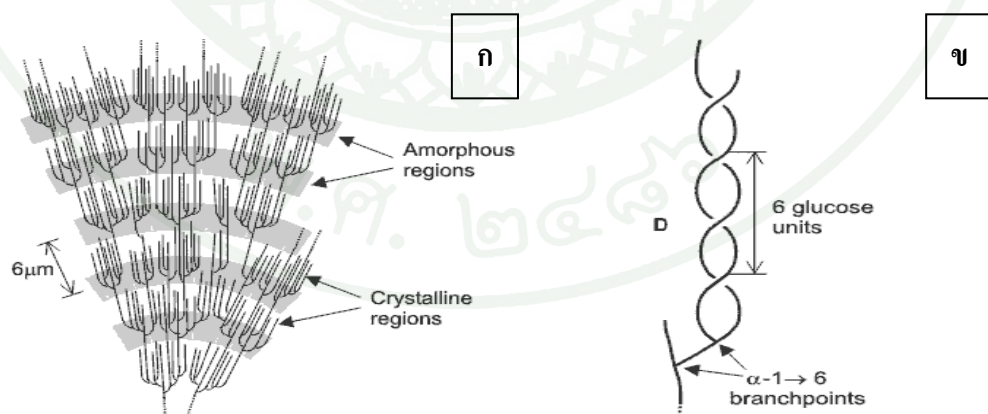
ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของแอมิโลเพกทินประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิดคือ สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างแอมิโลเพกทินประกอบด้วยสาย A และสาย B ในอัตราส่วน 0.8-0.9:1 และสาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในแอมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น ดังภาพที่ 12 (Whistler and BeMiller, 1999; กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546)



ภาพที่ 12 ลักษณะโครงสร้างของแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสายโซ่ A, B และ C

ที่มา: คัดแปลงจาก Wang *et al.* (1998)

ขนาดโมเลกุลของแอมิโลเพกทินที่มีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ จะอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) ดังภาพที่ 12 และ 13ก โดยส่วนสีขาวแสดงถึงโครงสร้างของผลึก (crystalline regions) ส่วนสีเทาจะเป็นส่วนที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งเชื่อมแสดงถึงส่วนอสัณฐาน (amorphous regions) ในการจับกันเป็นกลุ่มของแอมิโลเพกทินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helices) ดังภาพที่ 13ข ซึ่งทำให้สตราห์แกรนูลมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาดำยกรดและเอนไซม์ การเกิดเกลียวคู่ของแอมิโลเพกทินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งแอมิโลเพกทินภายในสตราห์แกรนูลสามารถเกิดเป็นผลึกได้ ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่ม (cluster) เดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มใกล้เคียงกัน (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546; Tester *et al.*, 2004a)



ภาพที่ 13 ก) โครงสร้างของสตราห์ และ ข) การเกิดเป็นเกลียวคู่ของแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Chaplin (2006)

1.3 ส่วนประกอบอื่นๆภายในสตาร์ชแกรนูล

ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของสตาร์ชแกรนูลที่สำคัญ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน และเถ้า ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในสตาร์ชแต่ละชนิด (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

1.3.1 ไขมัน

โดยส่วนใหญ่สตาร์ชจะมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 ไขมันที่รวมอยู่ในสตาร์ชแกรนูลจะส่งผลกระทบต่อลักษณะคุณสมบัติของแป้งและสตาร์ช โดยจะมีผลต่อความหนืด ลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำของสตาร์ชแกรนูล โดยไขมันจะรวมตัวกับแอมิโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (amylose-lipid complexes)

1.3.2 โปรตีน

ภายในสตาร์ชมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของสตาร์ชแกรนูล ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะของสตาร์ช คือ ทำให้เกิดประจุบนผิว สตาร์ชแกรนูล มีผลต่อการกระจายของสตาร์ชแกรนูล ทำให้สตาร์ชมีอัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลที่ในสภาวะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) ระหว่างกรดแอมิโน (amino acid) กับน้ำตาลรีดิวซิง (reducing sugar) ส่งผลให้สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป

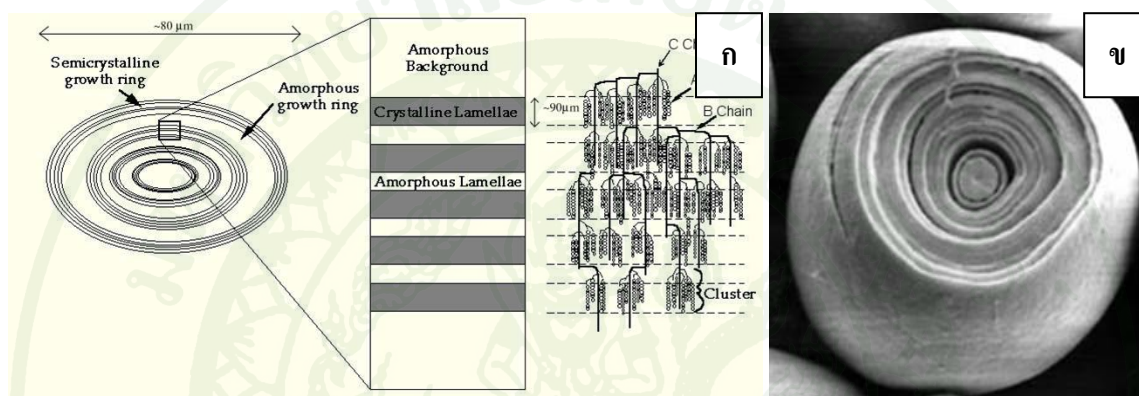
1.3.3 เถ้า

สตาร์ชโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม สามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้จากส่วนที่เหลือหรือเถ้าจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์

2. โครงสร้างและการรวมตัวกันเป็นสตาร์ชแกรนูล

สตาร์ชจัดว่าเป็นโครงสร้างกึ่งผลึก (semi-crystalline) ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทินในสตาร์ชแกรนูลที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างกึ่งผลึกของสตาร์ชประกอบไปด้วยส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนของโครงสร้างผลึก (crystalline region) ทั้งสองส่วนนี้จะมีการเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้นในแนวรัศมีของสตาร์ชแกรนูล และเริ่มจากจุดศูนย์กลางของสตาร์ช

แกรนูล หรือที่เรียกว่า ไฮลัม (hilum) ทุกๆชั้นเป็นส่วนของอสังฐานและโครงสร้างผลึกสลับกัน ซึ่งการเรียงลำดับชั้นนี้จะทำให้เกิดลักษณะเป็นวงแหวน หรือเรียกว่า growth ring ดังภาพที่ 14 (Hoseney, 1998; Whistler and BeMiller, 1999; Singh *et al.*, 2003; Tester *et al.*, 2004a) นอกจากนี้สสารแกรนูลมีสมบัติเป็น optical birefringence คือ ปรากฏเป็นแสงเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดบิรเรนาบแสง ทำให้เห็นลักษณะที่เป็นกากบาท (maltese cross) ซึ่งสมบัตินี้ชี้บ่งว่าสสารมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (order orientation) หรืออยู่ในรูปโครงสร้างผลึก (crystalline) (นิธิยา, 2549)



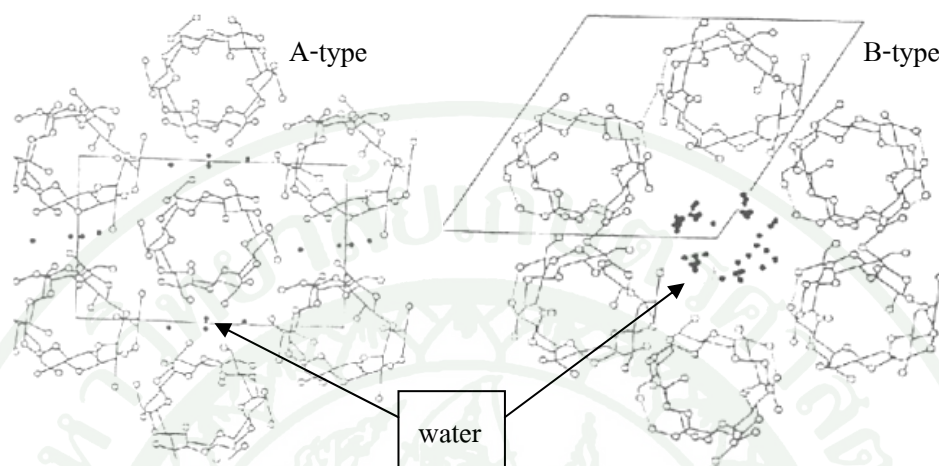
ภาพที่ 14 ก) การเรียงลำดับชั้นของส่วนอสังฐานและส่วนโครงสร้างผลึกทำให้เกิดลักษณะเป็นวงแหวน (growth ring)

ข) วงแหวน (growth ring) ของสสารแกรนูล (เมื่อส่องด้วยกล้อง SEM)

ที่มา: Nowjee (2004)

โมเลกุลของสสารสามารถจัดเรียงตัวเป็นเกลียวคู่ได้ โดยจะเกิดใน 2 ลักษณะ คือ โครงสร้างแบบ A และ โครงสร้างแบบ B ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัว (parallel หรือ antiparallel) ในหน่วยเซลล์ (unit cell) และการพันของเกลียวคู่ โดยพิจารณาทิศทางการพันของเกลียวคู่ (left-handed หรือ right-handed) เกลียวคู่แบบ A มีการอัดตัวและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในหน่วยเซลล์เป็นแบบ monoclinic และมีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ระหว่างสายของเกลียวคู่จำนวน 8 โมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยเซลล์ ส่วนโครงสร้างแบบ B เป็นเกลียวคู่ที่เกิดจากการอัดตัวและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในหน่วยเซลล์เป็นแบบ hexagonal ช่องว่างระหว่างกลางของโมเลกุลที่ล้อมรอบไปด้วยเกลียวคู่ 6 สาย ในโครงสร้างแบบ B จะมีโมเลกุลน้ำจำนวน 36 โมเลกุล ดังภาพที่ 15 นอกจากนี้ repeat unit ของโครงสร้างแบบ A คือ หน่วยของมอลโทโทร-

โอซิด (maltotriosyl) ส่วน repeating unit ของโครงสร้างแบบ B คือ มอลโทซิด (maltosyl) (Hizukuri, 1996; Donald, 2004; Sajilata *et al.*, 2006; Zobel and Stephen, 2006)



ภาพที่ 15 โครงสร้างแบบ A และ B

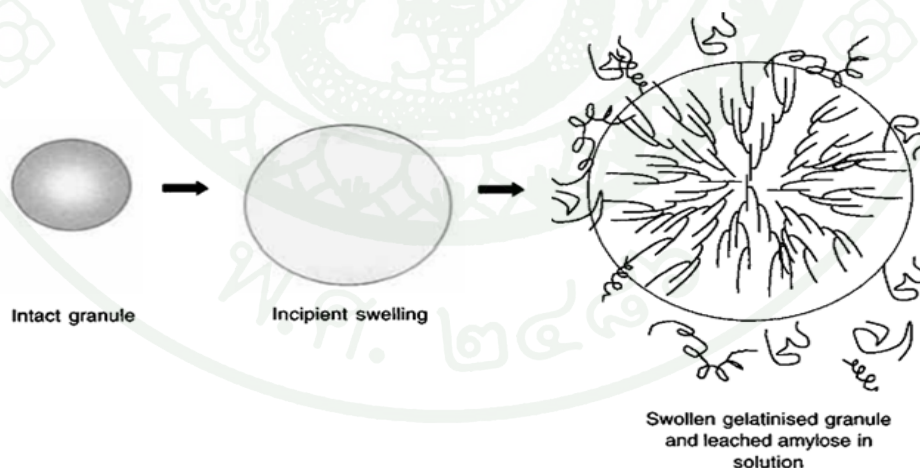
ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Sajilata *et al.* (2006)

สตาร์ชแกรนูลธรรมชาติจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบ คือ A, B และ C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวสายของแอมิโลเพกทิน ความหนาแน่นของการจับกันในแกรนูล และโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้าง ซึ่งจะมีผลต่อการสะท้อนของลำแสงอิเล็กตรอนในช่วงคลื่นสั้น (X-ray) โดยสตาร์ชแต่ละชนิดจะให้รูปแบบการสะท้อนกับรังสีเอกซ์แตกต่างกัน ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A และ B จัดว่าเป็นโครงสร้างผลึกแท้ ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบ C จะเป็นการผสมระหว่างลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบ A และ B (Hizukuri, 1996; Donald, 2004; Sajilata *et al.*, 2006) ซึ่งรูปแบบการจัดเรียงตัวกันของสตาร์ชสามารถตรวจสอบได้โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) โดยลักษณะผลึกแบบ A จะปรากฏมุมของการสะท้อนที่ตำแหน่ง 17° , 18° และ 23° สำหรับผลึกประเภท B จะปรากฏมุมของการสะท้อนที่ตำแหน่ง 5.6° และ 17.2° และเกิดการสะท้อนเล็กน้อยที่ตำแหน่ง 20° , 22° และ 24° (Zobel, 1964)

3. กระบวนการเกิดเจลลาทีนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชัน (gelatinization and retrogradation)

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน แต่เนื่องจากสตาร์ชแกรนูลมีการจัดเรียงโครงสร้างกึ่งผลึก (semi-crystalline) ทำให้

สตาร์ชเกรนูลละลายน้ำเย็นได้ยาก ในขณะที่สตาร์ชเกรนูลอยู่ในน้ำเย็นสตาร์ชเกรนูลจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย เมื่อทำแห้งสตาร์ชดังกล่าวสามารถที่จะกลับคืนสู่ลักษณะของสตาร์ชเกรนูลในรูปแบบเดิมได้ แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายสตาร์ช พบว่าโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์ภายในสตาร์ชเกรนูลจะเกิดการสั่นสะเทือน (vibration) ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่พอลิแซคคาไรด์เกิดการคลายตัวและแตกออก โมเลกุลของน้ำในระบบจะเริ่มเข้าทำอันตรกิริยากับสตาร์ชเกรนูลในส่วนที่เป็นอณูฐานก่อน ทำให้สตาร์ชเกรนูลมีความสามารถในการดูดซึมน้ำและเกิดการพองตัว โดยโมเลกุลของน้ำจะเชื่อมต่อดัวยพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์ และถูกล้อมรอบไปด้วยโมเลกุลของน้ำ ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ (Whistler and BeMiller, 1999) ทำให้โครงสร้างผลึก (crystalline) ภายในสตาร์ชเกรนูลถูกทำลาย ส่งผลให้สตาร์ชเกรนูลดูดน้ำและเกิดการพองตัว ในขณะที่สตาร์ชเกิดการพองตัว โมเลกุลเอมิโลสบางส่วนหลุดออกจากสตาร์ชเกรนูล (amylose leaching) และเมื่อเพิ่มความร้อนให้กับระบบจะทำให้สตาร์ชเกรนูลเกิดการพองตัวและเกิดการหลุดออกของโมเลกุลมากขึ้น ทำให้โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบๆสตาร์ชเกรนูลมีปริมาณน้อยลง สตาร์ชเกรนูลเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาทีไนเซชัน (gelatinization) ดังภาพที่ 16 และ 17 กระบวนการนี้ทำให้คืนกลับไม่ได้ ดังนั้นสตาร์ชเกรนูลจะสูญเสียไปรีฟรินเจนซ์ และโครงสร้างผลึก (กล้านรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

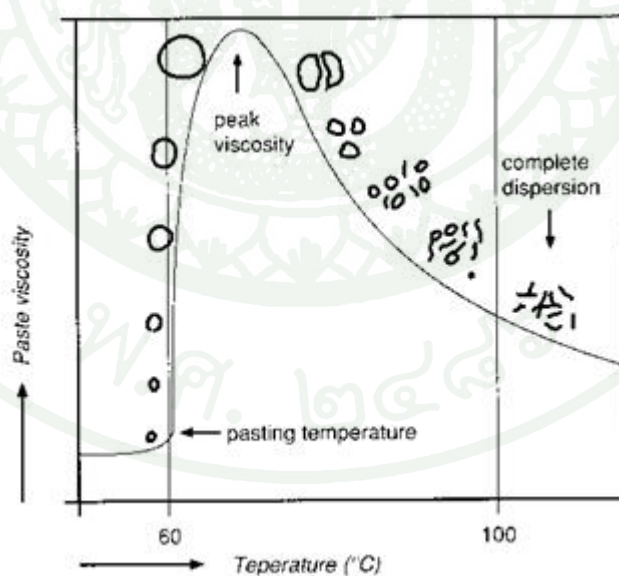


ภาพที่ 16 การเกิดเจลาทีไนเซชันของสตาร์ชเกรนูล

ที่มา: คัดแปลงมาจาก Tester *et al.* (2004b)

โดยวิธีที่นิยมใช้ศึกษาการเกิดเจลในเซชันของสตาร์ชคือ การวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter; DSC) เพื่อหาช่วงอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature; T_o) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature; T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature; T_c) และค่าพลังงานเอนทัลปี (enthalpy; ΔH , J/g) ของการเกิดเจลในเซชัน (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid viscosity analyzer; RVA) มักจะเรียกอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลในเซชันว่า อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ในส่วนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากสตาร์ชเกรนูลสามารถดูดน้ำได้มากขึ้น มีการพองตัวเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดของเพสต์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดความหนืดวิกฤติ ซึ่งสตาร์ชเกรนูลจะเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ ซึ่งในส่วนนี้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลภายในสตาร์ชเกรนูลจะมีความอ่อนแอมาก ทำให้ในที่สุดสตาร์ชเกรนูลเกิดการแตกออก ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของสตาร์ชออกมาในระบบมากขึ้น สตาร์ชเกรนูลเกิดการสูญเสียโครงสร้าง จึงทำให้ความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว (Whistler and BeMiller, 1999; กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การเกิดเจลในเซชันของสตาร์ชเกรนูลและการเปลี่ยนแปลงความหนืด

ที่มา: กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล (2546)

เมื่อปล่อยให้ระบบเย็นตัวลง จะมีผลทำให้โมเลกุลของสตาร์ชที่อยู่ใกล้กัน เกิดการเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นโครงสร้างใหม่ที่มีร่างแหสามมิติสามารถอุ้มน้ำ ส่งผลให้ความหนืดของตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง การเปลี่ยนแปลงความหนืดในขั้นตอนนี้เป็นผลมาจากการที่โมเลกุลของสตาร์ชที่เป็นสายตรงสามารถเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวกันใหม่ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) (Whistler and BeMiller, 1999; กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

การจำแนกชนิดของสตาร์ช

1. ความสามารถในการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์

การจำแนกชนิดของสตาร์ชสามารถใช้พฤติกรรมของสตาร์ชที่แสดงหลังจากที่ให้มีการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ โดยไม่มีการใช้สารเคมีอื่นร่วมด้วย ทำให้สามารถแบ่งสตาร์ชออกเป็น 3 ประเภท (Berry, 1986) ดังนี้

1.1 สตาร์ชที่สามารถย่อยได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch; RDS)

สตาร์ชชนิดนี้มีองค์ประกอบหลักที่มีลักษณะเป็นอสัณฐาน และพบในอาหารที่มีองค์ประกอบเป็นสตาร์ชและมีการหุงสุกด้วยกระบวนการที่มีการให้ความร้อนและความชื้น เช่น ขนมปัง เมื่อให้สตาร์ชชนิดนี้ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ พบว่าภายในระยะเวลา 20 นาที สตาร์ชจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโมเลกุลน้ำตาลกลูโคส

1.2 สตาร์ชที่สามารถย่อยได้อย่างช้าๆ (slowly digestible starch; SDS)

สตาร์ชชนิดนี้มีองค์ประกอบหลักที่มีลักษณะเป็นอสัณฐานเช่นเดียวกัน และยังมีลักษณะของส่วนผลึก ซึ่งสามารถเกิดการรีโทรเกรดได้ในอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนมาแล้ว หลังจากสตาร์ชชนิดนี้ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ 100 นาที สตาร์ชจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโมเลกุลน้ำตาลกลูโคส

1.3 สตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (resistant starch; RS)

สตาร์ชชนิดนี้เป็นชิ้นส่วนของสตาร์ชขนาดเล็ก (starch fraction) ที่มีความสามารถทนต่อสภาวะการย่อยโดยเอนไซม์ในร่างกาย เช่น เอนไซม์แอลฟาแอมิเลส (α -amylase) และเอนไซม์พูลูลาเนส (pullulanase) โดยที่เอนไซม์เหล่านี้ไม่สามารถย่อยสตาร์ชชนิดนี้ได้

2. ความสามารถในการย่อยของเอนไซม์ในร่างกาย

สตาร์ชสามารถแบ่งตามลักษณะความสามารถในการย่อยของเอนไซม์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (Sajilata *et al.*, 2006) ดังนี้

2.1 สตาร์ชที่สามารถย่อยได้ (digestible starch)

สตาร์ชชนิดนี้เป็นสตาร์ชที่สามารถย่อยได้โดยเอนไซม์ภายในร่างกาย ซึ่งหมายถึงสตาร์ชที่สามารถย่อยได้อย่างรวดเร็ว (RDS) และสตาร์ชที่สามารถย่อยได้อย่างช้าๆ (SDS) โดยสตาร์ชเหล่านี้จะถูกย่อยอย่างสมบูรณ์ภายในส่วนของลำไส้เล็ก

2.2 สตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (resistant starch)

สตาร์ชชนิดนี้เป็นสตาร์ชที่ไม่สามารถย่อยด้วยเอนไซม์ภายในร่างกายของมนุษย์

Resistant starch

1. ชนิด โครงสร้าง และประโยชน์ของ resistant starch

โดยทั่วไปสตาร์ชสามารถถูกย่อยและดูดซึมเข้าสู่ลำไส้เล็กได้อย่างสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามยังมีสตาร์ชที่สามารถทนต่อการย่อยของเอนไซม์จากลำไส้เล็กและเข้าสู่ลำไส้ใหญ่ ซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการหมักของเชื้อจุลินทรีย์ภายในลำไส้ใหญ่ โดยสตาร์ชกลุ่มนี้คือ resistant Starch (RS) (Asp and Björck, 1992; Gonzalez-Sato *et al.*, 2006) ซึ่งสตาร์ชกลุ่มนี้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1982 โดย Englyst และคณะผู้ร่วมการวิจัย ที่กำลังพัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณของเส้นใยอาหาร (dietary fibre) (Sajilata *et al.*, 2006)

หลักการแบ่ง RS เป็นไปตาม Nugent (2005) และ Sajilata *et al.* (2006) ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นฐานโดยธรรมชาติของสตาร์ชและสภาพแวดล้อมในอาหารนั้นๆ

1.1 Resistant starch type I (RS1) เป็นสตาร์ชที่มีความคงทนต่อการย่อย เนื่องจากลักษณะทางกายภาพ (ภาพที่ 18ก) ที่ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำลายสตาร์ชเกรนูลได้ เช่น เมล็ดพืชที่ถูกขัดสีบางส่วน

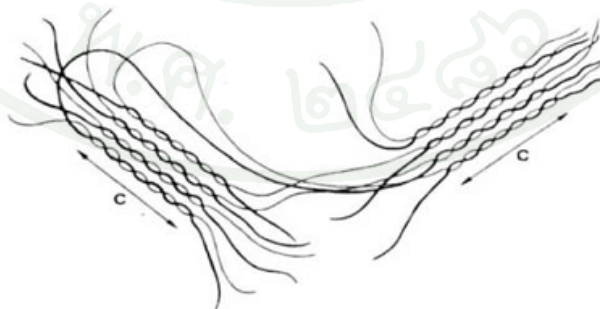
1.2 Resistant starch type II (RS2) ธรรมชาติของอนุภาคสตาร์ชดิบ เช่น สตาร์ชมันฝรั่งหรือสตาร์ชกล้วย จะมีลักษณะเป็นรูปผลึก สตาร์ชเกรนูลมีการอัดกันอย่างหนาแน่นในแนวของวงแหวนของสตาร์ชเกรนูล (ภาพที่ 18ข) ทำให้ยากต่อการละลายน้ำและความต้านทานต่อการย่อย



ภาพที่ 18 ก) ลักษณะสตาร์ชเกรนูลของ resistant starch type I และ ข) resistant starch type II

ที่มา: Sajilata *et al.* (2006)

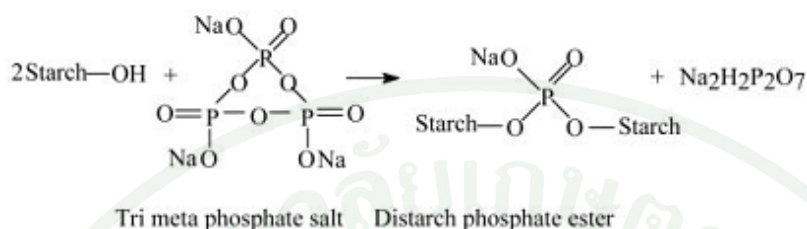
1.3 Resistant starch type III (RS3) เป็นสตาร์ชที่เกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชัน (ดังภาพที่ 19) อยู่ในรูปแบบของอาหารที่ผ่านการทำให้สุกแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำหรืออุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 19 ลักษณะการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลเอมิโลส ในการเกิดโครงสร้างแบบเกลียวคู่ และทำให้เกิดสมบัติความเป็น resistant starch type III

ที่มา: Sajilata *et al.* (2006)

1.4 Resistant starch type IV (RS4) เป็นสตาร์ชที่เกิดจากกระบวนการดัดแปรทางเคมี (ดังภาพที่ 20) ที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลสตาร์ช โดยเกิดพันธะชนิดอื่นนอกเหนือจากพันธะชนิด แอลฟา-1, 4 และ แอลฟา-1, 6



ภาพที่ 20 การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการทางเคมี และทำให้เกิด resistant starch type IV

ที่มา: Sajilata *et al.* (2006)

resistant starch (RS) เป็นสตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ของมนุษย์ อีกทั้งยังไม่สามารถดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ ดังนั้น resistant starch จึงมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร มีประโยชน์ต่อระบบการขับถ่าย และระบบหมุนเวียนเลือด โดย resistant starch ที่ไม่ถูกย่อยบริเวณลำไส้เล็กและผ่านมาถึงส่วนของลำไส้ใหญ่ จะทำให้เกิดกระบวนการหมักโดยเชื้อจุลินทรีย์ภายในลำไส้ใหญ่และสร้างกรดไขมันสายสั้นๆ (short-chain fatty acids: SCFA) เช่น แอซิเตท บิวทิเรท และ โพรพิโอเนท กรดไขมันทั้งสามชนิดสามารถถูกดูดซึมและขนส่งไปยังตับได้ โดยกรดไขมันที่เกิดขึ้นนี้จะไปยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคได้ อีกทั้งยังเพิ่มปริมาณของของเหลว และปรับสภาพความเป็นกรด-เบสภายในลำไส้ใหญ่ และสามารถช่วยยับยั้งการเจริญของเซลล์ที่ผิดปกติในสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีบทบาทในการป้องกันมะเร็งลำไส้ใหญ่ (Björck, 1996; Sajilata *et al.*, 2006)

2. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของ resistant starch

อิทธิพลต่อองค์ประกอบของ RS ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย คือ ลักษณะโครงสร้างของสตาร์ชแกรนูล ปริมาณแอมิโลสต่อแอมิโลเพกทิน ความยาวของสายแอมิโลส ความร้อน ความชื้น และการเกิดอันตรกิริยาของสตาร์ชกับส่วนประกอบอื่น เช่น ไขมัน โดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน (AM-lipid complexes) ซึ่งมีนักวิจัยพบว่าการเกิด AM-lipid complexes จะทำให้ปริมาณของ RS ลดลง ในขณะที่นักวิจัยบางกลุ่มเชื่อว่าการจับกันเป็นโครงสร้าง AM-lipid complexes นั้นเป็น resistant starch (Sajilata *et al.*, 2006)

3. กระบวนการความร้อนที่มีผลต่อการเกิด resistant starch

เทคนิคกระบวนการต่างๆจะมีผลต่อการเกิดเจลาทีไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งส่งผลต่อรูปแบบของ resistant starch จากข้อเท็จจริงนี้มีความสำคัญอย่างมากกับอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งกระบวนการต่างๆ เหล่านี้คาดว่าจะทำให้มีปริมาณ resistant starch type III ในอาหารเพิ่มขึ้น มีงานวิจัยพบว่ากระบวนการความร้อน เช่น Steam cooking, Autoclaving, Parboiling, Extrusion cooking และ Microwave irradiation ส่งผลต่อรูปแบบของ RS โดยจะทำให้มีปริมาณ RS3 สูงขึ้น (Lehmann *et al.*, 2002; Gonzalez-Sato *et al.*, 2006; Sajilata *et al.*, 2006)

4. กระบวนการรีโทรเกรเดชันต่อการเกิด resistant starch type III (RS3)

RS3 เป็น retrograded starch สำหรับสตาร์ชชนิดนี้สตาร์ชเกรนูลจะถูกทำลายด้วยกระบวนการเจลาทีไนเซชัน ซึ่งอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีไนเซชันจะขึ้นอยู่กับชนิด แหล่งที่มาของสตาร์ชและปริมาณแอมิโลส เมื่อสตาร์ชเกรนูลผ่านกระบวนการเจลาทีไนเซชันและมีการทำให้เย็นจะทำให้เกิดการเรียงตัวกันใหม่ หรือเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชัน โดยทั่วไปแล้วการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่า ในขณะที่แอมิโลเพกทินจะเกิดอย่างช้าๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน โครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกทินที่สร้างขึ้นใหม่จะมีความคงตัวต่ำกว่าของแอมิโลส อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมละลายจะอยู่ในช่วง 55-70 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับสถานะการเก็บ สำหรับโมเลกุลแอมิโลสจะเกิดการรวมตัวเป็นเกลียวคู่ จับกันเป็นโครงสร้างที่แน่นหนาด้วยพันธะไฮโดรเจน น้ำที่อยู่ภายในถูกบีบออกมา ทำให้ได้โครงสร้างที่ทนต่ออุณหภูมิสูง และลักษณะที่จับกันเป็นโครงสร้างผลึกจะเสถียรมาก ต้องใช้อุณหภูมิในการหลอมเหลวที่ 80-150 องศาเซลเซียส (Rashmi and Urooj, 2003; Sajilata *et al.*, 2006)

การดัดแปร

1. การแบ่งประเภทของสตาร์ชดัดแปร

การดัดแปรสตาร์ชนั้นมีผู้แบ่งกลุ่มไว้หลายประเภทและหลายรูปแบบ ในที่นี้ขอแบ่งกลุ่มตาม BeMiller (BeMiller, 1997) ที่เสนอกลุ่มดังนี้

1.1 การดัดแปรทางเคมี (chemical modification) แบ่งออกเป็น

1.1.1 การเกิดอนุพันธ์ (derivatization)

ก) การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของสตาร์ช (monostarch substitution) ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น สตาร์ชแอซิเตต (starch acetate) หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น ไฮดรอกซีเอทิลสตาร์ช (hydroxyethyl starch)

ข) การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น สตาร์ชครอสลิงค์ (cross-linked starch)

1.1.2 การลดขนาดโมเลกุลสตาร์ชโดยกรด (acid thinning) เช่น สตาร์ชย่อยด้วยกรด (acid-modified starch) หรือ thin-boiling starch

1.1.3 เดกซ์ทรีไนเซชัน (dextrinization) เป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะ (depolymerization/transglycosylation) โดยใช้ความร้อน หรือความร้อนกับกรด เช่น เดกซ์ทรีน (dextrin)

1.1.4 ออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดของโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (bleaching และ depolymerization) เช่น ออกซิไดซ์สตาร์ช (oxidized starch)

1.1.5 การย่อยสลาย (hydrolysis) โดยใช้น้ำย่อยหรือกรด เพื่อย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น มอลโทเดกซ์ทรีน (maltodextrin)

1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification)

1.2.1 เจลาติไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนสตาร์ชจนผ่านขั้นตอนของเจลาติไนเซชันแล้วทำแห้งทันที เช่น สตาร์ชพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starch)

1.2.2 สตาร์ชละลายน้ำเย็น (Granular-Cold-Water-Soluble-Starch : GCWSS) เป็นการแปรรูปจนได้สตาร์ชที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาติไนเซชัน

1.2.3 การลดขนาดสตาร์ชแกรนูลโดยทางกล การทำให้สตาร์ชแกรนูลแตกโดยทางกล จะได้สตาร์ชแกรนูลขนาดเล็กกว่าปกติ

1.2.4 การแปรรูปด้วยความร้อนเชื่อมประสาน (Annealing) เป็นการให้ความร้อนในขณะที่สตาร์ชแกรนูลอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน แต่มีปริมาณน้ำหรือความชื้นอยู่ในระบบเพียงพอสำหรับการเกิดเจลาติไนเซชัน โดยมีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 30 และใช้เวลานาน

1.2.5 การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชันแก่สตาร์ช แต่มีปริมาณน้ำหรือความชื้นอยู่ในระบบ ไม่เพียงพอที่จะทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชัน โดยมีความชื้นประมาณร้อยละ 18-27

1.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnological modification) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสตาร์ชโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม เช่น waxy starch คือ สตาร์ชที่มีแอมิโลสต่ำหรือไม่มีเลย และ high-amylose starch คือ สตาร์ชที่มีแอมิโลสสูง

2. สตาร์ชพรีเจลาทีไนซ์

สตาร์ชพรีเจลาทีไนซ์ หรือ สตาร์ชพรีเจล ทางการค้าเรียกว่า อัลฟาสตาร์ช (Alpha starch) เป็นสตาร์ชดัดแปรทางกายภาพที่ทำโดยให้ความร้อนแก่สตาร์ช ทำให้สตาร์ชสุกหรือเกิดเจลาทีไนซ์ แล้วทำให้แห้งโดยเครื่องทำแห้ง เช่น เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drier) เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drier) หรือเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ (extruder) และบดให้ละเอียด ได้สตาร์ชดัดแปรที่สามารถละลายกระจายตัวได้ในน้ำเย็น ให้ความหนืดได้ทันที และไม่เกิดเจล เหมาะสำหรับใช้กับอาหารที่ไม่ต้องให้ความร้อน เช่น ขนมพุดดิ้ง น้ำเกรวี่ ซอส ไส้กึ่งสำเร็จรูป ส่วนผสมของซูปผง (Thomas and Atwell, 1998; กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546 ; Singh *et al.*, 2007)

3. การผลิตสตาร์ชพรีเจลาทีไนซ์

เครื่องทำแห้งที่ใช้ในการผลิตสตาร์ชพรีเจลมีหลายชนิด ได้แก่ เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย และเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ ซึ่งเครื่องทำแห้งแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมต่อวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกันออกไป โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะเป็นวิธีที่เหมาะสมและนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีอัตราการผลิตสูง ส่วนการใช้เครื่องมืออัดแรงดันสูงอย่างเอ็กซ์ทรูดเดอร์ มีอัตราการผลิตต่ำแต่มีข้อได้เปรียบในเรื่องของความสะอาด และการควบคุมคุณภาพ (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546 และ Taggart, 2004)

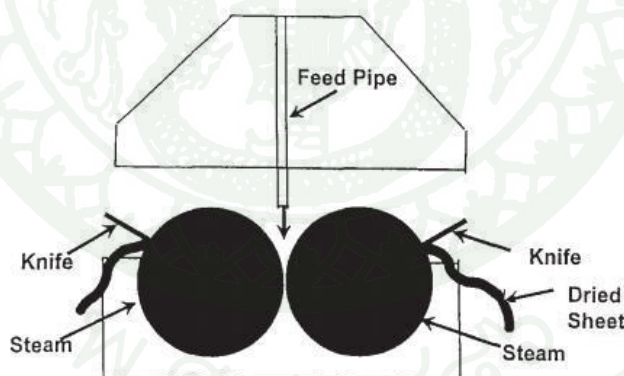
3.1 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

การผลิตสตาร์ชพรีเจลาทีไนซ์สามารถใช้ได้ทั้งสตาร์ชดิบ และสตาร์ชดัดแปรทางเคมีชนิดต่างๆ โดยป้อนสตาร์ชในรูปสารแขวนลอยหรือสตาร์ชเพสต์ ลงในเครื่องทำแห้ง ซึ่งในสารแขวนลอยจะมีปริมาณของแข็งได้สูงถึงร้อยละ 44 ในการป้อนสตาร์ชสู่เครื่องทำแห้งต้องมีการควบคุมให้สตาร์ชมีความหนาสม่ำเสมอ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

เมื่อผ่านสารละลายสตาร์ชสู่เครื่องทำแห้ง ความร้อนจากผิวหน้าลูกกลิ้งจะทำให้น้ำในสารละลายสตาร์ชระเหยออกไป ได้สตาร์ชที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ (จำริญ, 2537) ฉาบบนผิวหน้า

ลูกกลิ้ง และถูกขูดออกโดยใบมีด ซึ่งจะสัมผัสกับผิวของลูกกลิ้งอย่างสม่ำเสมอ ก่อนที่ลูกกลิ้งจะหมุนครบ 1 รอบ (ภายในระยะเวลา 20-30 วินาที) หลังจากนั้นนำไปอบแห้งและบดให้ละเอียด แผ่นสตาร์ชที่ฉาบบนผิวลูกกลิ้งที่บางเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียผลิตภัณฑ์ และถ้าแผ่นหนาเกินไปจะทำให้ใบมีดทำงานไม่สะดวก (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546 และ วิไล, 2547)

เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีทั้งแบบเดี่ยว (single) และแบบคู่ (double) (ภาพที่ 21) โดยต้องมีการปรับอุณหภูมิของผิวลูกกลิ้งและอัตราการหมุน ให้สอดคล้องกับปริมาณความชื้น ความสามารถในการเกิดเจลที่ในชั้นของสตาร์ชแต่ละชนิด และความเข้มข้นของตัวอย่าง สำหรับลูกกลิ้งคู่จะต้องควบคุมระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้เท่ากันตลอดแนวความยาวของลูกกลิ้ง และให้สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในลูกกลิ้ง อัตราการหมุน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของโลหะที่ใช้ทำลูกกลิ้ง (Kerr, 1950; Gavrielidou *et al.*, 2002; Kalogianni *et al.*, 2002; Vallous *et al.*, 2002; กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546) การผลิตสตาร์ชพรีเจลที่ในชั้นโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากประหยัดค่าใช้จ่าย และความร้อนที่ใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ได้มาจากไอน้ำภายในลูกกลิ้ง (Kerr, 1950)



ภาพที่ 21 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่

ที่มา: Thomas and Atwell (1998)

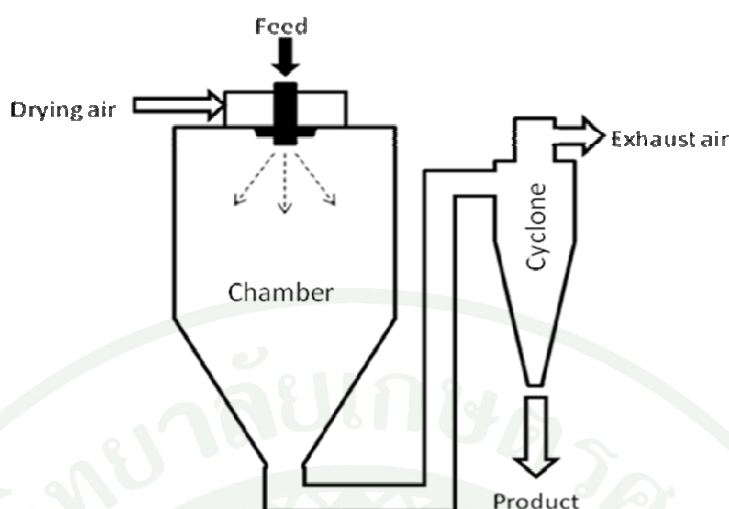
ลัสนา (2532) ทำการศึกษาการผลิตแป้งข้าวเจ้าพรีเจลที่ในชั้น เพื่อใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ขนมจีน โดยใช้น้ำแป้งข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 40 ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งเท่ากับ 0.01 นิ้ว ความดันไอน้ำ 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบของลูกกลิ้งเท่ากับ 12 รอบต่อนาที เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าการดูดซับน้ำพบว่า ภายหลังจากตัดแปรงแป้งข้าวเจ้าสามารถดูดซับน้ำได้สูงขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแคบ

ลง ทำให้แผ่นแป้งพรีเจลาทีไนซ์มีความบางมากขึ้น ทำให้เมื่อนำมาบดเป็นผงแล้วสามารถละลายและกระจายตัวในน้ำเย็นได้มากขึ้น

สายสนม (2534) ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวเพื่อใช้ในการเป็นส่วนผสมของแป้งชุบทอด โดยช่วยเพิ่มความหนืดและช่วยให้เกาะติดสม่ำเสมอ ทำการตัดแปรด้วยวิธีพรีเจลาทีไนซ์ชั้นด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ มีระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.01 นิ้ว ความดันไอน้ำ 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบของลูกกลิ้งเท่ากับ 12 รอบต่อนาที ความเข้มข้นของน้ำแป้งร้อยละ 40 สำหรับแป้งข้าวเจ้า และร้อยละ 45 สำหรับแป้งข้าวเหนียว พบว่าแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว เมื่อผ่านการตัดแปรสามารถช่วยเพิ่มความหนืดของน้ำแป้งชุบทอดและยังช่วยให้การเกาะติดสม่ำเสมออีกด้วย

3.2 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการผลิตสตาร์ชพรีเจลาทีไนซ์ โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างการให้ความร้อนแก่สารละลาย (cooking) และเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Knight, 1969) ซึ่งเป็นการนำสารแขวนลอยสตาร์ชมาทำแห้ง โดยการทำให้กระจายและกลายเป็นอนุภาคหรือหยดน้ำเล็ก ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-200 ไมโครเมตร และพ่นเข้าไปในกระแสนของลมร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 150-300 องศาเซลเซียส ในถังอบ (chamber) ขนาดใหญ่ น้ำในหยดของสารแขวนลอยสตาร์ชจะถูกทำให้ระเหยออกอย่างรวดเร็วภายในเวลา 1-10 วินาที เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก และจะมีการควบคุมอัตราการส่งวัตถุดิบเพื่อให้อุณหภูมิของอากาศที่จุดทางออกเท่ากับ 90-100 องศาเซลเซียส (ผลิตภัณฑ์จะมีอุณหภูมิประมาณ 40-50 องศาเซลเซียส) การไหลของอากาศภายในระบบอาจเป็นแบบขนานหรือสวนทางก็ได้ โดยที่ผงสตาร์ชแห้งจะเคลื่อนที่มารวมอยู่ที่ด้านล่างของเครื่องและถูกเคลื่อนย้ายออกไปโดยระบบนิวแมติกส์ (pneumatic) โดยใช้ไซโคลน (cyclone) (Knight, 1969; วิไล, 2547) ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Anonymous (n.d.)

3. คุณสมบัติและการนำไปใช้

สตาร์ชพรีเจลาทีไนซ์มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดีกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากโครงสร้างภายในของสตาร์ชแกรนูลถูกทำลาย โดยมีการทำลายส่วนที่เป็นผลึกในสตาร์ชแกรนูล (Wootton and Bamunuarachchi, 1978) ดังนั้นสตาร์ชพรีเจลาทีไนซ์จึงกระจายตัวได้ดีในน้ำเย็น ดูดซับน้ำได้สูงและให้ความหนืดทันที (Whistler and Paschall, 1967) เมื่อนำสตาร์ชพรีเจลาทีไนซ์มาให้ความร้อน จะทำให้มีความหนืดและการเกิดเจลลดลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของสตาร์ชพรีเจลาทีไนซ์ คือ การเกาะกันเป็นก้อน (lumping) ได้ง่าย (Knight, 1969)

สตาร์ชพรีเจลาทีไนซ์นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากสามารถละลายและให้ความหนืดได้ทันที โดยไม่ต้องใช้ความร้อน เช่น ใช้ในขนมพุดดิ้ง น้ำเกรวี่ ซอส ไล้กึ่งสำเร็จรูป พาย ครีมหน้าขนมต่างๆ ส่วนผสมของซูปผง ใช้เป็นสารยึดเกาะในอาหารประเภทเนื้อเพื่อช่วยรักษาความชุ่มชื้น และอุ้มน้ำในผลิตภัณฑ์ ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมเค้กเพื่อช่วยการดูดซับน้ำและเก็บฟองอากาศได้ดีขึ้น ทำให้เค้กมีความชุ่มชื้น และปริมาตรเพิ่มขึ้น ได้ลักษณะเนื้อเค้กที่มีความสม่ำเสมอ ใช้เป็นส่วนผสมในของหวานที่มีลักษณะคล้ายโยเกิร์ต ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวสำหรับส่วนผสมของอาหารแช่แข็ง เช่น milk shake ใช้ในเกลลี่กรรรม เป็นสารยึดเกาะและสารช่วยแตกตัวในการผลิตยาเม็ด ซึ่งจะช่วยให้เม็ดยาไม่เสียคุณสมบัติในการ

ไหลและการยืดเกาะเป็นเม็ด โดยนำสตรัซพรีเจลมาละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้องและเติมส่วนผสมของยาหรือผสมเป็นผงแห้งกับส่วนผสมอื่นๆ แล้วเติมน้ำที่หลัง ซึ่งจะให้คุณสมบัติในการยืดเกาะดีกว่าการใช้สตรัซเพสท์ นอกจากนี้การที่สามารถใช้สตรัซพรีเจลได้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นการช่วยประหยัดพลังงานในการให้ความร้อนสำหรับการเตรียมสตรัซเพสท์ (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2546; Singh *et al.*, 2007)



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

กล้วยดิบพันธุ์น้ำว้า *Musa* (ABB group) ‘Kluai Namwa’ อายุประมาณ 115 วัน นับตั้งแต่ออกปลีกล้วย โดยรับซื้อจากเกษตรกรที่ อ.หนองแค จ.สระบุรี

2. สารเคมี

2.1 สารเคมีสำหรับเตรียมสารจากกล้วย

2.1.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH: Analytical grade, Merck KGaA, Germany)

2.1.2 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl: Analytical grade, Merck KGaA, Germany)

2.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์โปรตีน

2.2.1 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H_2SO_4 : Analytical grade, Mallinckrodt Barker, USA)

2.2.2 กรดบอริก (Boric acid; H_3BO_3 : Analytical grade, Merck KGaA, Germany)

2.2.3 คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulfate; $CuSO_4$: Analytical grade, Fisher Scientific UK Limited, UK)

2.2.4 โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulfate; K_2SO_4 : Analytical grade, Ajax Finechem, New Zealand)

2.2.5 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl: Analytical grade, Merck KGaA, Germany)

2.2.6 เมทิลเรด (Methyl red; $C_{15}H_{15}N_3O_2$: Analytical grade, Panreac Quimica SK, Spain)

2.2.7 โบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol green; $C_{21}H_{14}Br_4O_5S$: Analytical grade, Ajax Finechem, New Zealand)

2.2.8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH: Commercial grade, Thasco Chemical Co., Thailand)

2.3 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

2.3.1 ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether: Analytical grade, Mallinckrodt Chemical, USA)

2.4 สารเคมีสำหรับสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ช

2.4.1 กลีเซอรอล (Glycerol; $\text{CH}_2\text{OHCHOHCH}_2\text{OH}$: Analytical reagent, CARLO ERBA, Italy)

2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเอมิโลส

2.5.1 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethanol; $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$: Analytical reagent, LAB-SCAN LTD., Ireland)

2.5.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH: Analytical grade, Merck KGaA, Germany)

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

2.5.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (Type III: From Potato Butanol Content 2% Essentially free of amylopectin, Analytical grade, Sigma – Aldrich chemic, Germany)

2.5.5 ไอโอดีน (Iodine; I_2 : Analytical grade, Asia Pacific Specialty Chemical limited, Australia)

2.6 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณ resistant starch

2.6.1 สารเคมีที่มีอยู่ในชุดตรวจสอบปริมาณ resistant starch (Resistant starch assay kit K-RSTAR, assay procedure RSTAR 11/02; 100 assays per kit: Megazyme International Ireland Ltd., Ireland)

ก. Pancreatic α -amylase (Pancreatin, 10g, 3 Ceralpha Units/mg)

ข. Amyloglucosidase (12 mL, 3300 Units/mL)

ค. Glucose Determination Reagent (GOPOD) (for 1 litre)

ง. Glucose Reagent Buffer (concentrate) (50 mL)

จ. Glucose Standard Solution (1 mg/mL in 0.2% benzoic acid)

ฉ. Resistant Starch Control (with stated level of RS)

2.6.2 สารเคมีอื่นๆ

ก. กรดมาเลอิก (Maleic acid; $C_4H_4O_4$: HPLC grade, Fluka, Austria)

ข. กรดแอซิดิก (Acetic acid; CH_3COOH : Analytical grade, J.T. Baker, Thailand)

ค. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) (Laboratory grade, UNILAB, Asia Pacific Specialty Chemicals Limited, Australia)

ง. โซเดียมเอไซด์ (Sodium azide; NaN_3 : Analytical grade, SIGMA-ALDRICH, U.S.A.)

จ. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Potassium dihydrogen orthophosphate; KH_2PO_4 : Analytical grade, Ajax Firechem, Australia)

ฉ. กรดเตตระไฮดรอกซีเบนโซอิก (4-hydroxybenzoic acid; $C_7H_6O_3$: Analytical grade, Fluka, Germany)

ช. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl : Analytical grade, Merck KGaA, Germany)

ซ. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; $NaOH$: Analytical grade, Merck KGaA, Germany)

ณ. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH : Analytical grade, Merck KGaA, Germany)

ญ. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethanol; C_2H_6O : Analytical reagent, LAB-SCAN LTD., Ireland)

2.7 สารเคมีเพื่อศึกษาอิทธิพลของส่วนประกอบอาหารต่อสมบัติด้านความหนืด

2.7.1 ซูโครส (Sucrose; $C_{12}H_{22}O_{11}$: Analytical grade, Ajax Finechem, New Zealand)

2.7.2 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride; NaCl: Analytical grade, Ajax Finechem, New Zealand)

3. เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างแป้งและสารชักลวบน้ำว่าดัดแปร

3.1 เครื่องอบลมร้อน (Tray drier: B. W. S. Trading Ltd. (Partnership), Thailand)

3.2 เครื่องบดตัวอย่างแห้ง (Hammer mill: SK1, Retsch, Germany)

3.3 เครื่องบดตัวอย่าง (Blender: model VA-M11L, Hitachi, Japan)

3.4 เครื่องผสมแบบใบกวนขนาดห้องปฏิบัติการ (Overhead stirrer: model HS-100, DAIHAN Scientific Co., Ltd. Korea)

3.5 ตะแกรงร่อนขนาด 80 เมช (80 mesh: ASTM E11 180micron, Retsch GmbH, Germany)

3.6 ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช (100 mesh: ASTM E11 150 micron, Retsch GmbH, Germany)

3.7 ตะแกรงร่อนขนาด 170 เมช (170 mesh: ASTM E11 90 micron, Retsch GmbH, Germany)

3.8 ตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช (200 mesh: ASTM E11 75 micron, Retsch GmbH, Germany)

3.9 เครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิต่ำ (Refrigerated centrifuge: Biofuge primo, Kendro Laboratory Products, Germany)

3.10 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven: model 400, Memmert GmbH&Co. KG, Germany)

3.11 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter: model 06071N, Jenco Electronics Ltd., China)

3.12 เครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer: model HS-101, Thailand)

3.13 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath: model OB14, Memmert GmbH&Co. KG, Germany)

3.14 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่ (Double drum drier: T. C. Tech Ltd., Thailand)

3.15 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drier: mobile minor, GEA Niro A/S, Denmark)

4. เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์คุณภาพ

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

4.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (Light microscope: Axiolab, Carl Zeiss, Germany)

- 4.3 แผ่นสำหรับให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง (Hot stage: PE 94, Linkam Scientific Instruments, U.K.)
- 4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: model JSM-6480LV, JEOL, Japan)
- 4.5 ชุดวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (BÜCHI, B-324, LabortechnikAG, Switzerland)
- 4.6 ชุดวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (SOXTECH SYSTEM, HT 1043, Tecator, Sweden)
- 4.7 เตาเผา (Muffle Furnace, Tactical 308, GALLEN KAMP, U.K.)
- 4.8 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: model JDX-3530, JEOL, Japan)
- 4.9 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter: model Pyris 1, Perkin-Elmer U.S.A.) และภาชนะปลอดสนิม (stainless pan)
- 4.10 เครื่องวิเคราะห์ความหนืด (Brookfield Viscometer: model DV-III, Brookfield, U.S.A.)
- 4.11 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer: model RVA3D, Newport Scientific Instrument & Engineering, Australia)
- 4.12 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer: model Spectronic Genesys 10 UV, Scanning Thermo Electron Corporation, U.S.A.)
- 4.13 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath: model OB14, Memmert GmbH&Co. KG, Germany) และอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking water bath: model SV 1422, Memmert GmbH&Co. KG, Germany)
- 4.14 เครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer: model HS-101, Thailand) และแท่งแม่เหล็ก ขนาด 4×12 มิลลิเมตร
- 4.15 เครื่องหมุนเหวี่ยงขนาดเล็ก (Bench Centrifuge: Z200A, Hermle Labortechnik, Germany)
- 4.16 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter: model 06071N, Jenco Electronics Ltd., China)
- 4.17 ภาชนะอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น (Moisture can)
- 4.18 ถ้วยกระเบื้องเคลือบพร้อมฝา
- 4.19 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (model SPB31, Scale Tech, Germany)
- 4.20 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven: model 400, Memmert GmbH&Co. KG, Germany)
- 4.21 ไมโครปิเปต (Micropipette)

4.22 ตู้แช่เยือกแข็ง (Freezer) (model SF-C1497(GYN), Sanyo, Thailand)

4.23 เครื่องแก้ว

4.24 นาฬิกาจับเวลา (Stopwatch)

วิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างแป้งและสแตร์ชกล้วยน้ำว้า

1.1 เตรียมตัวอย่างแป้งกล้วยน้ำว้า

นำกล้วยน้ำว้าดิบอายุประมาณ 115 วัน ตัดแต่งให้มีขนาดพอเหมาะ แล้วนำเข้าอบในเครื่องอบลมร้อนประมาณ 5 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดหยาบด้วยเครื่องบดตัวอย่าง (blender) แล้วจึงนำไปบดละเอียดอีกครั้งด้วยเครื่องบดตัวอย่างแห้ง (hammer mill) นำแป้งที่ได้มาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

1.2 สกัดสแตร์ชกล้วยน้ำว้า

สกัดสแตร์ชกล้วยน้ำว้าโดยตัดแปลงจากวิธีของไพลาภา (2550) นำแป้งที่ได้ไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (แป้ง : 0.05 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์; 1 : 5) กวนสารละลายด้วยเครื่องผสมแบบใบกวนขนาดห้องปฏิบัติการ (overhead stirrer) คนให้เข้ากันตลอดเวลาประมาณ 20 ชั่วโมง นำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงอุณหภูมิต่ำ (refrigerated centrifuge) ด้วยความเร็วรอบ 3,000 g ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เทส่วนของเหลวทิ้ง ขูดส่วนสีน้ำตาลด้านบนของส่วนที่ตกตะกอนออก ทำละลายส่วนที่ตกตะกอนด้วยน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน 1:2 (แป้ง : น้ำกลั่น) หลังจากนั้นนำน้ำแป้งมากรองผ่านตะแกรงขนาด 80, 170, 200 เมชตามลำดับ โดยใช้น้ำกลั่นล้างส่วนที่ไม่สามารถละลายออกให้ได้มากที่สุด ทิ้งให้ตกตะกอน เทของเหลวด้านบนออก ทำซ้ำอีกประมาณ 2-3 ครั้ง และปรับพีเอช (pH) ให้เป็นกลางด้วย 0.05 โมลาร์ กรดไฮโดรคลอริก นำน้ำแป้งไปล้าง และหมุนเหวี่ยงด้วยน้ำกลั่นด้วยความเร็วรอบ 3,000 g ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เทส่วนของเหลวทิ้ง จากนั้นนำส่วนที่เป็นของแข็งไปอบด้วยตู้อบแห้งอุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 5-8 ชั่วโมง นำสแตร์ชที่ได้มาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช แล้วจึงเก็บไว้ในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่อุณหภูมิห้อง

2. การเตรียมตัวอย่างแป้งและสตาร์ชด้วยวิธีพรีเจลลิ่งในน้ำ

2.1 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่ (Double drum drier)

ทำการตัดแปรด้วยวิธีพรีเจลลิ่งในน้ำโดยตัดแปลงจากวิธีของ สายสนม (2528) นำตัวอย่างเข้มข้นร้อยละ 50 มาผสมกับน้ำกลั่น ทำให้เกิดเจลลิ่งในเซชันโดยให้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่ (Double drum drier) ใช้ความดันไอน้ำที่ 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำให้ผิวลูกกลิ้งมีอุณหภูมิ 127 องศาเซลเซียส ลูกกลิ้งหมุนด้วยความเร็ว 8 รอบต่อนาที มีระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งเป็น 0.15, 0.25 และ 0.35 มิลลิเมตร นำตัวอย่างที่ได้รับการตัดแปรมาอบและร้อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

2.2 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drier)

ทำการตัดแปรด้วยวิธีพรีเจลลิ่งในน้ำโดยเตรียมน้ำแป้งและสตาร์ชด้วยน้ำว่าความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และให้ความร้อนแก่สารละลายตัวอย่าง โดยให้เริ่มเกิดระยะการพองตัวที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที ก่อนนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยที่มีอุณหภูมิเข้าเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิออก 90-95 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างที่ได้รับการตัดแปรมาอบและร้อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช

3. ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของแป้งกล้วยน้ำว่าที่ผ่านการตัดแปร

3.1 การวิเคราะห์สี

วัดสีของตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง Minolta spectrophotometer รุ่น 3500d อ่านค่า L^* a^* b^* โดยอ่านค่าอย่างน้อย 5 ตำแหน่งของตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาดัชนีความขาว (Whiteness Index; WI) โดยสูตร

$$\text{Whiteness Index} = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$$

3.2 ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

3.2.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (Light Microscope)

หยดสารละลายกลีเซอรอล (กลีเซอริน:น้ำ 1:1) ลงบนแผ่นสไลด์ ใช้เข็มจุ่มตัวอย่าง ลงบนสารละลายบนแผ่นสไลด์ กวนเบาๆ เพื่อให้ตัวอย่างกระจายตัวก่อนปิดด้วยแผ่นปิดสไลด์ ส่อง ตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (Light microscope) ด้วยกำลังขยายขนาดต่างๆ เก็บภาพ ตัวอย่างด้วยโปรแกรม Image-Pro Plus V.6 เพื่อทำการวัดขนาดและรูปร่างของสตาโรแกรม

3.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

ทำการไล่ความชื้นในตัวอย่าง โดยการอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างมาโรยลงบนแท่นอลูมิเนียม นำส่วนผิวมาฉาบด้วยทอง จากนั้นนำไปตรวจสอบ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยกำหนดค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์ ที่กำลังขยาย 500 ถึง 2,500 เท่า (ภาคผนวก ก8)

3.3 ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึก (ดังภาคผนวก ก9)

ทดสอบชนิดผลึกของสตาโรซ์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ รุ่น JEOL JDX-3530 (theta -2theta) ทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้งและสตาโรซ์ โดยกำหนด สภาพการทดลอง คือ ใช้แหล่งกำเนิดรังสีจากทองแดง (CuK_α) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ และใช้ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ เก็บข้อมูลมุมหักเหตั้งแต่ 3 ถึง 40 องศา 2 θ อัตราเร็วในการเปลี่ยนองศา 0.02 องศาต่อวินาที ทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม JADE 6 (Materials Data Inc., Livermore, CA.) บันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก

4. ทดสอบสมบัติทางเคมีของแป้งกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการดัดแปร

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาโรซ์กล้วย (ดังภาคผนวก ก1 ถึง ก5)

- 4.1.1 ความชื้น ตามวิธีของ A.O.A.C. (2000)
- 4.1.2 ปริมาณไขมัน ตามวิธีของ A.O.A.C. (2000)
- 4.1.3 ปริมาณโปรตีน ตามวิธีของ A.O.A.C. (2000)
- 4.1.4 ปริมาณเถ้า ตามวิธีของ A.O.A.C. (2000)

4.1.5 ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีของ Juliano (1971)

4.2 ทดสอบความเป็น Resistant starch (ดังภาคผนวก ก6)

ทดสอบความเป็น Resistant starch ด้วยชุดทดสอบ Resistant Starch Assay Procedure (RSTAR 11/02) ของ Megazyme

5. วิเคราะห์สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งกล้วยน้ำว่าที่ผ่านการดัดแปร

5.1 ทดสอบความสามารถในการพองตัว

ทดสอบความสามารถในการพองตัวของแป้งกล้วย โดยดัดแปลงจากวิธีของ Waliszewski *et al.* (2003) โดยละลายตัวอย่างแป้ง (ร้อยละ 1 น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ในน้ำกลั่น นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55, 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที ทำการเขย่าหลอดทุกๆ 5 นาที แล้วจึงนำเข้าเครื่อง centrifuge ที่สภาวะ 3,000 g ประมาณ 15 นาที จากนั้นดูดของเหลวด้านบนเพื่อนำไปอบหาน้ำหนักของแข็งสุดท้าย ซึ่งน้ำหนักและคำนวณหาความสามารถในการละลาย โดยยังคงส่วนตะกอนไว้เพื่อไปชั่งน้ำหนักและคำนวณหาความสามารถในการพองตัว

5.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะด้านสัณฐานวิทยาของสตาร์ชเกรนูล

นำตัวอย่างแป้งมากระจายตัวในน้ำให้มีระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 หยดสารละลายแป้งลงบนกระจกสไลด์ และให้ความร้อนกับตัวอย่างด้วยแท่นให้ความร้อน โดยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที สังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (Light microscope) และทำการเก็บภาพทุก 5 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 95 องศาเซลเซียส ด้วยโปรแกรม Image-Pro Plus V.6

5.3 ทดสอบความสามารถในการละลายในน้ำเย็น (Cold water solubility: CWS)

ทดสอบความสามารถในการละลายในน้ำเย็น โดยค่อยๆ ละลายตัวอย่างแป้งลงในน้ำกลั่น นำไปปั่นด้วยเครื่องปั่น (blender) 2 นาที และใส่ลงในหลอด centrifuge นำเข้าเครื่อง centrifuge ที่สภาวะ 1,200 g ประมาณ 15 นาที จากนั้นดูดของเหลวด้านบนเพื่อนำไปอบหาน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักและคำนวณหาความสามารถในการละลายในน้ำเย็น (Cold Water Solubility : CWS) (ภาคผนวก ก7)

5.4 ทดสอบความสามารถดูดซับน้ำ (Water retention capacity: WRC)

ทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งกล้วย โดยคัดแปลงจากวิธีของ Aloys and Zhou (2005) โดยละลายตัวอย่างแป้ง 1 กรัมในน้ำกลั่น นำไปให้ตั้งที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 30 นาที แล้วจึงนำเข้าเครื่อง centrifuge ที่สภาวะ 3,710 rpm ประมาณ 25 นาที จากนั้นแยกของเหลวด้านบนออกจากส่วนตะกอนเพื่อนำไปหาปริมาณน้ำ ซึ่งน้ำหนักและคำนวณหาความสามารถในการดูดซับน้ำ

5.5 ทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

5.5.1 ตรวจสอบสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชัน

ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของตัวอย่างด้วยการใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter; DSC) โดยคัดแปลงจากวิธีของ Nunez-Santiago *et al.* (2004) นำตัวอย่างประมาณ 7 มิลลิกรัมใส่ลงในภาชนะปลอดสนิม (stainless pan) เติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน (deionized water) จนมีความชื้นร้อยละ 70 ปิดฝาภาชนะให้สนิท บ่มที่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 ชั่วโมง ใส่ตัวอย่างในเครื่อง DSC โดยมีภาชนะปลอดสนิมเปล่าเป็นตัวอย่างอ้างอิง และให้ความร้อนกับตัวอย่างจาก 10 องศาเซลเซียสถึง 130 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้น (T_o) อุณหภูมิสูงสุด (T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และพลังงานเอนทัลปี (enthalpy, ΔH) ในกระบวนการเจลลิตีในเซชันและกระบวนการสลายโครงสร้างผลึก

5.5.2 ตรวจสอบสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน

นำตัวอย่างที่ตรวจสอบในข้อ 5.5.1 ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและ 14 วัน แล้วจึงนำมาตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยให้ความร้อนกับตัวอย่างจาก 10 องศาเซลเซียสถึง 130 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้น (T_o) อุณหภูมิสูงสุด (T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และพลังงานเอนทัลปี (enthalpy, ΔH) ในกระบวนการเจลลิตีในเซชันและกระบวนการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน

5.6 ทดสอบสมบัติด้านความหนืด

5.6.1 ทดสอบสมบัติด้านความหนืดในน้ำเย็น (Cold Viscosity)

ทดสอบความหนืดในน้ำเย็น โดยดัดแปลงจากวิธีของ Alves *et al.* (1999) ทำการละลายตัวอย่างเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้งในน้ำกลั่น วัดความหนืดของตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืด (Brookfield Viscometer) โดยใช้ความเร็วรอบ 75 rpm ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

5.6.2 ทดสอบสมบัติด้านการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งคัดแปร

ทดสอบความหนืด โดยการละลายตัวอย่างเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้งในน้ำกลั่น ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืด โดยวัดความหนืดของตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer; RVA) (ภาคผนวก ก10) เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลงหรือค่าเบรกดาวน์ (breakdown) คือ ค่าความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด และค่าเซตแบค (setback from trough) คือ ค่าความแตกต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด

6. อิทธิพลของส่วนประกอบอาหารต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้ง

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืด โดยการละลายตัวอย่างเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้งในน้ำกลั่น ซึ่งจะมีการเติมซูโครสและโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10 และ 20 จากนั้นจึงตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืด โดยวัดความหนืดของตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer; RVA) เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลงหรือค่าเบรกดาวน์ (breakdown) และค่าเซตแบค (setback from trough)

7. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติจากแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Random Design; CRD) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

8. สถานที่ทดลอง

ห้องปฏิบัติการโปรตีนและไขมัน และ อาคารแปรรูป ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฝ่ายบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ห้องปฏิบัติการเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

9. ระยะเวลาการทดลอง

การทดลองเริ่มเดือนมกราคม 2550 สิ้นสุดเมื่อเดือนมกราคม 2552

ผลและวิจารณ์

1. การตรวจสอบร้อยละของผลได้และลักษณะทางกายภาพของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร

จากการทดลองได้ทำการศึกษาการดัดแปรแป้งกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีพรีเจลาไทไนเซชัน 2 วิธี คือ การดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่ (DNWF) และการดัดแปรโดยให้ความร้อนแก่สารละลายก่อนนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SNWF) ซึ่งเป็นวิธีการที่ต้องผ่านกระบวนการต่างๆหลายขั้นตอน ตั้งแต่การเตรียมตัวอย่าง ขั้นตอนเข้าสู่เครื่องทำแห้ง จนกระทั่งเป็นผลิตภัณฑ์แป้งดัดแปร อีกทั้งยังมีการใช้ความร้อนเข้ามาร่วมด้วย ซึ่งกระบวนการต่างๆเหล่านี้มีผลต่อปริมาณตัวอย่าง จึงได้ทำการสังเกตลักษณะภายนอกของตัวอย่างและคำนวณเพื่อหาค่าร้อยละของผลได้ของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ร้อยละของผลได้ของแป้งกล้วยน้ำว้าและลักษณะของแป้งเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า

ตัวอย่าง	ร้อยละของผลได้	ลักษณะเมื่อสังเกต และมองด้วยตาเปล่า
NWF	53.89 ¹	สีน้ำตาลอ่อน มีอนุภาคสีดำปนอยู่บ้าง มีกลิ่นหอม เนื้อละเอียด
DNWF0.15	96.77 ²	สีน้ำตาล มีอนุภาคสีดำปนอยู่บ้าง มีกลิ่นหอม เนื้อหยาบกว่าแป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติ
DNWF0.25	96.38 ²	
DNWF0.35	97.39 ²	
SNWF65	89.62 ²	สีน้ำตาล มีอนุภาคสีดำปนอยู่บ้าง มีกลิ่นหอม เนื้อหยาบ และมีการจับกันเป็นก้อนกว่าแป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติ
SNWF75	88.95 ²	
SNWF85	86.14 ²	

หมายเหตุ NWF คือ แป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติ; DNWF 0.15, 0.25 และ 0.35 คือ แป้งที่ดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่ ที่มีระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งเป็น 0.15, 0.25 และ 0.35 มิลลิเมตร; SNWF65, 75 และ 85 คือ แป้งที่ดัดแปรด้วยการให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งจนมีอุณหภูมิเป็น 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ก่อนนำไปทำแห้งอย่างรวดเร็วด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

¹ คือ คัดจากน้ำหนักสด, ² คือ คัดจากแป้งกล้วยน้ำว้าดิบ

จากผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (NWF) มีค่าร้อยละของผลได้เมื่อคิดจากน้ำหนักสดเท่ากับร้อยละ 53.89 ในขณะที่แป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปรมีค่าร้อยละของผลได้เมื่อคิดจากแป้งกล้วยน้ำว้าดิบมากกว่าร้อยละ 85 ดังตารางที่ 4 โดยแป้งตัดแปร SNWF ให้ค่าร้อยละของผลได้ต่ำกว่าแป้งตัดแปร DNWF เนื่องจากวิธีการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างหลายขั้นตอนและเมื่อตัวอย่างถูกป้อนเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ตัวอย่างจะต้องผ่านสายยางและท่อต่างๆ รวมทั้งเมื่อทำการป้อนตัวอย่างไประยะหนึ่ง สารละลายตัวอย่างจะเกาะที่บริเวณหัวพ่น (nozzle) ทำให้หัวพ่นตัน นอกจากนี้เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่า มีตัวอย่างที่แห้งแล้วตกค้างในบริเวณถังอบ (chamber) ทำให้สูญเสียปริมาณของตัวอย่าง ในขณะที่วิธีการตัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งนั้น สารละลายตัวอย่างจะผ่านเข้าสู่เครื่องโดยตรง โดยตัวอย่างที่ถูกป้อนจะฉาบบริเวณผิวหน้าลูกกลิ้ง และถูกขูดออกด้วยใบมีดของตัวเครื่อง ซึ่งจากการสังเกตพบว่า มีตัวอย่างแป้งตัดแปรตกค้างอยู่ในเครื่องน้อยมาก ทำให้ปริมาณของตัวอย่างแป้งตัดแปรวิธีนี้มีค่าร้อยละของผลได้มากกว่า

เมื่อทำการพิจารณาลักษณะทางกายภาพของแป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติ (NWF) และแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปร พบว่าแป้งตัดแปรที่ผลิตได้ มีลักษณะเนื้อแป้งหยาบกว่า NWF แต่ SNWF จะมีลักษณะการเกาะตัวกันเป็นก้อนร่วมด้วย ดังตารางที่ 4 และเมื่อพิจารณาสีของตัวอย่างพบว่าแป้งตัดแปรทั้ง 2 วิธี มีสีน้ำตาลเข้มกว่า NWF ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยพบว่าแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปร ให้ค่า L^* ต่ำกว่า NWF ในขณะที่ค่า a^* และ b^* มีค่าที่สูงกว่า ดังตารางที่ 5

ค่า a^* และ b^* ของแป้งตัดแปรที่มีค่าสูง แสดงว่ามีลักษณะเป็นสีน้ำตาลมากกว่าแป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติ (NWF) และเมื่อนำค่า L^* a^* และ b^* ที่ได้ไปคำนวณค่าดัชนีความขาว พบว่าแป้งกล้วยตามธรรมชาติ (NWF) มีค่าดัชนีความขาวสูงกว่า SNWF และ DNWF ตามลำดับ ดังตารางที่ 5 ซึ่งค่าสีที่วิเคราะห์ได้สอดคล้องกับลักษณะสีของตัวอย่างที่สามารถสังเกตเห็นได้

ตารางที่ 5 สีของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและดัดแปร

ตัวอย่าง	ค่าสี			ค่าดัชนีความขาว (Whiteness index)
	L*	a*	b*	
NWF	83.22 ^f ± 0.41	1.68 ^a ± 0.08	11.05 ^c ± 0.14	79.84 ^g ± 0.42
DNWF0.15	77.47 ^c ± 0.42	3.36 ^c ± 0.04	13.96 ^d ± 0.13	73.28 ^c ± 0.41
DNWF0.25	76.55 ^b ± 0.36	3.66 ^d ± 0.04	14.51 ^e ± 0.22	72.18 ^b ± 0.40
DNWF0.35	75.69 ^a ± 0.26	3.81 ^e ± 0.06	14.65 ^e ± 0.17	71.37 ^a ± 0.27
SNWF65	77.12 ^c ± 0.21	3.65 ^d ± 0.04	10.86 ^c ± 0.11	74.41 ^d ± 0.23
SNWF75	78.27 ^d ± 0.44	3.41 ^c ± 0.06	10.34 ^b ± 0.04	75.69 ^e ± 0.41
SNWF85	79.63 ^e ± 0.26	3.26 ^b ± 0.07	9.89 ^a ± 0.18	77.12 ^f ± 0.30

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

($p \leq 0.05$)

L* คือ ค่าที่บอกความสว่างของตัวอย่าง

a* คือ ค่าที่ใช้กำหนดความเป็นสีแดง มีค่าเป็น + สีเขียว มีค่าเป็น -

b* คือ ค่าที่ใช้กำหนดความเป็นสีเหลือง มีค่าเป็น + สีนํ้าเงิน มีค่าเป็น -

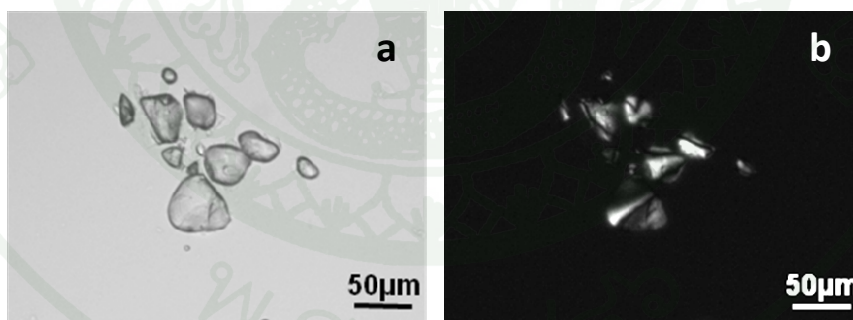
เมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของแป้งกล้วยน้ำว้า (NWF) และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร พบว่าการดัดแปรทั้ง 2 วิธี ทำให้แป้งมีสีเข้มกว่าแป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติ (NWF) โดยพบว่า DNWF มีสีเข้มที่สุด การเปลี่ยนแปลงสีของแป้งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการดัดแปรมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบภายในแป้ง ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) เนื่องจากในกระบวนการดัดแปรมีการใช้ความร้อนสูง อาจมีผลทำให้เกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดสูงขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาเมลลาร์ดเกิดจากการรวมตัวกันของหมู่เอมิโน (amino group) กับน้ำตาลรีดิวซิง (reducing sugar) พัฒนาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลและน้ำตาลแดง (นิธิยา, 2549; BeMiller and Huber, 2008; Pacheco-Delahaye *et al.*, 2008) ซึ่งกระบวนการทำแห้งด้วยลูกกลิ้งเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อน ที่มีแรงเสียดทานร่วมด้วย ส่งผลให้สารตั้งต้นเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้สารตั้งต้นถูกทำลาย (BeMiller and Whistler, 2009) จึงคาดว่าน่าจะมีผลให้มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซิงมากขึ้น และการดัดแปรด้วยวิธีนี้ใช้เวลานานกว่า (ประมาณ 2-20 วินาที) จึงมีโอกาที่จะเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้มากกว่าตัวอย่าง SNWF ที่

ได้รับความร้อนจากลมร้อนอย่างรวดเร็ว (1-10 วินาที) เพียงอย่างเดียว (Kalogianni *et al.*, 2002; วิไล, 2547)

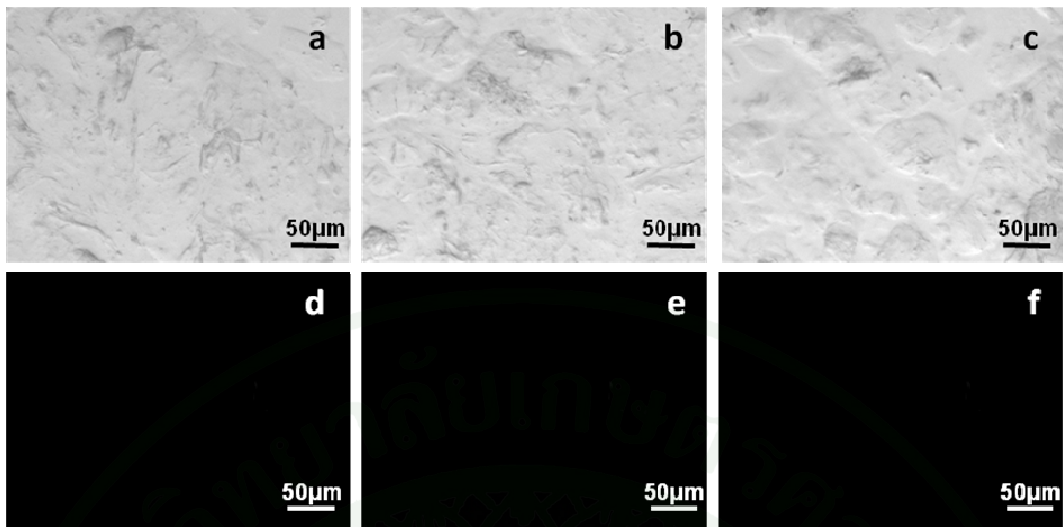
2. สมบัติทางกายภาพของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปรด้วยวิธีพรีเจลาไทไนซ์

2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งกล้วยน้ำว้าและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปรด้วยวิธีพรีเจลาไทไนซ์

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติ (NWF) และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปรด้วยวิธีพรีเจลาไทไนซ์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน และกล้องจุลทรรศน์แบบบิกระนาบแสง ที่กำลังขยาย 100 เท่า และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500 และ 2,500 เท่า พบว่าลักษณะของสตาร์ชแกรนูลกล้วยน้ำว้าในตัวอย่าง NWF จะมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีทั้งที่เป็นทรงยาวรี ทรงกลม และที่พบมากที่สุดคือ ลักษณะคล้ายเปลือกหอย ดังภาพที่ 23 และพบว่าแป้งกล้วยน้ำว้าจะมีองค์ประกอบอื่นๆ ปะปนอยู่บนผิวของสตาร์ชแกรนูล (ภาพที่ 26a) จากการตรวจสอบขนาดของสตาร์ชแกรนูลพบว่ามีความแตกต่างกัน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 19-40 ไมโครเมตร



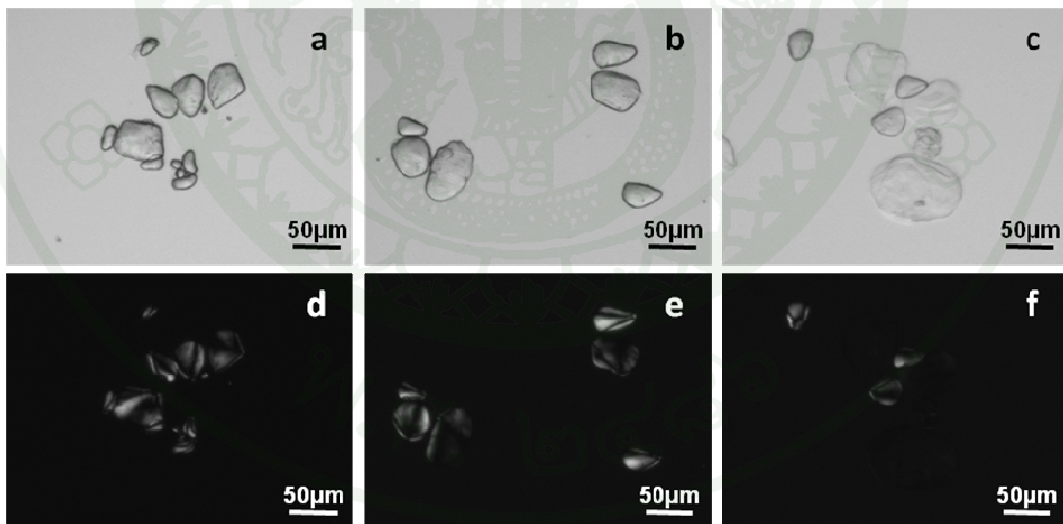
ภาพที่ 23 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชแกรนูลกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ a) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านและ b) กล้องจุลทรรศน์แบบบิกระนาบแสง ที่กำลังขยาย 100 เท่า



ภาพที่ 24 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชเกรนูล DNWF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (a-c) และกล้องจุลทรรศน์แบบบิกระนาบแสง (d-f) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

หมายเหตุ a-c คือ ลักษณะสตาร์ชเกรนูลจากแป้ง DNWF0.15, 0.25 และ 0.35 ตามลำดับ

d-f คือ ลักษณะสตาร์ชเกรนูลจากแป้ง DNWF0.15, 0.25 และ 0.35 ตามลำดับ

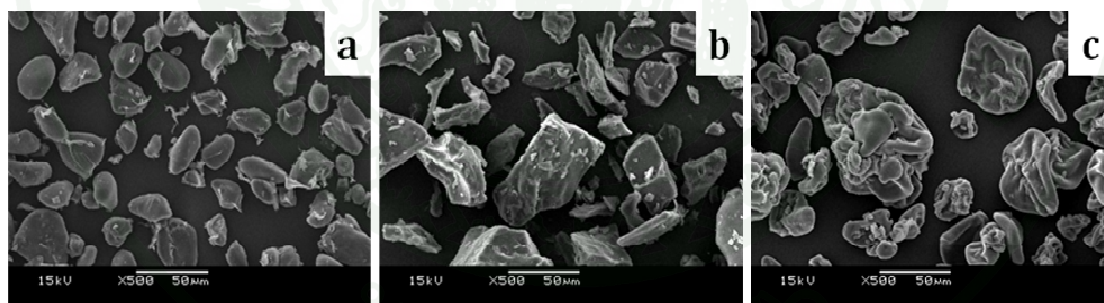


ภาพที่ 25 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสตาร์ชเกรนูล SNWF ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (a-c) และกล้องจุลทรรศน์แบบบิกระนาบแสง (d-f) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

หมายเหตุ a-c คือ ลักษณะสตาร์ชเกรนูลจากแป้ง SNWF65, 75 และ 85 ตามลำดับ

d-f คือ ลักษณะสตาร์ชเกรนูลจากแป้ง SNWF65, 75 และ 85 ตามลำดับ

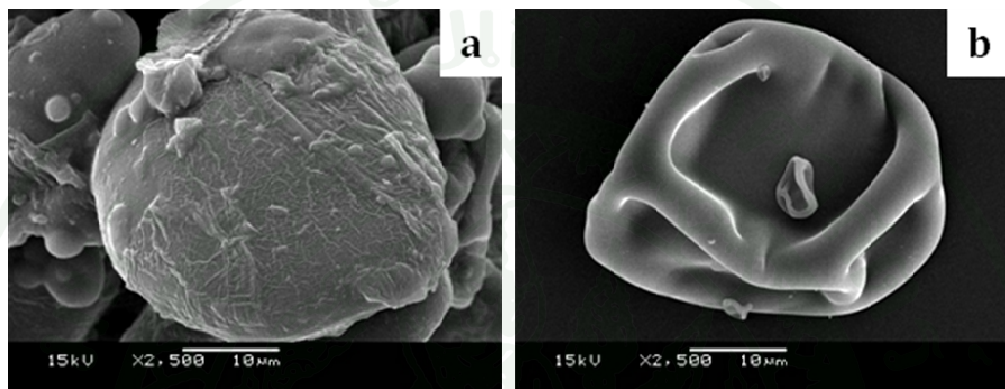
จากภาพที่ 23-25 เมื่อสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์แบบบิกระนาบแสง พบว่า NWF มีลักษณะสสารแกรนูลที่สมบูรณ์ ปรากฏไบรีฟรินเจนท์ (birefringent) ชัดเจน ดังภาพที่ 23b แสดงให้เห็นว่าสสารแกรนูลจากแป้งกล้วยน้ำว่าฉิมมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและมีผลึกที่สมบูรณ์ จึงทำให้มีคุณสมบัติในการบิกระนาบแสง ในขณะที่แป้งกล้วยน้ำว่าที่ผ่านกระบวนการคัดแปรมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะในตัวอย่าง DNWF พบว่าสสารแกรนูลถูกทำลายทั้งหมดและไม่ปรากฏไบรีฟรินเจนท์ (ภาพที่ 24d-f) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างได้สูญเสียความเป็นระเบียบและสมบัติในการบิกระนาบแสง โดยสสารแกรนูลจากแป้ง DNWF ได้สูญเสียความเป็นผลึก ในขณะที่ SNWF พบว่ายังคงมีสสารแกรนูลอยู่คล้ายกับ NWF และสสารแกรนูลบางหน่วยมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น โดยมีลักษณะเหมือนกับสสารแกรนูลที่มีการพองตัว (ภาพที่ 25a-c) แต่ยังคงปรากฏไบรีฟรินเจนท์ ในขณะที่สสารแกรนูลบางหน่วยที่มีลักษณะเหมือนกับสสารแกรนูลมีการพองตัวและไม่ปรากฏไบรีฟรินเจนท์ ดังภาพที่ 25d-f แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างแป้งคัดแปรม SNWF ยังคงมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบและมีลักษณะของความเป็นผลึกอยู่ แต่มีการสูญเสียความเป็นผลึกไปแล้วบางส่วน โดยมีแนวโน้มเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งเพิ่มสูงขึ้นก่อนการทำแห้ง จะทำให้จำนวนสสารแกรนูลที่ปรากฏไบรีฟรินเจนท์น้อยลง



ภาพที่ 26 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ a) แป้งกล้วยน้ำว่าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว่าคัดแปรมด้วยวิธี b) เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (DNWF) และ c) เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SNWF) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เมื่อทำการสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสสารแกรนูลภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสสารแกรนูลในตัวอย่าง DNWF ถูกทำลายและมีรูปร่างเป็นแผ่น (ภาพที่ 26b) เนื่องจากการที่ระยะห่างลูกกลิ้งแคบจะมีแรงกระทำต่อสสารแกรนูลมาก ทำให้สสารแกรนูลแตกออกและสูญเสียโครงสร้าง ซึ่งการคัดแปรมด้วยวิธีนี้มีผลให้สสารแกรนูลถูกทำลาย ในขณะที่ SNWF

พบว่ายังคงมีสสารแกรนูโลอยู่คล้ายกับ NWF โดยมีลักษณะเหมือนกับสสารแกรนูโลที่มีรูปร่างบิดเบี้ยว ยุบตัว บางแกรนูโลจะแยกกันอยู่อย่างอิสระ และบางส่วนแกรนูโลเกาะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (ภาพที่ 26c) เมื่อเพิ่มกำลังขยายเพื่อสังเกตลักษณะพื้นผิวของสสารแกรนูโล พบว่าสสารแกรนูโลบางหน่วยจะมีลักษณะเชื่อมติดกันที่บริเวณผิว และสสารแกรนูโลบางหน่วยมีองค์ประกอบที่มีลักษณะเป็นเยื่อใยปกคลุมอยู่บริเวณผิวนอกของแกรนูโล ดังภาพที่ 27a



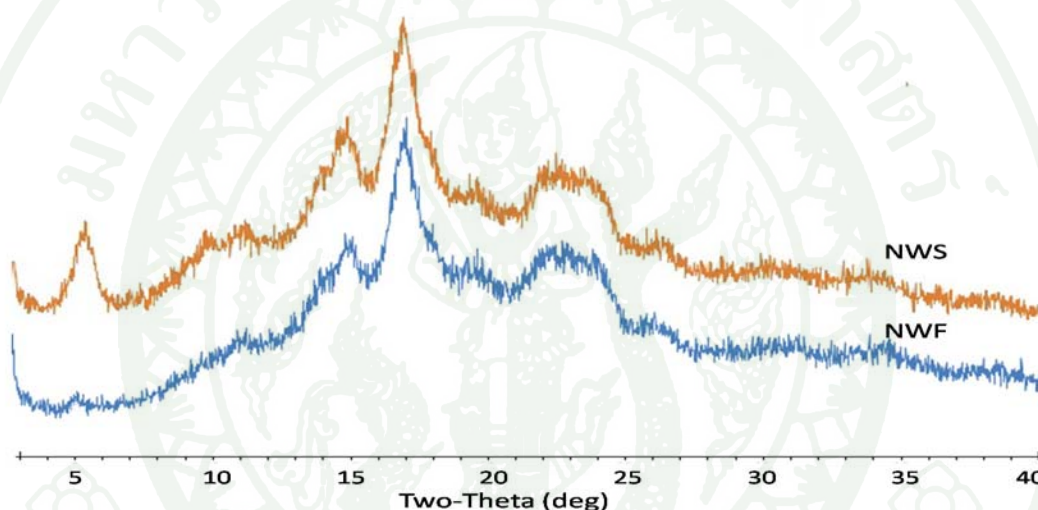
ภาพที่ 27 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ a) แป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF b) สสารขกกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWS ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า

แต่เมื่อทำการสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสสารแกรนูโลภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในตัวอย่างสสารดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SNWS) พบว่าลักษณะของสสารแกรนูโลมีรูปร่างบิดเบี้ยวยุบตัว แต่ไม่พบองค์ประกอบที่มีลักษณะเป็นเยื่อใยปกคลุมบริเวณผิวนอกของแกรนูโล (ภาพที่ 27b) เหมือนกับในตัวอย่าง SNWF จึงคาดว่าลักษณะเยื่อใยที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง SNWF อาจเกิดจากอิทธิพลขององค์ประกอบอื่นๆ ในแป้ง

จากการสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของสสารแกรนูโลภายหลังการดัดแปร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจมีผลทำให้ลักษณะของโครงสร้างผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยงานวิจัยต่างๆ พบว่ากระบวนการให้ความร้อนและกระบวนการดัดแปรจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก

2.2 ลักษณะโครงสร้างผลึก

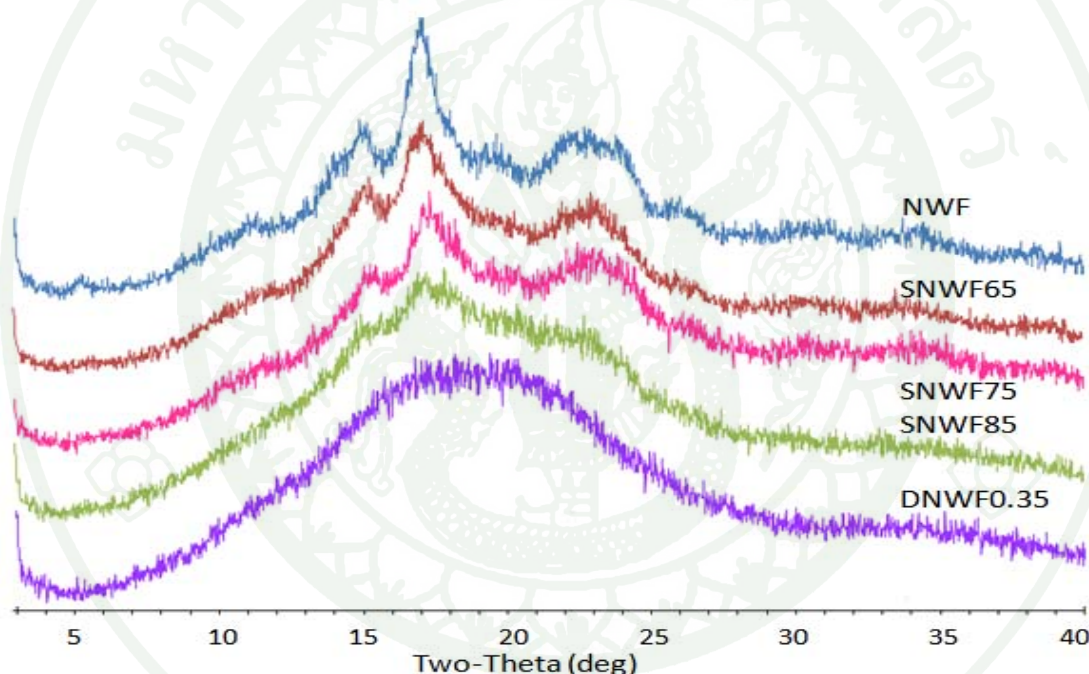
จากผลการทดลองศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) พบว่าแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติให้ผลมุมของการสะท้อนไม่ชัดเจน จึงได้นำสตาร์ชของกล้วยน้ำว้าธรรมชาติมาทำการทดสอบ พบว่าปรากฏมุมของการสะท้อนที่ตำแหน่ง 5.6° , 9.93° , 11.1° , 15° , 17.2° , 19.5° , 26° และเกิดมุมสะท้อนเป็นช่วงกว้างตั้งแต่ 22° - 24° 2θ อย่างชัดเจน ดังภาพที่ 28 ซึ่งตำแหน่งมุมสะท้อนดังกล่าวเป็นลักษณะของโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวแบบชนิด B (B-type) (Zobel, 1964)



ภาพที่ 28 รูปแบบการสะท้อนรังสีเอกซ์ของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (NWF) และสตาร์ชกล้วยน้ำว้า (NWS) ทดสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)

เมื่อพิจารณาระดับความเป็นผลึกระหว่างแป้งและสตาร์ช พบว่าสตาร์ชกล้วยน้ำว้า (NWS) ปรากฏมุมของการสะท้อนที่ตำแหน่ง 5.6° และ 9.93° ชัดเจนกว่าตัวอย่างแป้งกล้วยน้ำว้า (NWF) (ภาพที่ 28) อาจเป็นผลเนื่องมาจากในตัวอย่างแป้งมีองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และเส้นใยอาหาร ทำให้การสะท้อนรังสีเอกซ์อันเนื่องมาจากโครงสร้างผลึกภายในสตาร์ชแกรนูลลดลง ซึ่งลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับการทดลองของ Mousia *et al.* (2004) ที่พบว่าระดับความเป็นผลึกของข้าวสาลีที่ผ่านกระบวนการจัดสีจะมีความชัดเจนของพีคและระดับความเป็นผลึกมากกว่าข้าวสาลีที่ไม่ผ่านกระบวนการจัดสีเปลือก ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวเป็นผลเนื่องจากตัวอย่างข้าวสาลีที่ผ่านกระบวนการจัดสีมีการปนเปื้อนของรำและลัพพะที่น้อยกว่าตัวอย่างข้าวที่ไม่ผ่านการจัดสีเปลือก

จากลักษณะของสสารแกรนูที่เปลี่ยนแปลง (ภาพที่ 24 และ 25) แสดงให้เห็นว่า กระบวนการตัดแปรทั้ง 2 วิธีอาจมีผลต่อลักษณะโครงสร้างของสสารแกรนู ซึ่งให้ผลการทดลอง สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) โดยพบว่า DNWF จะสูญเสียลักษณะความเป็นผลึกและโครงสร้างที่เป็นระเบียบไป ในขณะที่ SNWF มีความเป็นผลึกลดลง ดังภาพที่ 29 เมื่อทำการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟเพื่อหาระดับความเป็นผลึก (degree of crystalline) ตามวิธีของ Shujun *et al.*, 2005 (ภาคผนวก ก9) พบว่าแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติมีค่าร้อยละ ความเป็นผลึก 24.45 ดังตารางที่ 6 ซึ่งระดับความเป็นผลึกดังกล่าวเกิดจากการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ของโมเลกุลภายในสสารแกรนู ซึ่งส่งผลต่อการสะท้อนรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน (Tester *et al.*, 2004a)



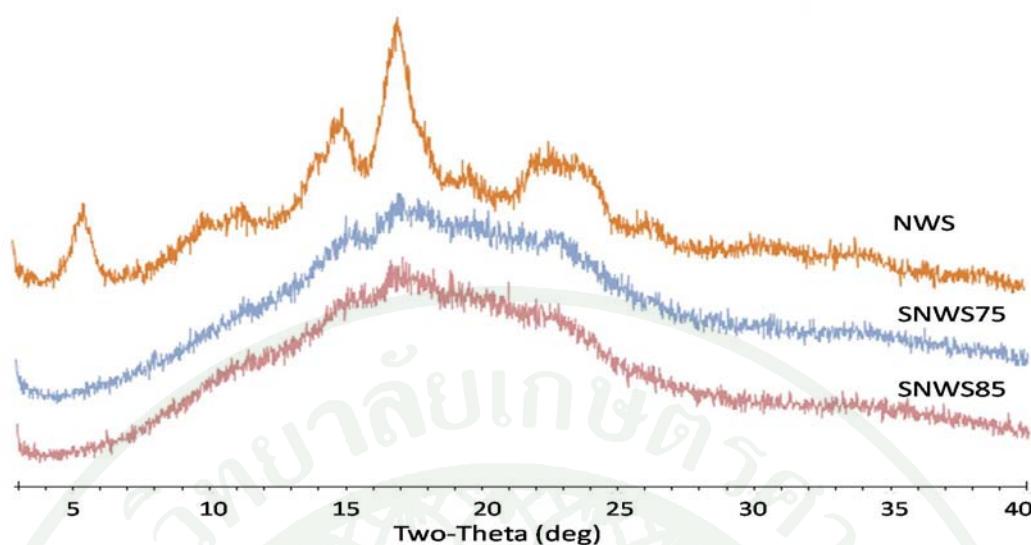
ภาพที่ 29 รูปแบบการสะท้อนรังสีเอกซ์ของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปร ทดสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)

ตารางที่ 6 แสดงค่าร้อยละความเป็นผลึกของแป้งกล้วย NWF และแป้งกล้วยดัดแปร SNWF

ตัวอย่าง	Crystal pattern	ค่าร้อยละความเป็นผลึก
NWF	B	24.45
SNWF65	B	17.84
SNWF75	B	16.22
SNWF85	B	9.39

เมื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกของ DNWF ไม่ปรากฏมุมของการสะท้อนที่ตำแหน่งใดๆ ดังภาพที่ 29 ซึ่งระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแคบจะมีแรงกระทำต่อสสาร์แกรนูลมาก ทำให้สสาร์แกรนูลแตกออก โดยการดัดแปรด้วยวิธีนี้จะทำให้สสาร์แกรนูลถูกทำลายและสูญเสียโครงสร้างผลึก ในขณะที่โครงสร้างผลึก SNWF พบว่าตำแหน่งของพีคต่างๆคล้ายกับแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ แต่จะมีความเข้มลดลง ดังภาพที่ 29 เมื่อคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึกพบว่ามีค่าน้อยกว่า NWF (ตารางที่ 6) แสดงว่า SNWF ได้สูญเสียความเป็นระเบียบ และความเป็นผลึกไปบางส่วน

จากลักษณะความเข้มของพีคและค่าร้อยละความเป็นผลึกของ SNWF ที่ลดลง จึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของสสาร์กล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWS พบว่าพีคตำแหน่งต่างๆที่ปรากฏใน NWS จะมีความเข้มลดลง ดังภาพที่ 30 รวมทั้งมีค่าร้อยละความเป็นผลึกน้อยกว่า NWS ดังตารางที่ 7 ซึ่งเมื่อนำค่าร้อยละความเป็นผลึกของ SNWS (ตารางที่ 7) มาเปรียบเทียบกับ SNWF (ตารางที่ 6) พบว่า SNWS75 มีค่าร้อยละความเป็นผลึกต่ำกว่า SNWF75 เนื่องจากในตัวอย่างแป้งมีองค์ประกอบอื่นๆ จึงอาจมีผลทำให้แป้งถูกทำลายได้น้อยกว่า ในขณะที่ SNWS85 และ SNWF85 พบว่ามีค่าร้อยละความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน คาดว่าน่าจะเกิดจากอุณหภูมิที่ให้ความร้อนที่ 85 องศาเซลเซียสก่อนการทำแห้งมีผลต่อโครงสร้างของแป้งและสสาร์ เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่สูงอาจทำให้สสาร์แกรนูลเกิดเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์ จึงส่งผลให้ค่าร้อยละความเป็นผลึกมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 30 รูปแบบการสะท้อนรังสีเอกซ์ของสตา์ชกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (NWS) และสตา์ชกล้วยน้ำว้าดัดแปร (SNWS)

ตารางที่ 7 แสดงค่าร้อยละความเป็นผลึกของแป้งกล้วย NWS และแป้งกล้วยดัดแปร SNWS

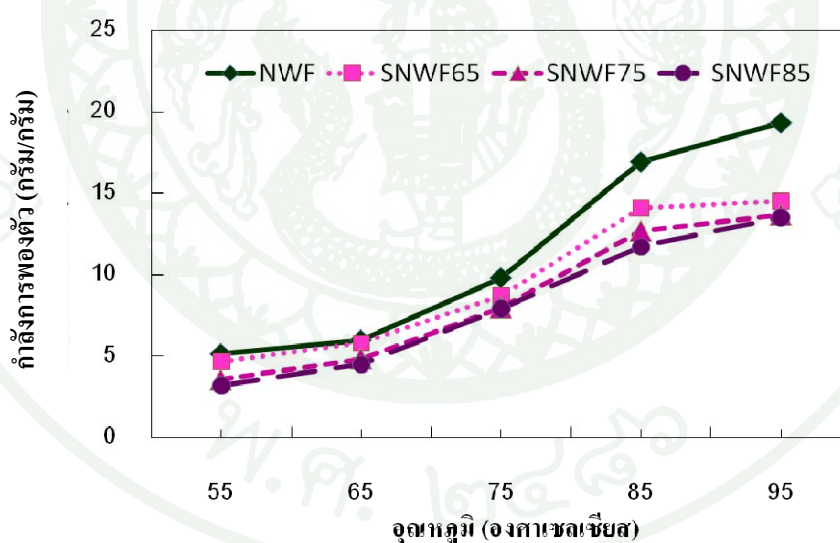
ตัวอย่าง	Crystal pattern	ค่าร้อยละความเป็นผลึก
NWS	B	31.96
SNWS75	B	10.6
SNWS85	B	9.25

เมื่อเปรียบเทียบระดับของอุณหภูมิที่มีการให้ความร้อนก่อนการทำแห้ง พบว่าความเข้มข้นของฟิสิกและค่าร้อยละความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ให้ความร้อนแก่สารละลายตัวอย่างสูงขึ้น (ภาพที่ 29-30 และตารางที่ 6-7) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนสารละลายที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งและสตา์ชกล้วยน้ำว้าดัดแปร (SNWF และ SNWS) ซึ่งการให้ความร้อนแก่สารละลายก่อนนำไปทำให้แห้งส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสตา์ชอ่อนแอลง ทำให้สตา์ชแกรนูลบางหน่วยสูญเสียโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบไปบางส่วน มีผลให้ค่าร้อยละผลึกลดลง และพบว่าการให้ความร้อนแก่สารละลายก่อนนำไปทำให้แห้งจะส่งผลกระทบต่อสตา์ชมากกว่าแป้ง อาจเป็นผลเนื่องมาจากในตัวอย่างแป้งมีองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งทำให้แป้งถูกทำลายได้น้อยกว่า

3. สมบัติด้านเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งกล้วยน้ำว่าดัดแปรด้วยวิธีพรีเจลลิ่งในเซชัน

3.1 ความสามารถในการพองตัว

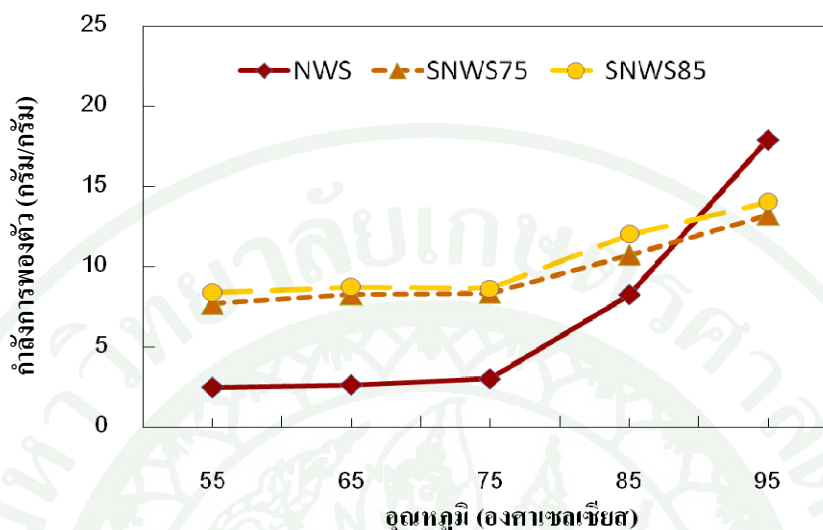
เมื่อพิจารณากำลังการพองตัวของ NWF และ SNWF ดังภาพที่ 31 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตัวอย่างแป้งมีค่ากำลังการพองตัวที่สูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์ภายในสตาร์ชแกรนูลเริ่มสั่นสะเทือนและพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่พอลิแซคคาไรด์เริ่มแตกออก กลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลอิสระและเกิดการเชื่อมต่อกับโมเลกุลของน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน มีผลให้โครงสร้างพอลิแซคคาไรด์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ส่งผลให้สตาร์ชแกรนูลเกิดการดูดน้ำและพองตัวเพิ่มมากขึ้น โดยกลไกดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ง่ายในส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ภายในโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน (Aguilera and Stanley, 1999; Whistler and BeMiller, 1999) ทำให้ค่ากำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่การวัดความสามารถในการพองตัวโดยวิธีนี้ไม่สามารถใช้กับตัวอย่าง DNWF ได้ เนื่องจาก DNWF จะสามารถละลายและให้ความหนืดได้ทันทีที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 31 กำลังการพองตัวของแป้งกล้วยน้ำว่าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว่าดัดแปร SNWF

เมื่อเปรียบเทียบกำลังการพองตัวของแป้งกล้วยน้ำว่าธรรมชาติ (NWF) และ SNWF พบว่า NWF มีกำลังการพองตัวที่สูงกว่า SNWF ทุกตัวอย่าง โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างก่อนการดัดแปรสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการพองตัวลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการดัดแปรมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแอมิโลสในส่วนอสัณฐาน อีกทั้งการดัดแปรด้วยวิธีนี้จะ

ทำให้มีสสารแกรนูลบางส่วนเกิดการเกาะกลุ่มกัน (agglomerated) (ภาพที่ 26c) จึงทำให้น้ำเข้าทำอันตรกิริยากับโครงสร้างภายในสสารแกรนูลได้ยากขึ้น

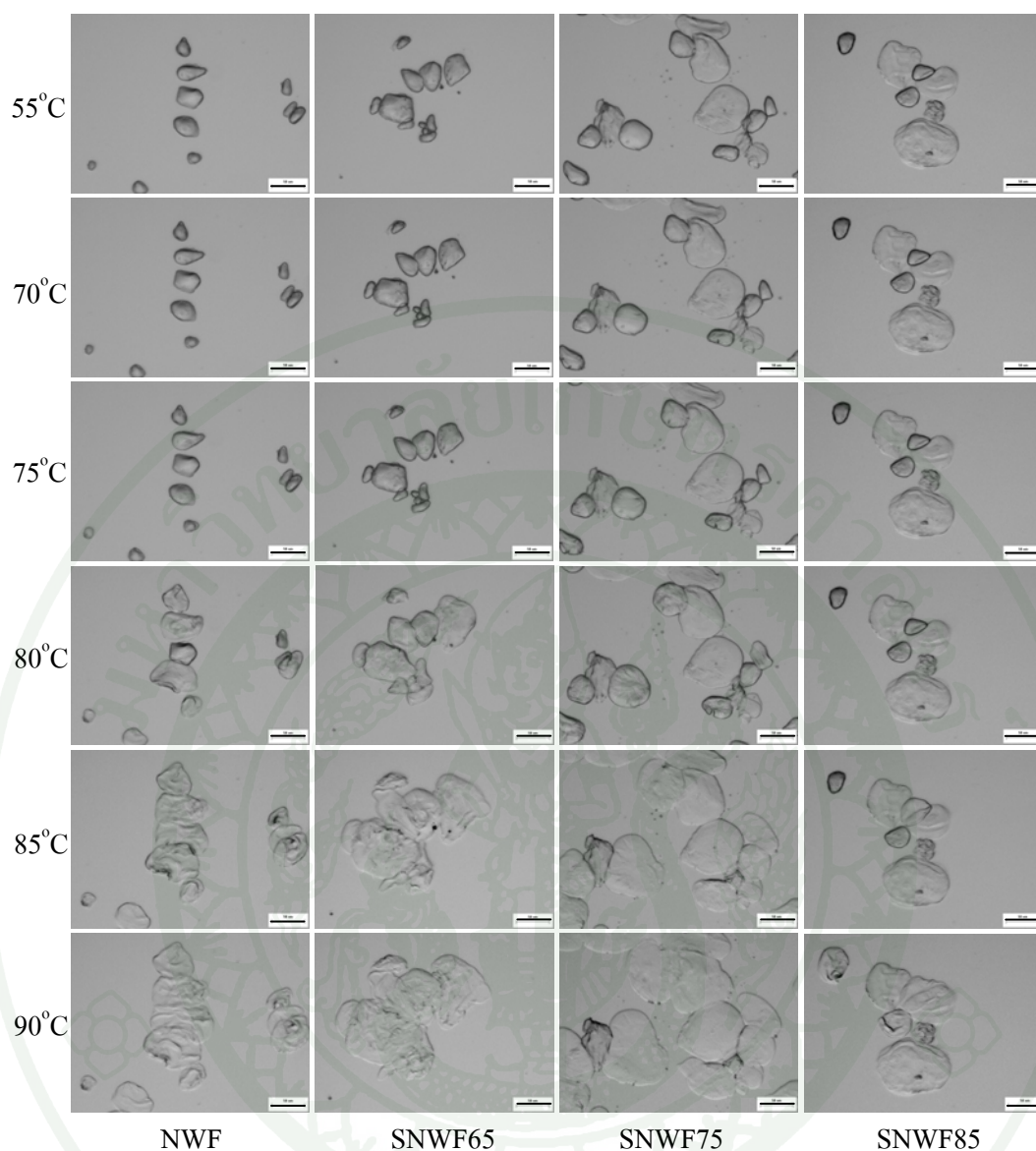


ภาพที่ 32 กำลังการพองตัวของสสารกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและสสารกล้วยน้ำว้าตัดแปรรูป SNWS

เมื่อเปรียบเทียบกำลังการพองตัวของสสารกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (NWS) และสสารกล้วยน้ำว้าตัดแปรรูป SNWS (ภาพที่ 32) พบว่า SNWS มีกำลังการพองตัวที่สูงกว่า NWS โดยพบว่าเมื่อตัวอย่างได้รับความร้อนสูงขึ้นก่อนการทำแห้ง ทำให้ความสามารถในการพองตัวสูงขึ้น ซึ่งให้ผลแตกต่างจากตัวอย่าง SNWF ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการตัดแปรรูปที่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายสสารมีผลต่อโครงสร้างของสสารแกรนูล ทำให้เกิดการพองตัวของสสารก่อนการทำแห้ง และความร้อนมีผลทำให้สสารเกิดการเจลาติไนซ์บางส่วน ทำให้สสารแกรนูลสามารถดูดน้ำกลับได้เร็ว เมื่อทำการตรวจสอบความสามารถในการพองตัวจึงให้ค่าที่สูง ซึ่งจากการทดลองทำให้ทราบว่าภายหลังการตัดแปรรูปประกอบอื่นๆในแป้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสสารแกรนูล และมีผลทำให้มีกำลังการพองตัวลดลง

3.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะด้านสัณฐานวิทยาของแป้งกล้วยน้ำว้าจากวิธีการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟั่นฝอย เมื่อมีการให้ความร้อน

เมื่อตรวจสอบกำลังการพองตัวของ NWF และ SNWF พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน แต่ SNWF มีกำลังการพองตัวต่ำกว่า NWF (ภาพที่ 31) จึงนำตัวอย่างแป้งมาสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะโดยเลียนแบบการทดลองกำลังการพองตัว โดยให้ความร้อนด้วยแท่นควบคุมอุณหภูมิและสังเกตการเปลี่ยนแปลงภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (ภาพที่ 33) พบว่าสตาร์ชแกรนูลของ NWF จะเกิดการพองตัวที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ในขณะที่สตาร์ชแกรนูลของ SNWF มีลักษณะการพองตัวที่คล้ายคลึงกับสตาร์ชแกรนูลในตัวอย่าง NWF แต่เริ่มมีการพองตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างก่อนการทำแห้งสูงขึ้น (SNWF75 และ SNWF85) มีแนวโน้มทำให้อุณหภูมิที่เริ่มการพองตัวสูงขึ้น ดังภาพที่ 33 ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากสตาร์ชแกรนูลมีลักษณะที่บีบอัดตัว รวมถึงมีลักษณะเกาะเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (ภาพที่ 26c) และสตาร์ชแกรนูลบางหน่วยมีองค์ประกอบที่มีลักษณะเป็นเยื่อใยปกคลุมอยู่บริเวณผิวนอกของแกรนูล (ภาพที่ 27a) มีผลต่อการชะลอและยับยั้งการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับความสามารถในการพองตัวที่พบว่า SNWF มีกำลังการพองตัวต่ำกว่า NWF



ภาพที่ 33 การเปลี่ยนแปลงลักษณะด้านสัณฐานวิทยาของสตาร์ชเกรนูล เมื่อให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF (scale bar = 50μm)

3.3 ความสามารถในการละลายน้ำเย็น

สตาร์ชกล้วยมีความสามารถในการละลายและการพองตัวที่ต่ำกว่าสตาร์ชชนิดอื่นๆ (ภาพที่ 7) ทำให้ความหลากหลายในการนำมาประยุกต์ใช้นั้นทำได้อย่างจำกัด งานวิจัยจึงได้ทำการพัฒนาดัดแปรแป้งกล้วยเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยวิธีที่เลือกใช้ในการดัดแปร คือ การดัดแปรด้วยวิธีพรีเจลาไทไนเซชัน ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งภายหลังการดัดแปร

ด้วยวิธีพรีเจลาทีไนซ์ คือ คุณสมบัติในการละลายน้ำเย็น ภายหลังจากดัดแปรด้วยวิธีพรีเจลาทีไนซ์พบว่า DNWF มีความสามารถในการละลายน้ำเย็นสูงสุด ดังตารางที่ 8 โดยพบว่ามีความสามารถในการละลายน้ำเย็นสูงกว่า NWF อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ SNWF มีความสามารถในการละลายน้ำเย็นต่ำกว่า NWF อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 8 ความสามารถในการละลายน้ำเย็นของแป้งกล้วยน้ำว้า

ตัวอย่าง	ความสามารถในการละลายน้ำเย็น CWS (%)
NWF	$14.98^d \pm 0.09$
DNWF0.15	$58.92^g \pm 0.14$
DNWF0.25	$57.24^f \pm 0.12$
DNWF0.35	$56.91^e \pm 0.10$
SNWF65	$9.04^a \pm 0.18$
SNWF75	$9.37^b \pm 0.20$
SNWF85	$12.45^c \pm 0.22$

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 8 พบว่าแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร DNWF ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งต่างๆกัน มีความสามารถในการละลายและกระจายตัวในน้ำที่อุณหภูมิห้องได้สูงเกินร้อยละ 50 โดยพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแคบลง จะทำให้สามารถละลายและกระจายตัวในน้ำเย็นได้สูงขึ้น เนื่องจากการที่ระยะห่างลูกกลิ้งแคบจะมีแรงกระทำต่อสตาร์ชแกรนูลมาก ทำให้สตาร์ชแกรนูลแตกออก ซึ่งการดัดแปรโดยวิธีนี้จะทำให้สตาร์ชแกรนูลถูกทำลาย (ภาพที่ 26b) และโครงสร้างที่อยู่ภายในสตาร์ชแกรนูลมีโอกาสจับกับน้ำได้มากขึ้น (Glicksman, 1969; Doublier *et al.*, 1986) ดังนั้นเมื่อนำแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีนี้ไปละลายน้ำจึงพบว่าแป้งสามารถละลายและกระจายตัวได้ทันที

ในขณะที่ตัวอย่างแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปรที่มีการให้ความร้อนแก่สารละลายก่อนนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SNWF) มีความสามารถในการละลายและกระจายตัวในน้ำเย็นได้

น้อย แต่พบว่าเมื่อตัวอย่างมีการให้ความร้อนก่อนการทำแห้งสูงขึ้น แป้งดัดแปร SNWF จะมีแนวโน้มในการละลายน้ำเย็นเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่สารละลายก่อนนำไปทำแห้ง จะส่งผลให้ส่วนที่เป็นอสัณฐานเกิดการเปลี่ยนแปลง และผลึกบางส่วนถูกทำลาย ซึ่งอาจทำให้มีความสามารถละลายน้ำเย็นได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 9 ความสามารถในการละลายน้ำเย็นของสตาร์ชกล้วยน้ำว้า

ตัวอย่าง	ความสามารถในการละลายน้ำเย็น
	CWS (%)
NWS	1.99 ^a ± 0.19
SNWS75	13.21 ^b ± 0.17
SNWS85	14.29 ^c ± 0.54

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

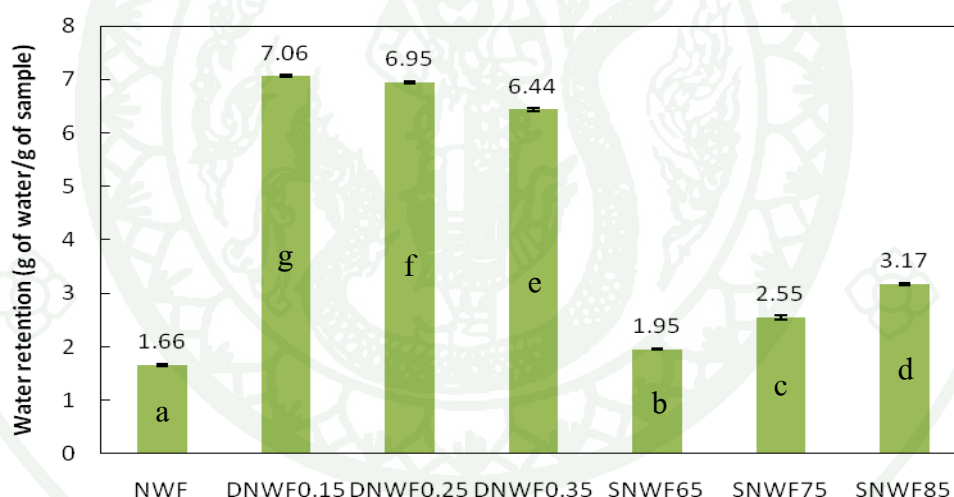
ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p ≤ 0.05)

เมื่อพิจารณาความสามารถในการละลายน้ำเย็นของ NWF (ตารางที่ 8) พบว่า NWF มีความสามารถในการละลายน้ำเย็นสูงกว่า NWS (ตารางที่ 9) อาจเป็นผลเนื่องมาจากการละลายขององค์ประกอบอื่นที่สามารถละลายน้ำได้ ละลายปะปนออกมาด้วย (Unnikrishnan and Bhattacharya, 1981; Hoover and Senanayake, 1996; มยุรกาญจน์, 2551) ทำให้ NWF มีค่าการละลายน้ำเย็นที่สูงกว่า NWS เมื่อทำการดัดแปรสตาร์ชด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SNWS) จากตารางที่ 9 พบว่าตัวอย่าง SNWS มีความสามารถในการละลายและกระจายตัวในน้ำเย็นได้มาก โดยพบว่าการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีนี้ทำให้สตาร์ชดัดแปรมีความสามารถในการละลายในน้ำเย็นได้ดีกว่า SNWF ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากองค์ประกอบอื่นๆของแป้งภายหลังการดัดแปร เช่น โปรตีน ไขมัน และเส้นใย ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวจะชะลอและยับยั้งการดูดน้ำของสตาร์ชแกรนูล (Debet and Gidley, 2006) และการดัดแปรแป้งด้วยวิธีนี้จะทำให้มีสตาร์ชแกรนูลบางส่วนเกิดการเกาะกลุ่มกัน (agglomerated) ซึ่งอาจมีผลในการชะลอและยับยั้งการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล (Mitolo, 2006) ทำให้ไม่เกิดการพองตัวและกระจายตัวในน้ำได้ช้าลง จึงส่งผลให้ SNWF มีค่าการละลายน้ำเย็นต่ำกว่า SNWS

3.4 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water retention capacity)

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องสตาร์ชแกรนูลจะดูดซับน้ำที่เติมลงไป ภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้องจนเกิดสมดุล ภายหลังการตัดแปรพบว่าแป้งดัดแปรมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่า NWF อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ภาพที่ 34)

เมื่อทำการตรวจสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร DNWF ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งต่างๆกัน พบว่า DNWF0.15 ให้ค่าการดูดซับน้ำสูงที่สุด (7.06 กรัม/กรัม ตัวอย่าง) (ภาพที่ 34) โดยพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแคบลง จะทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำสูงขึ้น เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนเกิดการคลายตัว และการที่ระยะห่างลูกกลิ้งแคบจะมีแรงกระทำต่อสตาร์ชแกรนูลมาก ทำให้สตาร์ชแกรนูลแตกออก ส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนภายในสตาร์ชแกรนูลสามารถจับกับน้ำได้มากขึ้นและสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น จึงทำให้ DNWF สามารถดูดซับน้ำได้ดี



ภาพที่ 34 ค่าการดูดซับน้ำ (water retention capacity) ของแป้งกล้วยน้ำว้า

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในภาพมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับน้ำของ SNWF ที่ใช้อุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่างแตกต่างกัน พบว่า SNWF85 มีค่าการดูดซับน้ำมากกว่า SNWF75 และ SNWF65 ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่สารละลายก่อนนำไปทำแห้ง จะส่งผลให้ส่วนที่เป็นออสแตนนเกิดการเปลี่ยนแปลง พันธะไฮโดรเจนระหว่างส่วนออสแตนนและส่วนผลึกบางส่วนถูกทำลาย จึงทำให้พันธะไฮโดรเจนสามารถจับกับน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำสูงขึ้น (Morrison *et al.*, 1993)

3.5 การเกิดเจลลิตีในเซชัน

จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก และความสามารถในการพองตัวของตัวอย่างแป้งดัดแปร พบว่ามีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป จึงได้ทำการทดสอบสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันของตัวอย่างแป้งด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter; DSC) ที่มีหลักการในการใช้พลังงานในการสลายพันธะภายในโมเลกุลและวัดการเปลี่ยนแปลงโดยพิจารณาจากอุณหภูมิ ซึ่งมีผลเกี่ยวเนื่องกับลักษณะโครงสร้างผลึก จากตารางที่ 10 พบว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน (อุณหภูมิเริ่มต้น-อุณหภูมิสูงสุด-อุณหภูมิต่ำสุด) และค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึก (ΔH , J/g) ของ DNWF มีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันและค่าพลังงานต่ำกว่า NWF มาก เนื่องจาก DNWF สูญเสียความเป็นระเบียบและโครงสร้างผลึก จึงทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันลดลง จากการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่แตกต่างกันจะมีลักษณะช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึก และร้อยละการเกิดเจลลิตีในเซชันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ในขณะที่ SNWF พบว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันมีค่าสูงกว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันของ NWF (ตารางที่ 10) แม้จะสูญเสียความเป็นผลึกไปแล้วบางส่วน ซึ่งผลของช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันนี้ ให้ผลคล้ายกับการทดลองของ Adebowale *et al.*, 2005; Lawal, 2005 และ Loisel *et al.*, 2006 ที่ทำการดัดแปรโดยใช้วิธีความร้อนร่วมกับความชื้น พบว่าภายหลังการดัดแปรจะส่งผลให้ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันเพิ่มสูงขึ้น แต่จากการทดลองที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้วิธีการที่แตกต่างกัน ซึ่งกระบวนการความร้อนร่วมกับความชื้นในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง มีผลทำให้สตาร์ชแกรนูลบางส่วนเกิดการพองตัว (ภาพที่ 25) และเกิดการหลุดออกของโมเลกุลเอมิโลสจากสตาร์ชแกรนูล (amylose leaching) (Hizukuri, 1991; BeMiller and Whistler, 2009) ส่งผลให้มีเอมิโลสอยู่ในสารละลายเมื่อนำไปทำให้แห้ง โมเลกุลเอมิโลสที่หลุดออกมาและองค์ประกอบอื่นๆภายในแป้งจะช่วยทำให้สตาร์ชแกรนูลยึดเกาะกัน และอาจมีโมเลกุลเอมิโลสที่เป็นอิสระจับกันเอง ส่งผลให้น้ำและความร้อนเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อสลายโครงสร้างผลึกภายในสตาร์ชแกรนูลได้ยากขึ้น โดยปกติเมื่อผ่านกระบวนการเจลลิตีในเซชัน สตาร์ชแกรนูลในส่วนที่เป็นอสัณฐานจะจับกับน้ำ (hydration) และเกิดการพองตัว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกและเกลียวคู่ โดยเริ่มเกิดการพองตัวในส่วนอสัณฐานและจะส่งต่อไปยังส่วนผลึก โดยจะเริ่มจากสายพอลิเมอร์ที่อยู่บริเวณผิวของส่วนผลึก (Donovan, 1979) ซึ่งการเปลี่ยน

แปลงโครงสร้างของสสารซึ่งแกนกลางหลังการตัดแปรจะทำให้ในส่วนอสังฐานต้องการอุณหภูมิที่สูงขึ้น เพื่อให้เกิดการพองตัวและทำให้บริเวณเปลือกถูกทำลาย จึงทำให้ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีนในเซชันของ SNWF เพิ่มขึ้น โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างก่อนการทำแห้งสูงขึ้น จะส่งผลให้ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีนเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 สมบัติเชิงความร้อนในการเกิดเจลาทีนในเซชันของแป้งกล้วยน้ำว้า

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ เริ่มต้น (T _o)	อุณหภูมิ สูงสุด (T _p)	อุณหภูมิ สุดท้าย (T _c)	พลังงานในการ สลายโครงสร้าง ผลึก (J/g)	ค่าร้อยละ การเกิด เจลาทีนในเซชัน
NWF	74.55 ^{bc} ± 0.46	79.06 ^c ± 0.46	84.73 ^c ± 0.61	14.18 ^d ± 0.48	0.00 ^b ± 0.00
DNWF0.15	52.11 ^a ± 4.26	67.24 ^b ± 0.24	77.94 ^a ± 0.11	1.84 ^a ± 0.33	87.06 ^c ± 2.35
DNWF0.25	48.63 ^a ± 0.19	65.16 ^a ± 0.12	79.17 ^a ± 0.46	2.70 ^a ± 0.46	81.00 ^c ± 3.24
DNWF0.35	53.48 ^a ± 5.73	64.24 ^a ± 1.65	79.32 ^a ± 0.61	2.98 ^{ab} ± 0.04	78.98 ^{dc} ± 0.30
SNWF65	73.72 ^b ± 0.11	77.65 ^c ± 0.12	83.30 ^b ± 0.28	15.85 ^c ± 1.57	-11.77 ^a ± 11.07
SNWF75	78.50 ^{bc} ± 0.13	81.83 ^d ± 0.11	86.40 ^d ± 0.16	11.43 ^c ± 0.14	19.40 ^c ± 1.00
SNWF85	80.97 ^c ± 0.25	85.57 ^c ± 0.23	94.72 ^c ± 1.11	4.37 ^b ± 0.32	69.18 ^d ± 2.29

หมายเหตุ อุณหภูมิเริ่มต้น-อุณหภูมิสูงสุด-อุณหภูมิตสุดท้าย มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส (°C)

ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

(p ≤ 0.05)

จากตารางที่ 10 พบว่า SNWF65 จะให้ค่าพลังงานในการสลายพันธะสูงกว่าแป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติเล็กน้อยและมีค่าร้อยละการเกิดเจลาทีนในเซชันติดลบ เนื่องจากการคำนวณเป็นการเปรียบเทียบกับค่าพลังงานในการสลายพันธะของ NWF และ SNWF65 ซึ่งพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกของแป้งทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้เมื่อคำนวณค่าร้อยละการเกิดเจลาทีนในเซชันมีค่าเป็นลบ นอกจากนี้ยังพบว่าการเกิดเจลาทีนในเซชันเพิ่มขึ้นเมื่อตัวอย่างมีการให้ความร้อนแก่สารละลายสูงขึ้น (SNWF75 และ SNWF85) จากผลการทดลองพบว่าผลที่ได้มีความ

สอดคล้องกับการศึกษาโครงสร้างผลึก ที่พบว่า SNWF มีความเป็นผลึกลดลง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 11 สมบัติเชิงความร้อนในเกิดเจลาทีโนเซชันของสตาร์ชกล้วยน้ำว้า

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ เริ่มต้น (T_o)	อุณหภูมิ สูงสุด (T_p)	อุณหภูมิ สุดท้าย (T_c)	พลังงานในการ สลายโครงสร้าง ผลึก (J/g)	ค่าร้อยละ การเกิด เจลาทีโนเซชัน
NWS	72.02 ± 0.28	75.49 ± 0.82	81.19 ± 0.88	18.88 ± 0.93	0.00 ± 0.00
SNWS75 (peak1)	51.50 ± 1.02	62.84 ± 1.05	72.94 ± 0.49	2.47 ± 0.32	73.18 ± 2.51
(peak2)	78.57 ± 0.54	83.42 ± 0.94	90.88 ± 0.06	2.60 ± 0.15	
SNWS85 (peak1)	49.20 ± 0.17	60.58 ± 0.70	72.58 ± 0.22	2.66 ± 0.48	75.10 ± 4.05
(peak2)	79.39 ± 0.41	85.58 ± 0.01	91.16 ± 0.20	2.04 ± 0.28	

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากการทดลองได้สันนิษฐานว่าองค์ประกอบอื่นๆภายในแป้งและลักษณะของสตาร์ชแกรนูลที่เปลี่ยนแปลงไปอาจมีส่วนทำให้ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีโนเซชันของ SNWF เพิ่มขึ้น จึงเปรียบเทียบช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาทีโนเซชัน และค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกของตัวอย่างระหว่างแป้งและสตาร์ชของตัวอย่างกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (ตารางที่ 10 และ 11) พบว่าตัวอย่างแป้งกล้วยจะมีอุณหภูมิเริ่มต้น (T_o) อุณหภูมิสูงสุด (T_p) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_c) ของการเกิดเจลาทีโนเซชันสูงกว่าสตาร์ช เนื่องจากในแป้งมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ขัดขวางกระบวนการเกิดเจลาทีโนเซชัน (Hamaker and Griffin, 1993; Hoover and Senanayake, 1996; วสันต์, 2543) ซึ่งจากภาพที่ 26a แสดงให้เห็นว่าในแป้งจะมีองค์ประกอบอื่นปะปนอยู่ด้วย จึงส่งผลให้แป้ง NWF มีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีโนเซชันสูงกว่า NWS แต่พบว่ามีค่าพลังงานรวมที่ใช้สลายโครงสร้างผลึกต่ำกว่า เนื่องจากตัวอย่าง NWF และ NWS ที่มีน้ำหนักเท่ากัน แป้ง NWF จะมีทั้งสตาร์ชและองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในขณะที่ NWS จะมีองค์ประกอบหลักเป็นสตาร์ช ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณสตาร์ชในตัวอย่าง NWF มีน้อยกว่าในตัวอย่าง NWS จึงส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการสลายโครงสร้างผลึกต่ำกว่า (ตารางที่ 10 และ 11) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับลักษณะ โครงสร้างผลึก (ภาพที่ 28) และร้อยละความเป็นผลึก (ตารางที่ 6 และ 7) ที่พบว่า NWS มีความเป็นผลึกมากกว่า NWF

เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่มีการตัดแปรรูป SNWF กับ SNWS พบว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีโนเซชันและค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกของ SNWF มีค่าสูงกว่า SNWS ซึ่งจากการทดลองพบว่า SNWS มีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีโนเซชัน 2 ช่วง (ตารางที่ 11) โดยมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีโนเซชันต่ำกว่าและช่วงอุณหภูมิที่มีค่าใกล้เคียงกับ SNWF เนื่องจากการตัดแปรรูปโดยการให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ชก่อนการทำแห้งส่งผลให้สตาร์ชแกรนูลเกิดเจลาทีโนเซชันบางส่วน เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ สตาร์ชแกรนูลที่ถูกทำลายไปแล้วบางส่วนจะสามารถรับน้ำเข้าไปในโครงสร้างและเกิดเจลาทีโนเซชันได้ก่อน จึงทำให้เกิดช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีโนเซชันในช่วงแรก แต่ช่วงที่สองของอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีโนเซชันอาจเกิดจากสตาร์ชแกรนูลบางหน่วยที่ไม่เกิดเจลาทีโนเซชันภายหลังการตัดแปรรูป เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกของ SNWS ในช่วงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีโนเซชันที่มีค่าใกล้เคียงกับ SNWF พบว่ามีค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกต่ำกว่า เนื่องจากสตาร์ชแกรนูล บางหน่วยมีความเป็นผลึกลดลง (ภาพที่ 30 และตารางที่ 7) และเกิดการสลายโครงสร้างผลึกไปแล้วในช่วงแรก จึงส่งผลให้ค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกในช่วงที่สองลดลง

ค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกสามารถนำมาใช้เป็นคุณสมบัติเพื่อแสดงคุณภาพของผลึก ปริมาณเกลียวคู่และการจับกันอย่างไม่แข็งแรงของเกลียวคู่ระหว่างแอมิโลเพกทินที่อยู่ใกล้ๆกัน ใช้บอกการสูญเสียความเป็นผลึกในสตาร์ชแกรนูล และเป็นพลังงานรวมที่ใช้ในการทำลายพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ (Morrison *et al.*, 1993; Tester 1997; Singh *et al.*, 2003; Pukkahuta *et al.*, 2007) ซึ่งกระบวนการตัดแปรรูปด้วยความร้อนร่วมกับความชื้นจะทำลายโครงสร้างของสตาร์ชแกรนูล ในสตาร์ชแกรนูลของกล้วยมีโครงสร้างผลึกที่มีการเรียงตัวแบบชนิด B (B-Type) (ภาพที่ 28 และตารางที่ 6) จึงมีแนวโน้มที่จะถูกทำลายได้มากกว่าพวกสตาร์ชแกรนูล ของธัญพืช ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่มีการเรียงตัวแบบชนิด A (A-Type) (Gidley, 1987; Lu *et al.*, 1996; Gunaratne and Hoover, 2002; Pukkahuta *et al.*, 2007) ดังนั้นโครงสร้างผลึกของสตาร์ชแกรนูลกล้วยจะถูกทำลายได้ง่ายเมื่อผ่านกระบวนการตัดแปรรูป การที่ค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกลดลงภายหลังการตัดแปรรูป (ตารางที่ 10 และ 11) อาจเกิดจากสภาวะที่ทำการตัดแปรรูปส่งผลให้เกลียวคู่บางส่วนที่อยู่ในบริเวณส่วนผลึกของแกรนูลถูกทำลาย ส่งผลให้ค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกลดลง

3.6 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสตาร์ช ได้แก่ แอมิโลส และ แอมิโลเพกทิน เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ภายหลังการเกิดเจลที่ในเซชันและอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยโมเลกุลของแอมิโลสสามารถเกิดการจัดเรียงตัวได้เร็วกว่าการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน ซึ่งการจัดเรียงตัวของแอมิโลเพกทินเกิดขึ้นได้ช้า โดยใช้ระยะเวลาหลายวันหรือเป็นสัปดาห์ (Goodfellow and Wilson, 1990; Karim *et al.*, 2000; กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

ตารางที่ 12 สมบัติเชิงความร้อนในเกิดรีโทรเกรเดชันภายในเวลา 24 ชั่วโมงของแป้งกล้วยน้ำว้า

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) ^{ns}	อุณหภูมิสูงสุด (T_p)	อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) ^{ns}	พลังงานในการสลาย โครงสร้างผลึก (J/g)
NWF	43.01 ± 1.05	62.16 ^c ± 0.12	71.87 ± 0.40	4.04 ^{ab} ± 0.38
DNWF0.15	42.73 ± 2.45	62.08 ^c ± 0.00	73.43 ± 2.06	4.54 ^{ab} ± 0.77
DNWF0.25	45.01 ± 0.06	61.75 ^c ± 0.47	71.67 ± 1.50	3.88 ^a ± 0.04
DNWF0.35	44.94 ± 2.07	58.58 ^a ± 0.94	71.89 ± 1.52	4.84 ^{ab} ± 0.29
SNWF65	42.00 ± 0.96	62.07 ^c ± 0.01	72.39 ± 1.04	4.77 ^{ab} ± 1.33
SNWF75	42.84 ± 1.50	60.83 ^{bc} ± 0.12	72.52 ± 0.77	5.22 ^{ab} ± 0.37
SNWF85	42.29 ± 1.38	59.42 ^{ab} ± 0.12	72.91 ± 1.05	5.50 ^b ± 0.13

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

($p \leq 0.05$)

ns (not significant): ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ภายหลังการเกิดเจลที่ในเซชัน ตัวอย่างได้ถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 14 วัน เพื่อศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชัน จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (DSC) โดยอุณหภูมิที่ได้คือ T_0 - T_p - T_c และพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึก ที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน (retrogradation enthalpy; ΔH_{ret} (J/g)) จากตารางที่ 12 พบว่าช่วงอุณหภูมิในการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชันของแป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปรที่ถูกเก็บรักษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมงอยู่ในช่วง 42 ถึง 73.43 องศา

เซลล์ซีส เมื่อเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลานานขึ้น เป็นเวลา 14 วัน พบว่า T_o , T_p และ T_c ของตัวอย่างมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 สมบัติเชิงความร้อนในเกิดรีโทรเกรเดชันภายในเวลา 14 วันของแป้งกล้วยน้ำว้า

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้น (T_o)	อุณหภูมิสูงสุด (T_p) ^{ns}	อุณหภูมิสุดท้าย (T_c)	พลังงานในการสลาย โครงสร้างผลึก (J/g)
NWF	42.34 ^{ab} ± 0.18	59.16 ± 0.13	71.53 ^b ± 1.62	4.97 ^a ± 0.76
DNWF0.15	43.05 ^{ab} ± 0.25	56.92 ± 0.37	71.59 ^b ± 0.57	5.61 ^{ab} ± 0.01
DNWF0.25	43.89 ^{ab} ± 0.50	56.92 ± 0.71	72.23 ^b ± 0.71	5.78 ^{abc} ± 0.49
DNWF0.35	43.03 ^{ab} ± 1.12	58.34 ± 0.59	71.29 ^b ± 0.65	5.94 ^{abc} ± 0.25
SNWF65	42.12 ^a ± 0.80	56.75 ± 1.42	71.78 ^b ± 0.20	6.36 ^{bc} ± 0.46
SNWF75	43.33 ^{ab} ± 1.57	57.17 ± 0.82	72.45 ^b ± 0.80	6.76 ^c ± 0.11
SNWF85	45.34 ^b ± 2.46	55.09 ± 5.89	66.14 ^a ± 4.38	6.58 ^{bc} ± 0.25

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

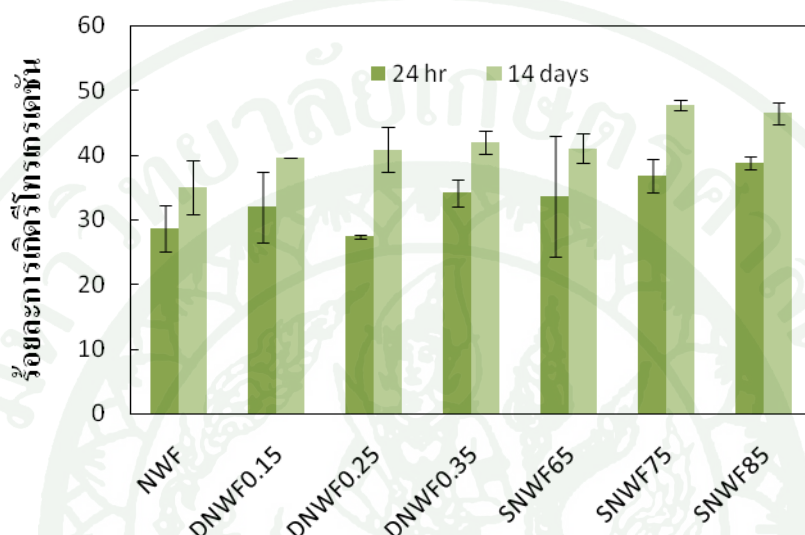
($p \leq 0.05$)

ns (not significant): ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จากผลการทดลองพบว่าช่วงอุณหภูมิในการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชันจะมีช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าและกว้างกว่าช่วงอุณหภูมิในการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากกระบวนการเจลาติไนเซชัน เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นใหม่นี้มีการจัดระเบียบน้อย หรือการจัดเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบเท่าโครงสร้างผลึกที่อยู่ในโมเลกุลสตาร์ชเดิม ถึงแม้ว่าจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานานก็ตาม และการจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่มีขนาดโมเลกุลและมีพันธะที่แตกต่างกัน จึงทำให้ช่วงอุณหภูมิของการเกิดรีโทรเกรเดชันเกิดเป็นช่วงกว้าง และทำให้เกิดช่วงอุณหภูมิต่ำกว่ากระบวนการเกิดเจลาติไนเซชัน (Lopez and Bello-Perez, 1994; Karim *et al.*, 2000; Takaya *et al.*, 2000)

ทั้งนี้ความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งอาจพิจารณาจากค่าพลังงานของการสลายโครงสร้างผลึกได้โดยคำนวณเป็นร้อยละของการเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นร้อยละของ

อัตราส่วนของพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชันกับพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกจากกระบวนการเจลาติไนเซชันของตัวอย่างเดียวกัน ดังภาพที่ 35 ซึ่งค่าพลังงานในการสลายพันธะของตัวอย่าง มีความสัมพันธ์กับร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน คือ เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษามากขึ้น ทำให้การเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานในการสลายพันธะเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 35 ค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งกล้วยน้ำว้าที่เก็บรักษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 14 วัน

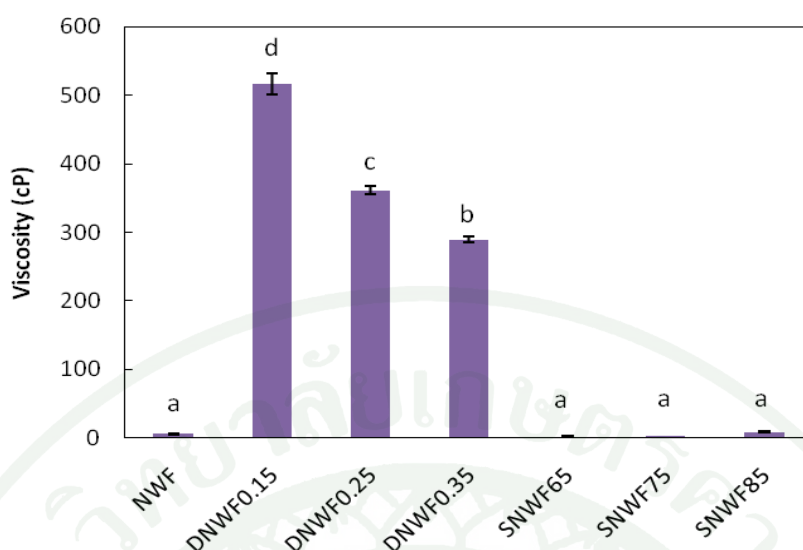
เมื่อพิจารณาค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน (ΔH_{ret}) และค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังตารางที่ 12 และภาพที่ 35 พบว่าในทุกตัวอย่างมีค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกและค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันใกล้เคียงกัน การเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อเก็บรักษาตัวอย่างในระยะเวลาสั้นมักเกิดจากการจัดเรียงตัวของแอมิโลส ซึ่งการจัดเรียงตัวของแอมิโลเพกทินจะเกิดได้ช้ากว่า (Biliaderis and Zawistowski, 1990; Goodfellow and Wilson, 1990; Karim *et al.*, 2000) แต่จากช่วงอุณหภูมิในการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน (ตารางที่ 12) พบว่ามีช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน ในขณะที่โครงสร้างของแอมิโลสจะใช้ช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า ดังนั้นค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกนี้อาจจะเป็นการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจากการจัดเรียงตัวของแอมิโลสกับแอมิโลเพกทินที่มีกิ่งสาขายาว และเกิดจากกิ่งของแอมิโลเพกทินที่เป็นสาขายาวจับกันเอง (Fredriksson *et al.*, 1998; Rashmi and Urooj, 2003; Sajilata *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2010)

เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างระยะเวลาสั้นขึ้น เป็นเวลา 14 วัน พบว่าค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกและค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของ SNWF สูงกว่า NWF และ DNWF ดังตารางที่ 13 และภาพที่ 35 เนื่องจากระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้นทำให้โมเลกุลของแอมิโลเพกทิน ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกใหม่อีกครั้ง (Vodovotz and Chinachoti, 1998) จากการทดลองเมื่อทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลาสั้นขึ้น พบว่าแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร ต้องการพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชันและค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงกว่าแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (NWF) ค่าพลังงานที่ได้อาจเป็นพลังงานที่ได้จากการสลายพันธะของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ซึ่งจากผลการทดลองโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่ของแป้งกล้วยดัดแปร มีปริมาณพันธะที่ยึดเหนี่ยวในโมเลกุลมากกว่าแป้งกล้วยน้ำว้า และการดัดแปรแป้งกล้วยน้ำว้าทั้ง 2 วิธีจะมีผลทำให้ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงขึ้น

ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกที่ระยะเวลาการเก็บ 24 ชั่วโมง ต่ำกว่าที่เก็บรักษาไว้ 14 วัน เนื่องจากระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อการเกิดผลึกแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของแป้งในรูปแบบที่มีความแตกต่างกัน (Yuan *et al.*, 1993; Liu and Thompson, 1998; Vandeputte *et al.*, 2003) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นการเกิดพันธะภายในโครงสร้างเจลจะมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งค่าพลังงานที่ได้เป็นพลังงานที่ได้จากการสลายพันธะของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ส่งผลให้ค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 14 วัน มีค่าสูงกว่าระยะเวลาการเก็บรักษา 24 ชั่วโมง

3.7 ทดสอบสมบัติด้านความหนืดในน้ำเย็น (Cold Viscosity)

จากการทดสอบความสามารถในการละลายน้ำเย็นและการดูดซับน้ำ พบว่าแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร DNWF ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งต่างๆกัน มีความสามารถในการละลายและดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้องได้ ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเมื่อละลายแป้ง DNWF ในน้ำ พบว่าสามารถเกิดความหนืดได้ทันที จึงทำการทดสอบความสามารถในการให้ความหนืดที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืด (Brookfield Viscometer) พบว่า DNWF มีความสามารถในการให้ความหนืดในน้ำเย็นสูงสุด ดังภาพที่ 36 โดยพบว่า DNWF มีความหนืดสูงกว่า NWF อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ SNWF มีความหนืดไม่แตกต่างจาก NWF ($p > 0.05$)



ภาพที่ 36 ค่าความหนืดในน้ำเย็นจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้า และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร

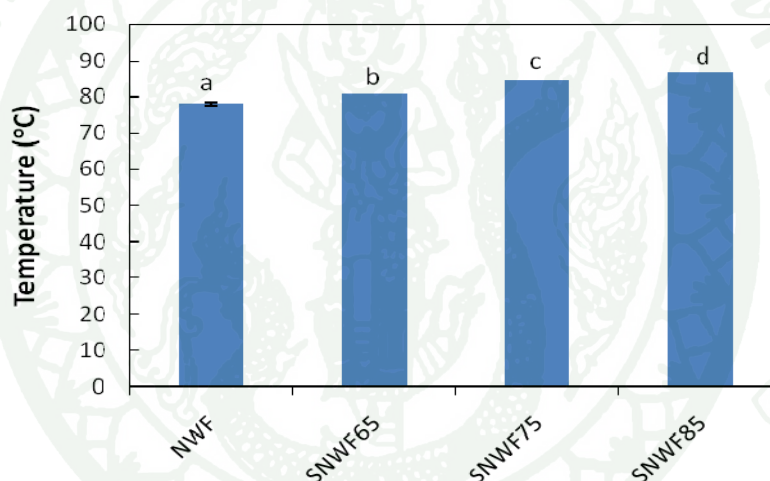
หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในภาพแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากการทดลองพบว่า DNWF0.15 มีค่าความหนืดสูงที่สุด โดยพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่าง ลูกกลิ้งแคบลง ส่งผลให้เกิดความหนืดในน้ำเย็นได้สูงขึ้น ซึ่งการดัดแปรโดยวิธีนี้จะทำให้สตาร์ชเกรนูล ถูกทำลาย (ภาพที่ 26b) และโครงสร้างที่อยู่ภายในสตาร์ชเกรนูลมีโอกาสจับกับน้ำได้มากขึ้น (Glicksman, 1969; Doublier *et al.*, 1986; Lai, 2001; Wadchararat *et al.*, 2006) ดังนั้นเมื่อนำแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีนี้ไปละลายน้ำจึงพบว่าแป้งสามารถละลายและเกิดความหนืดได้ทันที ในขณะที่แป้งที่ไม่ได้รับการดัดแปรและแป้ง SNWF มีความหนืดต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิห้องสตาร์ชเกรนูลไม่เกิดการพองตัว จึงส่งผลให้เกิดค่าความหนืดต่ำ

3.8 การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืด

การศึกษาสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer; RVA) เป็นวิธีการที่มีความสะดวกรวดเร็ว สามารถควบคุมอุณหภูมิและ อัตราเร็วในการให้แรงเฉือนกับตัวอย่าง นอกจากนั้นยังเป็นวิธีการที่ใช้ตัวอย่างน้อย เมื่อเทียบกับการวัด สมบัติด้านความหนืดด้วยวิธีอื่นๆ ซึ่งลักษณะด้านความหนืดที่วัดได้สามารถบ่งบอกถึงสมบัติด้านความหนืดของแป้งและสตาร์ชเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูป โดยทำการศึกษาสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่าง

ในสถานะที่มีปริมาณน้ำมากเกินไป ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและมีการกวนตัวอย่างตลอดช่วงการทดลอง ซึ่งสามารถแบ่งการให้ความร้อนกับตัวอย่างเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงให้ความร้อนกับตัวอย่างจาก 50-95 องศาเซลเซียส ช่วงคงอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส และช่วงการลดอุณหภูมิตัวอย่างลงจาก 95-50 องศาเซลเซียส โดยการวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดจะถูกแสดงผลออกมาเป็นกราฟและค่าที่เกี่ยวข้องกับสมบัติด้านความหนืด ได้แก่ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature; PT) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity; PV) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความแตกต่างของความหนืดต่ำสุดและความหนืดสูงสุด หรือค่าความหนืดลดลง (breakdown; BD) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity; FV) และผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด หรือค่าเซตแบค (setback from trough)

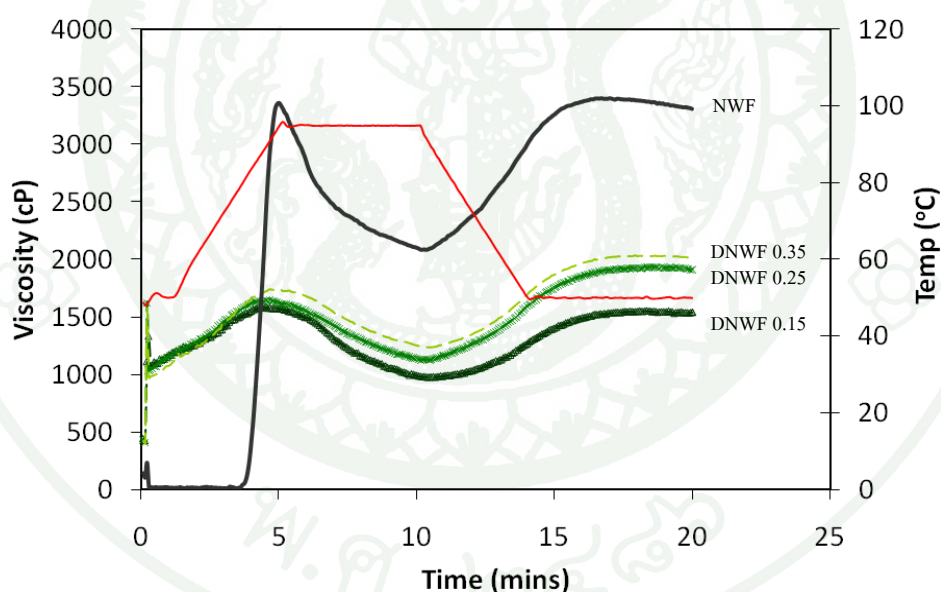


ภาพที่ 37 อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็วของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปร SNWF

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในภาพแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนืดระหว่างแป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติ (NWF) และแป้งที่ได้รับการตัดแปรทั้ง 2 วิธี พบว่า NWF มีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature; PT) แตกต่างกับแป้งกล้วยตัดแปร SNWF อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังภาพที่ 37 ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิที่ทำให้สตรัคเจอร์โมเลกุลเริ่มมีการพองตัว โครงสร้างผลึกเริ่มแตกออก กลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ ซึ่งจะเกิดการเชื่อมต่อกับโมเลกุลของน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โครงสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ถูกหุ้มไปด้วยโมเลกุลของน้ำ ส่งผลให้โครงสร้างดังกล่าวเกิดการเคลื่อนที่ได้

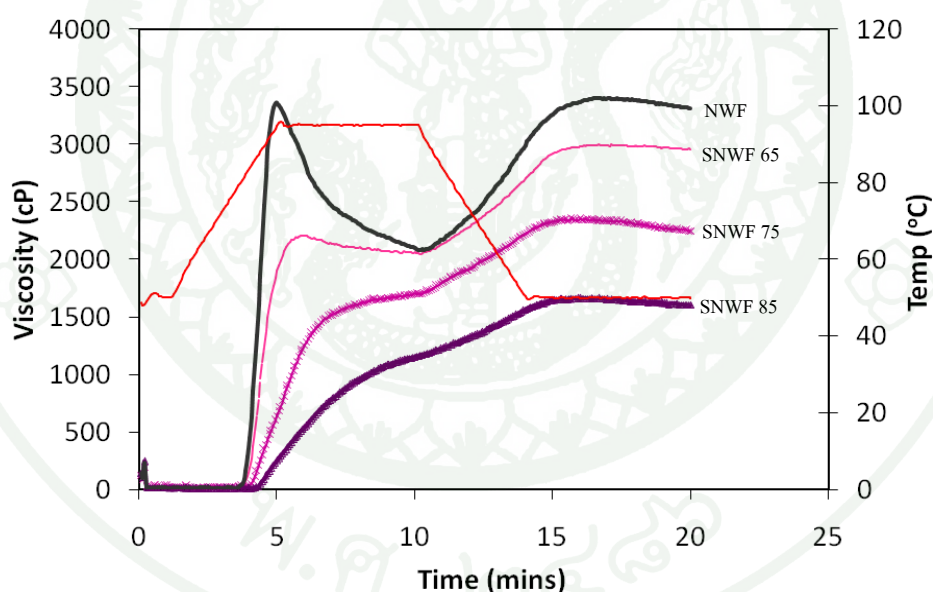
อย่างอิสระ ทำให้การพองตัวของสสารแกรนูลเพิ่มขึ้น (Whistler and BeMiller, 1999) จากการทดลองพบว่า DNWF จะปรากฏค่าความหนืดทันที (ภาพที่ 38) โดยมีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติด้านความหนืดในน้ำเย็นที่พบว่า DNWF สามารถให้ความหนืดได้ทันทีที่อุณหภูมิห้อง (ภาพที่ 36) เนื่องจากแป้งที่ได้รับการตัดแปรด้วยวิธีนี้เกิดการเจลาไทไนซ์ และสูญเสียรูปร่างในระหว่างกระบวนการผลิต ดังนั้นเมื่อ DNWF กระจายตัวในน้ำจึงสามารถเกิดการดูดซับน้ำได้ทันที ส่งผลให้เกิดกราฟความหนืดตั้งแต่ระยะแรก (Glicksman, 1969; Doublier *et al.*, 1986; Lai, 2001; Wadchararat *et al.*, 2006) ในขณะที่แป้งที่ไม่ได้รับการตัดแปรต้องมีการให้ความร้อนแก่ระบบก่อนจึงจะสามารถเกิดการพองตัวและปรากฏออกมาเป็นค่าความหนืดได้ เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนืดระหว่าง NWF และ DNWF พบว่า ความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ค่าความหนืดลดลง และความหนืดสุดท้ายของ DNWF มีค่าต่ำกว่า NWF (ภาพที่ 38) เนื่องจากกระบวนการตัดแปรมีผลทำให้โครงสร้างของสสารแกรนูลถูกทำลาย (ภาพที่ 29) จึงส่งผลให้มีค่าความหนืดลดลง



ภาพที่ 38 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็วของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่ (DNWF)

สำหรับตัวอย่าง SNWF พบว่ามีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเท่ากับ 80.68, 84.5 และ 86.72 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ภาพที่ 37) ซึ่งมีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงกว่า NWF แต่เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนืดระหว่าง NWF และ SNWF พบว่าความหนืดสูงสุด ความ

หนืดต่ำสุด ค่าความหนืดลดลง และความหนืดสุดท้ายของ SNWF มีค่าต่ำกว่า NWF (ภาพที่ 39) และยังพบว่ากราฟความหนืดสูงสุดมีความชันลดลง ซึ่งอาจจะเกิดจากสสาร์เกรนูลในตัวอย่างแบ่งที่ได้รับการดัดแปรมีการพองตัวไม่เท่ากัน อีกทั้งในตัวอย่าง SNWF75 และ 85 พบว่าไม่มีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) และความหนืดลดลง (breakdown) โดยตัวอย่างจะมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งอุณหภูมิของระบบลดลง ซึ่งลักษณะดังกล่าวคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของตัวอย่างที่มีโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวแบบชนิด C (C-Type) (Schoch and Maywald, 1968) และในตัวอย่างแบ่งข้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้น (Lai, 2001) ที่พบว่าตัวอย่างจะมีความหนืดสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมีการให้ความร้อนและความชื้น ทำให้เกิดการหลุดออกของโมเลกุลเอมิโลส (amylose leaching) และเอมิโลสเกิดรีโทรเกรดก่อนการทำแห้ง ซึ่งโมเลกุลของเอมิโลสจับกันเองอย่างแข็งแรง จึงส่งผลให้ความหนืดสูงสุดมีค่าลดลงและมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่ลักษณะเส้นกราฟความหนืดต่ำกว่า NWF



ภาพที่ 39 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร โดยการให้ความร้อนแก่สารละลายก่อนนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (SNWF)

เมื่อเปรียบเทียบระดับของอุณหภูมิที่มีการให้ความร้อนก่อนการทำแห้ง พบว่า SNWF85 ทำให้สสาร์เกรนูลเกิดการจับกัน (aggregation) มากขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำในระบบเข้าทำปฏิกิริยากับสสาร์เกรนูลได้ช้า จึงทำให้สสาร์เกรนูลเกิดการพองตัวและถูกทำลายได้ช้า เนื่องจากกระบวนการดัด

แปรรูปด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย มีการเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนแก่สารละลายก่อนการทำแห้ง ซึ่งการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 65 ถึง 85 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้สสารขี้เกรนูลบางส่วนเกิดการพองตัว (ภาพที่ 25) และเกิดการหลุดออกของโมเลกุลแอมิโลสจากสสารขี้เกรนูล (Hizukuri, 1991; BeMiller and Whistler, 2009) ส่งผลให้มีแอมิโลสอยู่ในสารละลาย เมื่อนำไปทำให้แห้ง โมเลกุลแอมิโลสที่หลุดออกมาและองค์ประกอบอื่นๆภายในแป้งจะช่วยทำให้สสารขี้เกรนูลยึดเกาะกัน และอาจมีโมเลกุลแอมิโลสที่เป็นอิสระจับกันเอง ส่งผลให้น้ำและความร้อนเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อสลายโครงสร้างผลึกภายในสสารขี้เกรนูลได้ยากขึ้น ทำให้พองตัวได้อย่างจำกัด ดังนั้นจึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการเปลี่ยนแปลงความหนืด ซึ่งสอดคล้องกับการสังเกตการเปลี่ยนแปลงด้านสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (ภาพที่ 33) และการเกิดเจลลาติไนเซชัน (ตารางที่ 10)

4. สมบัติทางเคมีของแป้งกล้วยน้ำว่าตัดแปรรูปด้วยวิธีพรีเจลลาติไนซ์

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วยน้ำว่าตามธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว่าตัดแปรรูป

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วยน้ำว่าตามธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว่าตัดแปรรูป พบว่าแป้งกล้วยน้ำว่าตัดแปรรูปมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และแอมิโลส แตกต่างจากแป้งกล้วยน้ำว่า NWF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 14)

การตัดแปรรูปโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่ จะใช้เวลานาน (ประมาณ 2-20 วินาที) นอกจากนี้ความร้อนจากผิวหน้าลูกกลิ้งยังสัมผัสกับตัวอย่างโดยตรง อาจทำให้น้ำระเหยออกไป และสสารขี้เกรนูลถูกทำลาย จึงทำให้กักเก็บความชื้นได้ต่ำ (Kalogianni *et al.*, 2002; วิไล, 2547) ในขณะที่เดียวกันการตัดแปรรูปแป้งกล้วยน้ำว่าโดยการให้ความร้อนแก่สารละลายก่อนนำไปทำให้แห้งโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย น้ำในแป้งจะถูกระเหยออกในเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย แต่เนื่องจากการให้ความร้อนในเวลาอันรวดเร็ว (1-10 วินาที) และยังคงมีสสารขี้เกรนูลอยู่ จึงทำให้สามารถกักเก็บความชื้นไว้ในโครงสร้างได้ ส่งผลให้มีความชื้นสูงกว่าแป้งที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่

เมื่อพิจารณาปริมาณโปรตีนและเถ้าของแป้งกล้วยน้ำว่าตัดแปรรูป พบว่ามีปริมาณไม่แตกต่างจากแป้งกล้วย NWF แต่ปริมาณไขมันของแป้งกล้วยน้ำว่าตัดแปรรูปมีปริมาณต่ำกว่าแป้งกล้วย NWF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ 14 จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีพบว่าความร้อนใน

การตัดแปรมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไขมัน โดยพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแคบลง มีผลทำให้ปริมาณไขมันลดลง เนื่องจากกระบวนการความร้อนอาจมีผลทำให้ไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของแอมิโลส (amylose-lipid complexes) และการที่สตาบิไลเซอร์ถูกทำลายอาจส่งผลให้ไขมันในแป้งเกิดการสลายตัวและเกิดออกซิเดชัน (นิธิยา, 2549) ในขณะที่แป้งตัดแปร SNWF ที่มีการใช้อุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่างก่อนทำแห้งสูงขึ้น อาจมีผลทำให้ไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของแอมิโลส มีผลให้ปริมาณไขมันลดลง (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 14 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งกล้วยน้ำว้า

ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)				
	ความชื้น	โปรตีน ^{ns}	ไขมัน	เถ้า ^{ns}	แอมิโลส
NWF	8.14 ^f ± 0.23	2.66 ± 0.04	0.20 ^c ± 0.02	2.41 ± 0.04	19.52 ^d ± 0.14
DNWF0.15	4.04 ^a ± 0.09	2.66 ± 0.04	0.06 ^a ± 0.01	2.44 ± 0.05	16.54 ^a ± 0.28
DNWF0.25	4.34 ^{ab} ± 0.15	2.62 ± 0.00	0.09 ^a ± 0.01	2.47 ± 0.01	17.76 ^b ± 0.14
DNWF0.35	4.48 ^b ± 0.17	2.65 ± 0.04	0.14 ^b ± 0.02	2.50 ± 0.02	18.00 ^b ± 0.16
SNWF65	6.29 ^c ± 0.26	2.62 ± 0.00	0.18 ^c ± 0.02	2.43 ± 0.04	19.18 ^c ± 0.17
SNWF75	5.96 ^d ± 0.17	2.66 ± 0.04	0.10 ^a ± 0.01	2.42 ± 0.08	20.69 ^f ± 0.06
SNWF85	5.57 ^c ± 0.07	2.65 ± 0.04	0.08 ^a ± 0.01	2.40 ± 0.04	20.03 ^c ± 0.10

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

($p \leq 0.05$)

ns (not significant): ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ในขณะที่ปริมาณแอมิโลสของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปรมีปริมาณที่แตกต่างกัน โดย NWF มีปริมาณแอมิโลสสูงกว่าแป้ง DNWF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ 14 อาจเกิดจากการกระบวนการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งส่งผลต่อโครงสร้างแอมิโลสบางส่วน ทำให้แอมิโลสถูกทำลายจนเกิดเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก (Degree of polymerization; DP) เกิดเป็นสายสั้นและไม่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนจนเป็นสีน้ำเงินได้ (Bailey and Whelan, 1961; Yu *et al.*, 1996; Knutson, 1999) นอกจากนี้ยังพบว่าการตรวจสอบปริมาณ

แอมิโลสโดยใช้วิธีของ Juliano (1971) โดยวัดค่าการดูดกลืนแสง พบว่าตัวอย่าง DNWF เกิดตะกอน จึงทำให้ตัวอย่างติดสีของไอโอดีนไม่เท่ากัน ก่อนนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงทำการเหวี่ยงตะกอน และนำส่วนของเหลวที่ได้ไปทำการวัด ซึ่งน่าจะเป็นผลให้ปริมาณแอมิโลสในตัวอย่างของ DNWF น้อยกว่าความเป็นจริง

จากการตรวจสอบปริมาณแอมิโลส พบว่าแป้งกล้วย NWF มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่าแป้งกล้วยตัดแปร SNWF ซึ่งจากการทดลองที่กล่าวไปแล้วข้างต้น กระบวนการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย มีการเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนแก่สารละลายก่อนการทำแห้ง อาจเกิดการหลุดออกของโมเลกุลแอมิโลสจากสตาร์ชแกรนูล ส่งผลให้มีแอมิโลสอยู่ในสารละลายน้ำแป้ง เมื่อนำไปทำให้แห้ง โมเลกุลแอมิโลสที่หลุดออกมาจะปะปนอยู่ในเนื้อแป้ง ซึ่งมีผลต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของไอโอดีน และเมื่อทำการวัดปริมาณแอมิโลสจึงส่งผลให้แป้ง SNWF มีปริมาณแอมิโลสที่สูงกว่าตัวอย่างอื่น

4.2 ปริมาณ resistant starch

ลักษณะเด่นที่สุดของสตาร์ชจากกล้วยดิบ คือ การเป็น resistant starch (RS) ชนิดที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ (Resistant starch type II, RS2) (Gonzalez-Sato *et al.*, 2006) ในงานวิจัยได้ทำการตัดแปรแป้งกล้วยน้ำว้าด้วยความร้อนร่วมกับความชื้น จากผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วพบว่า การตัดแปรทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างสตาร์ชแกรนูล โครงสร้างผลึกลดลง คุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์และองค์ประกอบทางเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้อาจส่งผลต่อรูปแบบและปริมาณ RS2 ที่มีอยู่เดิม จึงได้ตรวจสอบหาปริมาณของ RS ภายหลังการตัดแปรด้วยชุดตรวจสอบสำเร็จ ดังแสดงในตารางที่ 15 โดยชุดตรวจสอบสำเร็จจะจำลองสภาวะภายในร่างกายมนุษย์ และเอนไซม์ย่อยสตาร์ชทำให้ได้น้ำตาลกลูโคส จากนั้นจึงตรวจสอบปริมาณกลูโคส

จากตารางที่ 15 พบว่าแป้งจากกล้วยน้ำว้าดิบและกล้วยน้ำว้าตัดแปรมีปริมาณ resistant starch (RS) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยแป้งกล้วยน้ำว้าดิบจะมีปริมาณ resistant starch สูงสุด โดยมีค่าร้อยละ 65.46 ในขณะที่ปริมาณ RS ใน DNWF0.15 จะมีค่าต่ำสุด โดยพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างช่องแคบลดลงปริมาณของ RS จะลดลง ในขณะที่ SNWF จะยังคงมีปริมาณของ RS เหลืออยู่มากกว่า แต่จากการทดลองพบว่า SNWF85 มีปริมาณ RS มากกว่า SNWF75 ซึ่งอาจเกิดจากการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ไม่ได้ไม่เท่ากัน เนื่องจากการทดลองที่ใช้ชุดตรวจสอบสำเร็จมีการใช้เอนไซม์เข้าทำ

ปฏิกิริยา 2 ช่วง คือ ช่วงแรกจะใช้เอนไซม์ย่อยส่วนที่ไม่ใช่ resistant starch (non-resistant starch; non-RS) ออกไปก่อน และในช่วงที่ 2 จะเป็นเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายส่วนที่เหลือ หรือ resistant starch ให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคสได้ จากภาพผนวกที่ 1 พบว่าลักษณะของสตาร์ชเกรนูลของ SNWF75 และ SNWF85 มีความแตกต่างกัน โดย SNWF85 จะมีการเกาะกลุ่มกันมากกว่า SNWF75 ซึ่งอาจทำให้เอนไซม์ในช่วงแรกเข้าทำปฏิกิริยากับ SNWF85 ได้ยาก ส่งผลให้เอนไซม์ย่อยส่วนที่ไม่ใช่ resistant starch น้อยกว่าความเป็นจริง เมื่อผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ในช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายส่วนที่เหลือ หรือ resistant starch ได้ จึงส่งผลให้ SNWF85 มีปริมาณ resistant starch มากกว่า SNWF75

ตารางที่ 15 ปริมาณ resistant starch ที่พบในแป้งจากกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและกล้วยน้ำว้าดัดแปร

Sample	%RS (w/w)
NWF	65.46 ^c ± 1.39
DNWF0.15	0.46 ^a ± 0.00
DNWF0.25	1.03 ^a ± 0.02
DNWF0.35	1.18 ^a ± 0.01
SNWF65	58.02 ^d ± 0.19
SNWF75	31.27 ^b ± 0.89
SNWF85	45.62 ^c ± 1.61

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

($p \leq 0.05$)

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การดัดแปรที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ resistant starch โดยพบว่าวิธีการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกคู่จะทำลายสมบัติการเป็น resistant starch อาจเนื่องมาจากโครงสร้างผลึกภายในเกรนูลสูญเสียไป (ภาพที่ 24 และ 26b) จึงมีผลทำให้เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลสตาร์ชง่ายขึ้น

ในขณะที่การดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยจะทำลายสมบัติการเป็น resistant starch บางส่วน เนื่องจากมีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง ซึ่งความร้อนมีผลต่อโครงสร้างผลึกและการคลายตัวของโมเลกุลภายในสตาร์ชเกรนูล โดยจากผลการทดลองโครงสร้างผลึกพบว่ามีความเป็นผลึกลดลง

(ภาพที่ 29 และตารางที่ 6) จากการที่ผลึกถูกทำลายจึงทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับสตาร์ช แกรนูลได้บางส่วน ในขณะที่สตาร์ชแกรนูลบางหน่วยจะเกาะกลุ่มกันและถูกเชื่อมติดกันด้วย องค์ประกอบชนิดอื่น ซึ่งทำให้มีพื้นผิวน้อย เอนไซม์จึงเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ยาก ทำให้ยังคงมีปริมาณ resistant starch เหลืออยู่มากกว่า DNWF

ตารางที่ 16 ปริมาณ resistant starch ที่พบในสตาร์ชจากกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและกล้วยน้ำว้าดัดแปร

Sample	%RS (w/w)
NWS	71.16 ^c ± 0.28
SNWS75	6.93 ^b ± 0.08
SNWS85	4.08 ^a ± 0.18

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

จากการทดลองพบว่าเมื่อแป่งผ่านกระบวนการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งพ่นฝอย จะส่งผลให้ปริมาณ resistant starch ลดลง แต่ยังคงมีปริมาณ resistant starch สูงกว่าร้อยละ 30 เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณ resistant starch ของตัวอย่าง SNWF (ตารางที่ 15) กับ SNWS (ตารางที่ 16) พบว่าเมื่อสตาร์ชผ่านการดัดแปรด้วยวิธีนี้จะทำให้ปริมาณของ resistant starch ลดลง โดยมีปริมาณต่ำกว่าในตัวอย่าง SNWF มาก จึงมีความเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบอื่นๆที่อยู่ในแป้งและลักษณะของสตาร์ชแกรนูลที่เปลี่ยนแปลงไปน่าจะมีส่วนช่วยป้องกันไม่ให้สตาร์ชแกรนูลและส่วนที่เป็น resistant starch ถูกทำลาย

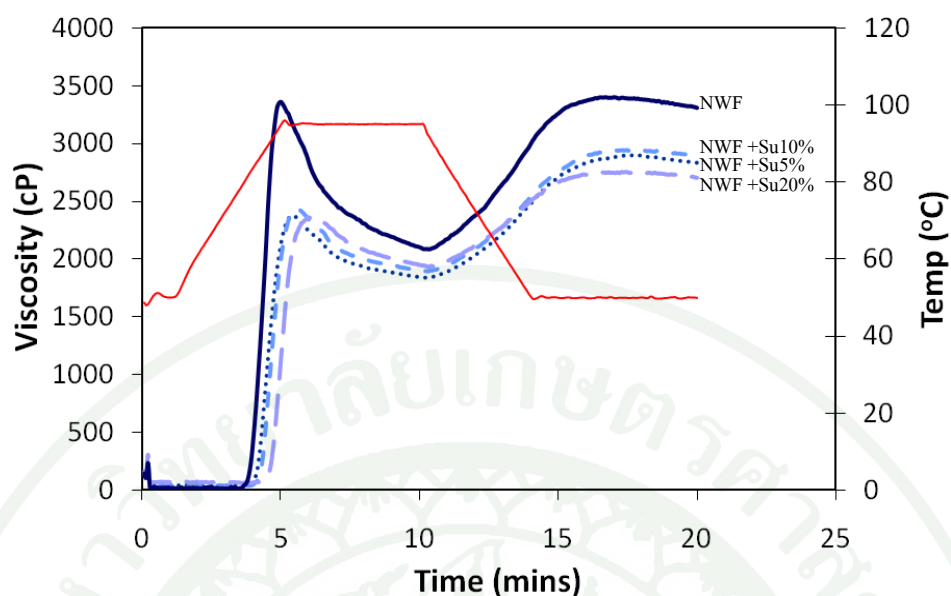
5. ผลของส่วนประกอบอาหาร (food ingredients) ต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้า

โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์พื้นฐานที่มีแป้งและสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดและสมบัติของสตาร์ชที่เป็นแหล่งวัตถุดิบนั้น ๆ ซึ่งการนำแป้งและสตาร์ชไปใช้ต้องมีการนำไปผสมกับส่วนประกอบอาหารอื่นๆ โดยส่วนประกอบต่างๆน่าจะมีอิทธิพลต่อสมบัติของแป้งกล้วยดัดแปร งานวิจัยจึงได้เลือกส่วนประกอบอาหารที่นิยมนำมาใช้กับแป้งและสตาร์ช คือ น้ำตาลและเกลือ เพื่อตรวจสอบผลที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยได้ทำการทดลองโดยแปรระดับความเข้มข้นที่ 5 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ก่อนนำไปตรวจสอบสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว

5.1 ผลของน้ำตาลซูโครส

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (NWF) และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร ในระบบที่เติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้น 5 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ลงในสารละลายแป้ง ก่อนนำไปตรวจสอบสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว ดังภาพที่ 40-42 พบว่าค่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature: PT) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนืดตลอดทั้งเส้นกราฟลดลง เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสในระบบมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature; PT) ของแป้ง NWF และ SNWF มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสในระบบเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำตาลซูโครส โดยน้ำตาลที่เติมลงไปในระบบจะส่งผลต่อพันธะไฮโดรเจนในน้ำ ทำให้รูปร่างและตำแหน่งของโมเลกุลน้ำเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง มีการจับกันระหว่างโมเลกุลของน้ำ (water-water interactions) และน้ำกับน้ำตาล (water-sugar-water interactions) จับกันเป็นโครงสร้างที่คงตัว (Kabayama and Patterson, 1958; Uedaira *et al.*, 1989; Kohyama and Nishinari, 1991; Huang *et al.*, 2003; Sopade *et al.*, 2004) ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่จะเข้าทำพันธะไฮโดรเจนกับพอลิแซคคาไรด์ในสตาร์ช และน้ำที่จะไปห่อหุ้มโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์มีปริมาณลดลง ทำให้การเคลื่อนไหวของโครงสร้างพอลิแซคคาไรด์เป็นไปอย่างจำกัด จึงทำให้ต้องการอุณหภูมิและเวลาที่มากขึ้น เพื่อให้สตาร์ชแกรนูลเริ่มเกิดการพองตัว (Stevens and Elton, 1971; Chungcharoen and Lund, 1987; Kohyama and Nishinari, 1991; Eliasson, 1992; Maaurf *et al.*, 2001; Hirashima *et al.*, 2005; BeMiller and Whistler, 2009)

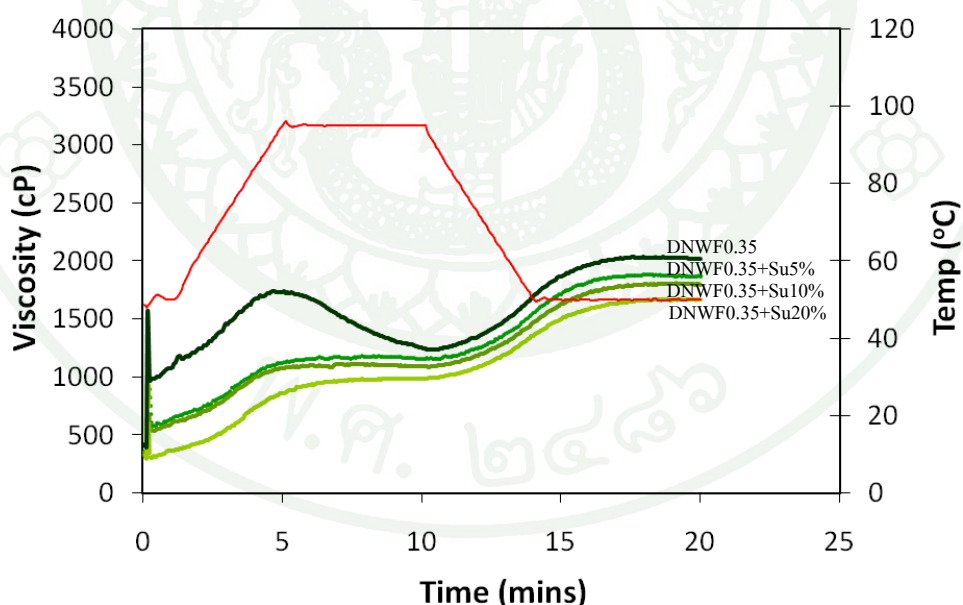


ภาพที่ 40 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติในระบบที่มีการเติมน้ำตาล ร้อยละ 5, 10 และ 20

หมายเหตุ Su คือ น้ำตาลซูโครส (sucrose)

เมื่อพิจารณาความหนืดสูงสุด (peak viscosity: PV) ความหนืดลดลง (breakdown: BD) และ ความหนืดสุดท้าย (final viscosity; FV) ของแป้ง NWF พบว่ามีค่าลดลง เมื่อปริมาณน้ำตาลซูโครสในระบบมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 40 เนื่องจากปริมาณน้ำที่จะทำให้สตาร์ชแกรนูลเกิดการพองตัวมีจำกัด ทำให้สตาร์ชแกรนูลในตัวอย่าง NWF พองตัวน้อยลงและไม่แตกออก ส่งผลให้มีค่าความหนืดสูงสุดลดลง และน้ำตาลซูโครสยังส่งผลให้ค่าความหนืดลดลงต่ำ การที่ตัวอย่างมีค่าความหนืดลดลงต่ำ แสดงว่ามีความต้านทานต่อการกวนได้สูง สตาร์ชแกรนูลมีความคงทนต่อแรงกวนได้มาก ซึ่งน้ำตาลที่เติมลงไปในระบบจะทำให้สตาร์ชแกรนูลและโครงสร้างของแป้งทนต่อการถูกทำลาย (BeMiller and Whistler, 2009) เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity; FV) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการบอกคุณภาพของแป้งเมื่อผ่านการให้ความร้อนและทำให้เย็นตัว (Newport Scientific, 1995) โดยทั่วไปเมื่อลดอุณหภูมิลง ความหนืดจะมีแนวโน้มสูงขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากโมเลกุลของเอมิโลสและเอมิโลเพกทินจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างสามมิติ มักเรียกว่า กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) และค่าความหนืดสุดท้ายยังมีความสัมพันธ์กับค่าความหนืดต่ำสุดหรือที่เรียกว่าค่าการคืนตัวและความคงตัว (setback from trough) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้สำหรับประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสสุดท้าย (final texture) และความ

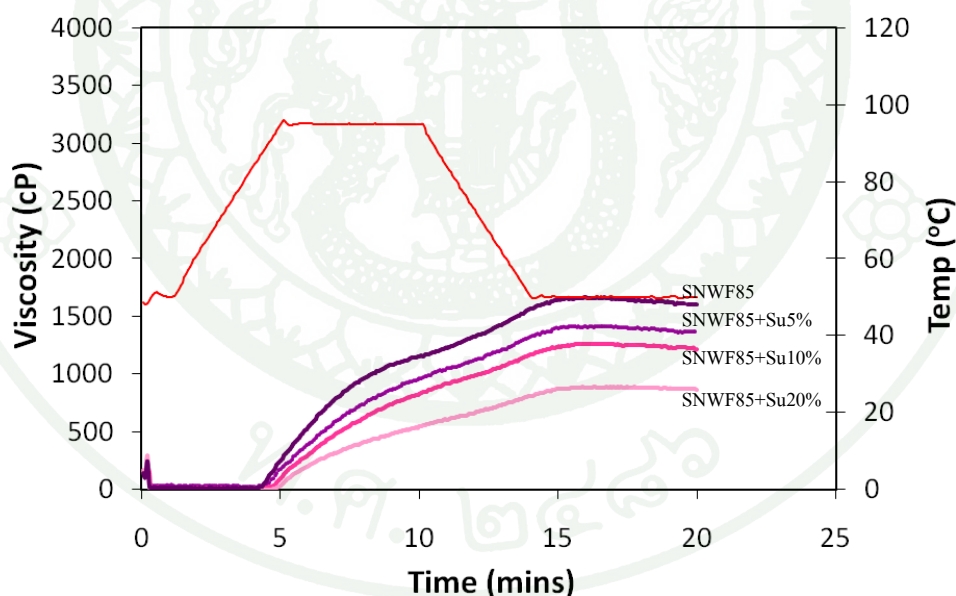
คงตัวต่อสภาวะการแช่แข็งและการละลาย (freeze-thaw stability) ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าการคินตัวและความคงตัวของตัวอย่างที่ต่ำจะสะท้อนให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนในระบบมาแล้ว มีความเสถียร มีแนวโน้มที่จะลดการเกิดรีโทรเกรเดชัน มีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย และลดการแยกน้ำออก (syneresis) ในผลิตภัณฑ์ (Mazurs *et al.*, 1957; Wadchararat *et al.*, 2006) เมื่อเปรียบเทียบระบบที่ไม่มีการเติมน้ำตาลกับระบบที่มีการเติมน้ำตาลจะพบว่า แป้ง NWF มีค่าการคินตัวลดลงเมื่อมีการเติมน้ำตาล เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้น มีผลให้สตาร์ชแกรนูล พองตัวน้อยลง สตาร์ชแกรนูลมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อปริมาณแอมิโลสที่หลุดออก (amylose leaching) ที่สัมพันธ์กับการพองตัวลดลง จึงส่งผลให้มีค่าการคินตัวลดลง นอกจากนี้อาจเป็นเพราะน้ำตาลจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลสตาร์ช และน้ำตาลจะไปจับกับแอมิโลสและแอมิโลเพกทินบางส่วนที่หลุดออกมาในระบบเกิดเป็นโครงสร้าง (network) (Kohyama and Nishinari, 1991; Aee *et al.*, 1998; Gunaratne *et al.*, 2007; รัชบุญ, 2551) จึงส่งผลให้มีค่าการคินตัวลดลง เมื่อนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์อาจส่งผลให้ลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในผลิตภัณฑ์ มีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายสูง และเกิดการแยกน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าแป้งกล้วยในระบบที่ไม่มีการเติมน้ำตาล



ภาพที่ 41 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปรร DNWF ในระบบที่มีการเติมน้ำตาลร้อยละ 5, 10 และ 20

หมายเหตุ Su คือ น้ำตาลซูโครส (sucrose)

เมื่อพิจารณาความหนืดสูงสุด ความหนืดลดลง และความหนืดสุดท้ายของแป้ง DNWF พบว่ามีค่าความหนืดที่ลดลง เมื่อปริมาณน้ำตาลซูโครสในระบบมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 41 เนื่องจากสสาร์แกรนูลของ DNWF ส่วนใหญ่ถูกทำลายไปแล้ว ความหนืดที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการที่น้ำตาลซูโครสเกิดโครงสร้างที่คงตัวกับพอลิแซคคาไรด์ที่อยู่อย่างอิสระ ซึ่งลักษณะของโครงสร้างที่คงตัวนี้ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดลดลงของระบบมีค่าลดลง โดยน้ำตาลที่เติมลงไปในระบบจะทำให้โครงสร้างของแป้งทนต่อการถูกทำลาย และจากการที่น้ำตาลซูโครสจับกับพอลิแซคคาไรด์ของแป้งที่อยู่อย่างอิสระ เมื่อระบบเย็นตัวลงน้ำตาลจะขัดขวางการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลสสาร์ และน้ำตาลจะไปจับกับแอมิโลสและแอมิโลเพกทินในระบบเกิดเป็นโครงสร้าง (network) (Kohyama and Nishinari, 1991; Aee *et al.*, 1998; Gunaratne *et al.*, 2007; ชันยบุรณ์, 2551) จึงส่งผลให้มีค่าการคืนตัวลดลงเมื่อมีการเติมน้ำตาล เมื่อนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์อาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดรีโทรเกรเดชันลดลง ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายสูง และเกิดการแยกน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า DNWF ในระบบที่ไม่มีการเติมน้ำตาล



ภาพที่ 42 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF ในระบบที่มีการเติมน้ำตาลร้อยละ 5, 10 และ 20

หมายเหตุ Su คือ น้ำตาลซูโครส (sucrose)

ในขณะที่ SNWF ที่ไม่เติมน้ำตาลและเติมน้ำตาลซูโครสในระบบ จะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ ไม่ปรากฏค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดลดลง ดังภาพที่ 42 โดยจะมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น

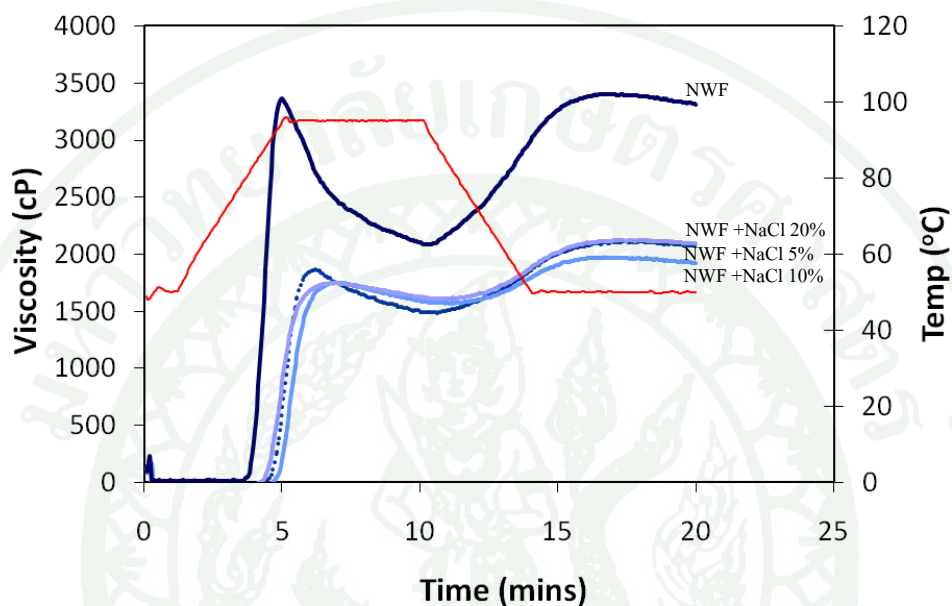
เรื่อยๆ แต่การเติมน้ำตาลซูโครสในปริมาณที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้มีความหนืดตลอดทั้งเส้นกราฟต่ำ เนื่องจากปริมาณน้ำที่จะทำให้สตาร์ชแกรนูลเกิดการพองตัวมีอย่างจำกัด เพราะโมเลกุลของน้ำไปจับกับน้ำตาล และน้ำตาลบางส่วนจับกับพอลิแซ็กคาไรด์ที่อยู่อย่างอิสระ นอกจากนี้ลักษณะของสตาร์ชแกรนูลของ SNWF มีลักษณะที่เกาะกลุ่มกัน ส่งผลให้น้ำและความร้อนเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อสลายโครงสร้างผลึกภายในสตาร์ชแกรนูลได้ยากขึ้น ทำให้พองตัวได้อย่างจำกัดและสตาร์ชแกรนูลในระบบไม่แตกออก จึงส่งผลให้มีความหนืดตลอดทั้งเส้นกราฟต่ำกว่าระบบที่ไม่มีการเติมน้ำตาล

5.2 ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์

เมื่อพิจารณาผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 5 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (NWF) และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature; PT) มีแนวโน้มสูงขึ้น และลักษณะเส้นกราฟความหนืดมีแนวโน้มลดลง ดังภาพที่ 43-45

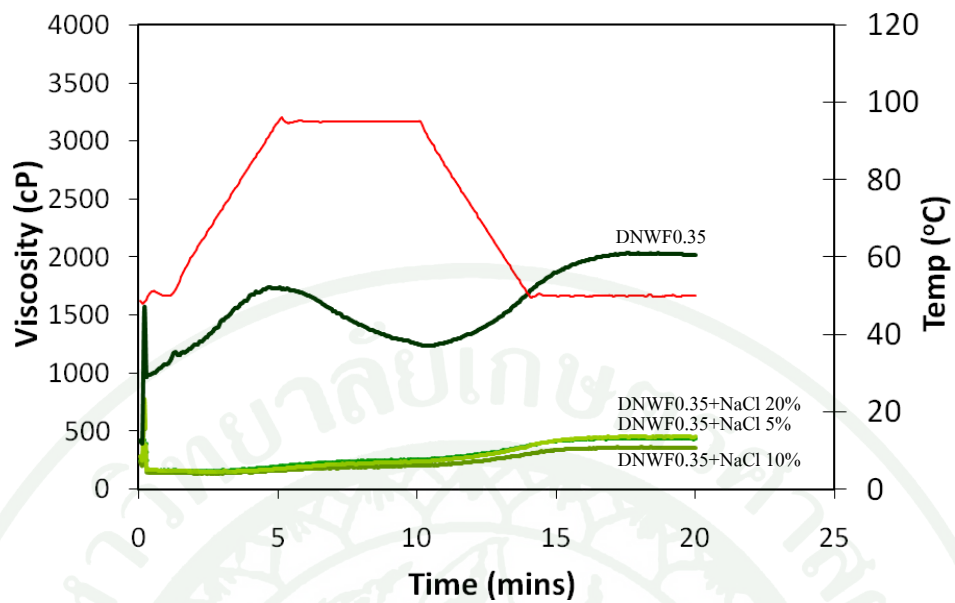
จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง NWF และ SNWF มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ในระบบเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากอิทธิพลของโซเดียมไอออน (Na^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ที่มีผลต่อสตาร์ชแกรนูลและโครงสร้างของน้ำ (Wootton and Bamunuarachchi, 1978; Jane and Ames, 1993) โดยเกลือโซเดียมคลอไรด์จะมีผลทำให้ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงขึ้น โดยโซเดียมไอออนจะเกิดอันตรกิริยากับหมู่แอลกอฮอล์ิก (alcoholic group) ในสตาร์ชแกรนูลกลายเป็นเกลือของโซเดียมแอลกอฮอล์ (sodium alcoholate group) ซึ่งสารดังกล่าวสามารถแตกตัวได้ดี ทำให้ค่า Donnan Potential มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คลอไรด์ไอออนถูกกีดกันออกจากสตาร์ชแกรนูลมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น สตาร์ชแกรนูลเริ่มเกิดการพองตัว คลอไรด์ไอออน (Cl^-) จะเริ่มเข้าสู่สตาร์ชแกรนูล และจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของพอลิแซ็กคาไรด์ (Evans and Haisman, 1982; Oosten, 1982; Ahmad and Williams, 1999; Maaurf *et al.*, 2001) จึงทำให้อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดในระบบที่มีการเติมเกลือของ NWF และ SNWF มีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของ NWF มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับระบบที่มีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Evans and

Haisman (1982) ที่พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิในการเกิดเจลที่ในจะลดลง เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์สูงๆ คลอไรด์ไอออนจะมีอิทธิพลต่อระบบมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลที่ในจะลดลง และส่งผลให้อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดลดลง

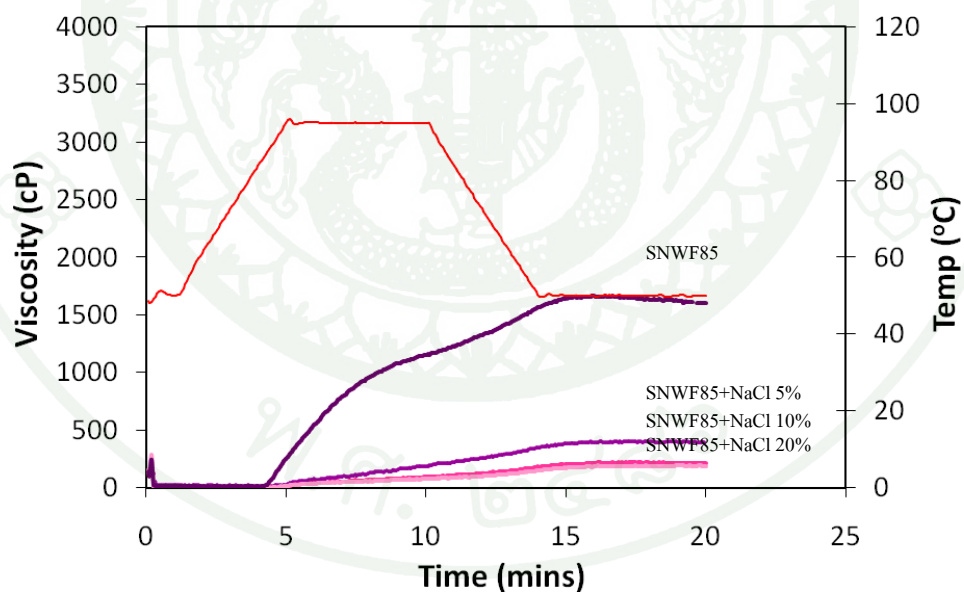


ภาพที่ 43 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติในระบบที่มีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5, 10 และ 20

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity: PV) และค่าความหนืดลดลง (Breakdown: BD) พบว่า NWF มีค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดลดลง มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในระบบสูงขึ้น (ภาพที่ 43) เนื่องจากเกลือโซเดียมคลอไรด์จะไปยับยั้งการพองตัวและการคลายตัวของส่วนผลึก (Ganz, 1965; Maaurf *et al.*, 2001) ทำให้สตาρχเกรนูลในตัวอย่าง NWF พองตัวได้อย่างจำกัด จึงส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุดมีค่าลดลง เมื่อสตาρχเกรนูลเกิดการพองตัวได้อย่างจำกัด และมีสตาρχเกรนูล บางส่วนที่ไม่แตกออก จึงส่งผลให้มีค่าความหนืดลดลงต่ำ เมื่อเปรียบเทียบค่าการคืนตัว (setback from trough) ของระบบที่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์กับระบบที่ไม่มีการเติมโซเดียมคลอไรด์จะพบว่า NWF มีค่าการคืนตัวลดลงเมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ อาจเป็นเพราะโซเดียมคลอไรด์จะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลสตาρχ จึงส่งผลให้มีค่าการคืนตัวลดลงเมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์



ภาพที่ 44 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปร DNWF ในระบบที่มีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5, 10 และ 20



ภาพที่ 45 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปร SNWF ในระบบที่มีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5, 10 และ 20

เมื่อพิจารณาความหนืดของ DNWF และ SNWF (ภาพที่ 44 และ 45) พบว่าการเติมเกลือ โซเดียมคลอไรด์ลงไปในระบบ ส่งผลให้แป้งดัดแปรไม่ปรากฏค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืด ลดลง โดยตัวอย่างจะมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่ลักษณะเส้นกราฟความหนืดต่ำกว่าระบบที่ไม่มีการ เติมเกลือ เนื่องจากสสารซ์แกรนูลของ DNWF ส่วนใหญ่ถูกทำลายไปแล้ว ในขณะที่เกลือโซเดียมคลอไรด์ จะไปยับยั้งการพองตัวและการคลายตัวของส่วนผลึกของ SNWF (Ganz, 1965; Maaurf *et al.*, 2001) ทำให้สสารซ์แกรนูลในตัวอย่าง SNWF พองตัวได้อย่างจำกัด ความหนืดที่เกิดขึ้นอาจเกิดโซเดียมอออนเกิด อันตรกิริยากับหมู่แอลกอฮอล์ิก (alcoholic group) ของพอลิแซคคาไรด์ที่อยู่อย่างอิสระกลายเป็นเกลือของ โซเดียมแอลกอฮอล์ (sodium alcoholate group) เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น คลอไรด์อออนที่อยู่รอบๆ จะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของพอลิแซคคาไรด์ และโซเดียมอออนที่อยู่บนสาย พอลิแซคคาไรด์ที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการผลักกัน (Oosten, 1982; Ahmad and Williams, 1999; Maaurf *et al.*, 2001) ทำให้ความหนืดของ DNWF และ SNWF ในระบบที่มีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์มีค่าความ หนืดต่ำกว่าในระบบที่ไม่มีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (NWF) และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร (DNWF และ SNWF) พบว่าแป้งดัดแปรจะมีสีเข้มกว่าแป้งกล้วยน้ำว้า โดยแป้งดัดแปร DNWF จะมีสีเข้มที่สุด การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NWF และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร พบว่าลักษณะรูปร่างของสตาρχเกรนูลกล้วยมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีทั้งที่เป็นทรงทรงเปลือกหอยและทรงกลม มีขนาดแตกต่างกัน โดยเฉลี่ยประมาณ 19-40 ไมโครเมตร ในขณะที่รูปร่างสตาρχเกรนูลของ DNWF พบว่ามีรูปร่างเป็นแผ่น อย่างไรก็ตามลักษณะเกรนูลของแป้ง SNWF มีขนาดใหญ่ขึ้น มีลักษณะเหมือนกับสตาρχเกรนูลที่มีการพองตัวไปแล้วบางส่วนและสตาρχเกรนูลบางหน่วยมีการเกาะกลุ่มกัน เมื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) พบว่า NWF และ SNWF มีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นชนิด B ในขณะที่ DNWF จะสูญเสียความเป็นผลึกเมื่อนำ SNWF และ SNWS มาศึกษาโครงสร้างผลึก จะพบว่าฟิสิกส์ต่างๆที่มีอยู่เดิม รวมทั้งดัชนีความเป็นผลึกจะค่อยๆลดลงเมื่อตัวอย่างได้รับความร้อนสูงขึ้นก่อนการทำแห้ง

การศึกษาอิทธิพลของการดัดแปรต่อสมบัติด้านเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งกล้วยน้ำว้า พบว่าการดัดแปรส่งผลทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและลักษณะโครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้สมบัติอื่นๆของแป้งกล้วยน้ำว้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ภายหลังการดัดแปรพบว่าความสามารถในการละลายของ DNWF สูงขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการละลายและการพองตัวของ SNWF ลดลง โดยพบว่ามีลักษณะการพองตัวที่แตกต่างจากแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ แต่การดัดแปรสตาρχพบว่า SNWS มีความสามารถในการละลายและการพองตัวดีกว่าสตาρχกล้วยธรรมชาติ นอกจากนี้แป้งดัดแปรยังมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่า NWF เมื่อตรวจสอบช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันพบว่าในตัวอย่าง NWF มีช่วงอุณหภูมิ (T_0 - T_p - T_c) และพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน เท่ากับ 74.55-79.06-84.73 องศาเซลเซียส และ 14.18 จูลต่อกรัม ภายหลังการดัดแปรพบว่าช่วงอุณหภูมิ (T_0 - T_p - T_c) และพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชันของ DNWF ลดลง (48.63-79.32 องศาเซลเซียส และ 1.84-2.98 จูลต่อกรัม) ในขณะที่ตัวอย่าง SNWF จะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_0 - T_p - T_c) เพิ่มขึ้นและพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชันลดลงเมื่อตัวอย่างได้รับความร้อนสูงขึ้นก่อนการทำแห้ง (73.72-94.72 องศาเซลเซียส และ 4.37-15.85 จูลต่อกรัม) และพบว่า SNWS มีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน 2 ช่วง

โดยมีช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าและช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับ SNWF เมื่อวิเคราะห์อุณหภูมิและพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชันของแป้งกล้วยน้ำว้าและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร พบว่าการเก็บรักษาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะมีช่วงอุณหภูมิในการสลายโครงสร้างผลึก ($T_0-T_p-T_c$) เท่ากับ 42-73.43 องศาเซลเซียส สำหรับพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง NWF DNWF และ SNWF มีค่าพลังงานเท่ากับ 4.04, 3.88-4.84 และ 4.77-5.50 จูลต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 14 วัน พบว่าแป้งกล้วยน้ำว้าและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปรต้องการช่วงอุณหภูมิในการสลายโครงสร้างผลึก ($T_0-T_p-T_c$) เท่ากับ 42.12-72.45 องศาเซลเซียส สำหรับพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึก พบว่า แป้งกล้วย NWF ต้องการพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกเท่ากับ 4.97 จูลต่อกรัม สำหรับแป้งกล้วยดัดแปร DNWF และ SNWF มีค่าพลังงานเท่ากับ 5.61-5.94 และ 6.36-6.76 จูลต่อกรัม สำหรับสมบัติด้านความหนืด พบว่า DNWF สามารถเกิดความหนืดได้ทันที และมีความหนืดตลอดทั้งเส้นกราฟต่ำกว่าแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ อย่างไรก็ตามตัวอย่างแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWF มีความหนืดที่แตกต่างไปจากแป้งกล้วยดิบ คือมีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเพิ่มสูงขึ้นและมีความหนืดต่ำกว่าแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ

การศึกษาสมบัติทางเคมีของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ (NWF) และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร (DNWF และ SNWF) พบว่าปริมาณเถ้าและโปรตีนไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่การดัดแปรส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมี เช่น ความชื้น ไขมัน และแอมิโลสเปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่าแป้งดัดแปรจะมีปริมาณความชื้นและไขมันลดลง นอกจากนี้พบว่าแป้งดัดแปร DNWF มีปริมาณแอมิโลสลดลง ในขณะที่แป้งดัดแปร SNWF มีปริมาณแอมิโลสเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของการดัดแปรต่อปริมาณ resistant starch (RS) พบว่าการดัดแปรทำให้ปริมาณของ RS เปลี่ยนแปลง โดยพบว่าแป้งดัดแปร DNWF มีปริมาณของ RS ต่ำกว่าร้อยละ 1.2 ในขณะที่แป้งดัดแปร SNWF ยังคงมีปริมาณ RS สูงกว่าร้อยละ 30 แต่สตาร์ชดัดแปร SNWS จะมีปริมาณ RS ร้อยละ 4.08-6.93

เมื่อศึกษาอิทธิพลของส่วนประกอบอาหารต่อสมบัติด้านความหนืดของ NWF และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร พบว่าน้ำตาลซูโครสและกลีโคไซด์มีอิทธิพลต่อสตาร์ชแกรนูลและโครงสร้างของน้ำ โดยเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสและกลีโคไซด์สูงขึ้น แป้งกล้วยน้ำว้า NWF และแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปรจึงมีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงขึ้น และมีค่าความหนืดต่ำลง

เมื่อศึกษาอิทธิพลของการตัดแปรรูป พบว่าระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและการให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันก่อนนำไปทำให้แห้ง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งกล้วยน้ำว่า โดยมิเนวโน้มเมื่อระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแคบลงและเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่สารละลายเพิ่มสูงขึ้น จะมีผลทำให้แป้งกล้วยน้ำว่ามีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า การตัดแปรรูปด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ทำให้สตาร์ชเกิดการเกาะกลุ่มกัน โดยพบว่ามีโครงสร้างที่หุ้มอยู่ภายนอก ควรมีการศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบโดยละเอียด
2. การศึกษาความเป็น resistant starch ควรมีการศึกษาการเกิด resistant starch type 3 โดยใช้เทคนิคทางดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter; DSC) ที่อุณหภูมิสูง เพื่อศึกษาว่า RS ที่ยังคงมีอยู่ในแปรรูปตัดแปรรูปเป็น RS ชนิดเดิมที่อยู่ในแป้ง หรือเป็น RS3 ที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชันภายหลังกระบวนการตัดแปรรูป
3. การศึกษาผลของส่วนประกอบอาหารต่อสมบัติความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว่าควรมีการศึกษาถึงกลไกการเกิดอันตรกิริยาระหว่างน้ำตาลซูโครสและเกลียวโซเดียมคลอไรด์ต่อโมเลกุลของสตาร์ช และโครงสร้างของน้ำ เช่น วัดการพองตัวของสตาร์ชเกรนูลในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ ตรวจสอบและติดตามการเกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออนของเกลียวและโมเลกุลของสตาร์ช โดยเทคนิคทางนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy; NMR) และศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลแป้งกล้วยน้ำว่าที่ความเข้มข้นต่างๆ ของน้ำตาลซูโครสและเกลียวโซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3.

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

จำเริญ อัจฉราภิรักษ์. 2537. การปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังโดยวิธีการแปรสภาพทาง

กายภาพ และทางเคมีแบบเชื่อมข้ามร่วมกับวิธีเอซิติเลชันและพรีเจลาไทไนเซชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดวงแก้ว ศรีลักษณ์. 2544. มหัศจรรย์พันธุ์กล้วยในไทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์แสงแดดเพื่อนเด็ก, กรุงเทพฯ.

เดช วัฒนชัยยิ่งเจริญ. 2541. ยุทธศาสตร์การพัฒนากล้วยของไทย, น. 131-146. พานิชย์ ษศปัญญา, รวบรวมและเรียบเรียง. กล้วยในเมืองไทย. สำนักพิมพ์มติชน, กรุงเทพฯ.

ชั้นขุนธรณ์ อรัญนารถ. 2551. การปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งด้วยคอนยัคกลูโค-แมนแนนและน้ำตาลชนิดต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิรนาม. 2551. ลูกไม้ @ my mom home. Bloggang. แหล่งที่มา:

<http://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=lesliepom&month=022008&date=22&group=5&gblog=3>. 20 ธันวาคม 2551.

นิธิยา รัตนานนท์. 2549. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

บุญรอด วงษ์สาวท. 2549. พอลิแซคคาไรด์. โรงเรียนพรหมานุสรณ์. แหล่งที่มา:

<http://www.promma.ac.th/chemistry/Biomolecule/Biomolecule033.htm>. 24 สิงหาคม 2549.

เบญจมาศ ศิลาย้อย. 2545. กล้วย. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ไพลาภา นุ่มสังข์. 2550. คุณสมบัติของแป้งและสตาร์ชจากกล้วยดิบ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มยุรกาญจน์ เดชกุญชร. 2551. สมบัติของสสารและแป้งลูกเดี๋ยและผลของโปรตีนคอยซินต่อ

สมบัติเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งลูกเดี๋ยเชิงประกอบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ลัณนา ยังประสิทธิ์พร. 2532. การใช้แป้งข้าวเจ้าฟรีเจลาทีนในขนมจีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วสันต์ ศิริวงศ์. 2543. สมบัติเคมีกายภาพของสสารที่สกัดได้จากกล้วยไทยบางชนิด. วิทยานิพนธ์

ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิไล รัชดาทอง. 2547. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร

เหนือ, กรุงเทพฯ.

สมศักดิ์ วรรณศิริ. 2546. สวนกล้วย. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์ฐานเกษตรกรรม, นนทบุรี.

สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2528. การปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งดิบชนิดต่างๆ. รายงานผลการวิจัย

ประจำปี 2528. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

_____. 2534. การปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งดิบ. วิทยาสารเกษตรศาสตร์. 25:

318-325.

สุดาพิทย์ อินทร์ชื่น. 2545. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งกล้วย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อรพิน ภูมิภมร. 2533. เทคโนโลยีของแป้งและเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์จากแป้งบางชนิดที่ผลิตใน

ประเทศไทย. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

A.O.A.C.. 2000. **Official Methods of Analysis**. 20th ed. The Association of Official Analytical

Chemists, Arlington, Virginia.

Aee, L. H., K. N. Hie and K. Nishinari. 1998. DSC and rheological studies of the effects of sucrose on

the gelatinization and retrogradation of acorn starch. **Thermochim. Acta**. 322: 39-46

- Adebowale, K. O., T. A. Afolabi and B. I. Olu-Owolabi. 2005. Hydrothermal treatments of Finger millet (*Eleusine coracana*) starch. **Food Hydrocolloid**. 19: 974-983.
- Aguilera, J. M. and D. W. Stanley. 1999. **Microstructural Principles of Food Processing and Engineering**. 2nd ed. An Aspen Publication. Maryland, USA.
- Ahmad, F. B. and P. A. Williams. 1999. Effect of salts on the gelatinization and rheological properties of sago starch. **J. Agric. Food Chem.** 47: 3359-3366.
- Aloys, N. and H. M. Zhou. 2005. Functional and chemical properties of ikivunde and inyange, two traditionally processed Burundian cassava flours. **J. Food Biochem.** 30, 429-443.
- Alves, R. M. L., M.V.E. Grossmann and R.S.S.F. Silva. 1999. Gelling properties of extruded yam (*Dioscorea alata*) starch. **Food Chem.** 67: 123-127.
- Anonymous. n.d. **Spray dryer selection. GEA Process Engineering Inc.** Available source: http://www.niroinc.com/food_chemical/spray_dryer_selection.asp. July 30, 2008
- Asp, N. G. and I. Björck. 1992. Resistant starch. **Trends Food Sci. Tech.** 3: 111-114.
- Bailey, J. M. and W. J. Whelan. 1961. Physical properties of starch I: relationship between iodine stain and chain length. **J. Biol. Chem.** 236(4): 969-973.
- Bello-Perez, L. A., E. Agama-Acevedo, L. Sanchez-Hernandez and O. Paredes-Lopez. 1999. Isolation and partial characterization of banana starches. **J. Agric. Food Chem.** 47: 854-857.
- BeMiller, J. N. 1997. Starch modification : challenges and prospects. *Starch/Starke*. 49: 127-131.
- _____ and K. C. Huber. 2008. Carbohydrates. pp. 83-154. *In* S. Damodaran, K. L. Parkin and O. R. Fennema (Eds.). **Fennema's Food Chemistry**. 4th Ed. CRC Press., Boca Raton.

_____ and R. L. Whistler. 2009. **Starch: Chemistry and Technology**. 3rd Ed. Academic Press., 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. 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.

Björck, I. 1996. Starch: nutritional aspects. pp. 505-553. In A.-C. Eliasson (Ed.). **Carbohydrates in Food**. Marcel Dekker Inc., New York.

Bul  n, A., P. Colonna, V. Planchot and S. Ball. 1998. Starch granule: structure and biosynthesis. **Int. J. Biol. Macromol.** 23(2): 85-112.

Chaplin, M. 2006. **Starch. Water structure and behavior**. Available source: <http://www.lsbu.ac.uk/water/hysta.html>. June 14, 2006.

Chungcharoen, A. and D. B. Lund. 1987. Influence of solutes and water on rice starch gelatinization. **Cereal Chem.** 64: 240-243.

Debet, M. R. and M. J. Gidley. 2006. Three classes of starch granule swelling: influence of surface proteins and lipids. **Carbohydr. Polym.** 64: 452-465.

Donald, A. M. 2004. Understanding starch structure and functionality. pp. 156-184. In A.-C. Eliasson (Ed.). **Starch in Food: Structure, Function and Applications**. CRC Press, Boca Raton.

Donovan, J. W. 1979. Phase transitions of starch-water systems. **Biopolymers.** 18: 263-275.

- Doublier, J. L., P. Colonna and C. Mercier. 1986. Extrusion of cooking and drum drying of wheat starch: II rheological characterization starch pastes. **Cereal Chem.** 63: 240-246.
- Eliasson, A. C. 1992. A calorimetric investigation of the influence of sucrose on the gelatinization of starch. **Carbohydr. Polym.** 18: 131-138.
- Englyst, H. N. and J. H. Cummings. 1986. Digestion of the carbohydrates of banana (*Musa paradisiaca sapienturn*) in the human small intestine. **Am. J. Clin. Nutr.** 44: 42-50.
- Evans, I. D. and D. R. Haisman. 1982. The effect of solutes on the gelatinization temperature range of potato starch. **Starch/Starke.** 34: 224-231.
- Faisant, N., A. Buléon, P. Colonna, C. Molis, S. Lartigue, J. P. Galmiche and M. Champ. 1995. Digestion of raw banana starch in the small intestine of healthy humans: structural features of resistant starch. **Br. J. Nutr.** 73: 111-123.
- Fredriksson, H., J. Silverio, R. Andersson, A.C. Eliasson and P. Aman. 1998. The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches. **Carbohydr. Polym.** 35: 119-134.
- Ganz, A. J. 1965. Effect of sodium chloride on pasting of wheat starch granules. **Cereal Chem.** 42: 429-431.
- Gavrielidou, M. A., N. A. Vallous, T. D. Karapantsios, S. N. Raphaelides. 2002. Heat transport to a starch slurry gelatinizing between the drums of a double drum dryer. **J. Food Eng.** 54: 45-58.
- Gidley, M.J. 1987. Factors affecting the crystalline type (A-C) of native starches and model compounds: a retionalization of observed effects in terms of polymorphic structures. **Carbohydr. Res.** 161: 301-304.
- Glicksman, M. 1969. **Gum Technology in Food Industry.** Academic Press, New York.

Gonzalez-Sato, R. A., L. Sanchez-Hernandez, J. Solorza-Feria, M. C. Nunez-Santiago, E. Flores-

Huicochea and L. A. Bello-Perez. 2006. Resistant starch production from non-conventional starch sources by extrusion. **Food Sci. Tech. Int.** 12(1): 5-11.

Goodfellow, B. and R.H. Wilson. 1990. A Fourier transform IR study of the gelation of amylose and amylopectin. **Biopolymers.** 30: 1183-1189.

Gunaratne, A. and R. Hoover. 2002. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. **Carbohydr. Polym.** 49: 425-437.

_____, S. Ranaweera and H. Corke. 2007. Thermal, pasting, and gelling properties of wheat and potato starches in the presence of sucrose, glucose, glycerol, and hydroxypropyl β -cyclodextrin. **Carbohydr. Polym.** 70: 112-122.

Hamaker, R.B. and V.K. Griffin. 1993. Effect of disulfide bond-containing protein on rice and starch gelatinization and pasting. **Cereal Chem.** 70: 337-380.

Hirashima, M., R. Takahashi and K. Nishinari. 2005. Changes in the viscoelasticity of maize starch pastes by adding sucrose at different stages. **Food Hydrocolloid.** 19: 777-784.

Hizukuri, S. 1991. Properties of hot-water-extractable amylose. **Carbohydr. Res.** 217: 251-253.

_____. 1996. Starch: analytical aspects. pp. 347-429. In A.-C. Eliasson (Ed.). **Carbohydrates in Food.** Marcel Dekker Inc., New York.

Hoover, R. and S. P. J. N. Senanayake. 1996. Composition and physicochemical properties of oat starches. **Food Res. Int.** 29: 15-26.

Hoseney, R. C. 1998. Starch. pp. 29-64. In R. C. Hoseney (Ed.). **Principles of Cereal Science and Technology.** 2nd Ed. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota.

- Huang, Y., J. Tang, B. G. Swanson, A. G. Cavinato, M. Lin and B. A. Rasco. 2003. Near infrared spectroscopy: a new tool for studying physical and chemical properties of polysaccharide gels. **Carbohydr. Polym.** 53: 281–288.
- Jane, J. and P. A. Seib. 1991. Preparation of granular cold water swelling/soluble starches by alcoholic-alkali treatment. **U.S. Pat. No. 5,057,157**
- Jane, J. L. and I. A. Ames. 1993. Mechanism of starch gelatinisation in neutral salt solutions. **Starch/Starke.** 45: 161-166.
- Jobling, S. 2004. Improving starch for food and industrial applications. **Curr. Opin. Plant. Biol.** 7: 210-218.
- Juarez-Garcia, E., E. Agama-Acevedo, S. G. Sayago-Ayerdi, S. L. Rodriguez-Ambriz and L. A. Bello-Perez. 2006. Composition, digestibility and application in breadmaking of banana flour. **Plant Food. Hum. Nutr.** 61: 131-137.
- Juliano, B. O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. **Cereal Sci. Today.** 16(10): 334-360.
- Kabayama, M. A. and D. Patterson. 1958. The thermodynamics of mutarotation of some sugars: II. theoretical considerations. **Can. J. Chem.** 36: 563-573.
- Kalogianni, E. P., V. A. Xynogalos, T. D. Karapantsios and M. Kostoglou. 2002. Effect of feed concentration on the production of pregelatinized starch in a double drum dryer. **Lebensm.-Wiss. u.-Technol.** 35: 703-714.
- Karim, A. A., M. H. Norziah and C. C. Seow. 2000. Methods for the study of starch retrogradation. **Food Chem.** 71: 9-36.
- Kayisu, K., L. F. Hood and P. J. Vansoest. 1981. Characterization of starch and fiber of banana fruit. **J. Food Sci.** 46: 1885–1890.

_____ and _____. 1981. Molecular structure of banana starch. **J. Food Sci.** 46: 1894-1897.

Kerr, R. W. E. 1950. **Chemistry and Industry of Starch.** Academic Press., New York.

Knight, J. W. 1969. **The Starch Industry.** Pergamon Press., London.

Knutson, C. A. 1999. Evaluation of variations in amylose-iodine absorbance spectra. **Carbohydr. Polym.** 42: 65-72.

Kohyama, K. and K. Nishinari. 1991. Effect of soluble sugars on gelatinization and retrogradation of sweet potato starch. **J. Agric. Food Chem.** 39: 1406-1410.

Lai, H.-M. 2001. Effects of hydrothermal treatment on the physicochemical properties of pregelatinized rice flour. **Food Chem.** 72: 455-463.

Lawal, O. S. 2005. Studies on the hydrothermal modifications of new cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) starch. **Int. J. Biol. Macromol.** 37: 268-277.

Lehmann, U., G. Jacobasch, and D. Schmidiedl. 2002. Characterization of resistant starch type III from banana (*Musa acuminata*). **J. Agric. Food Chem.** 50: 5236-5240.

Lii, C. Y., S. M. Chang and Y. L. Young. 1982. Investigation of the physical and chemical properties of banana starches. **J. Food Sci.** 47: 1493-1497.

Liu, Q. and D. B. Thompson. 1998. Effects of moisture content and different gelatinization heating temperature on retrogradation of waxy-type maize starch. **Carbohydr. Res.** 314: 221-235.

Loisel, C., Z. Maache-Rezzoug, C. Esneault and J. L. Doublier. 2006. Effect of hydrothermal treatment on the physical and rheological properties of maize starches. **J. Food Eng.** 73: 45-54.

Lopez, P.O. and L. A. Bello-Perez. 1994. Amylopectin: structural, gelatinization and retrogradation studies. **Food Chem.** 50: 411-417.

- Lu, S., C. Chen and C. Lii. 1996. Gel-chromatography fraction and thermal characterization of rice starch affected by hydro-thermal treatment. **Cereal Chem.** 73: 5–11.
- Maauf, A. G., Y. B. Che Man, , B. A. Asb, 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.
- Mazurs, E. G., T. J. Schoch and F. E. Kite. 1957. Graphical analysis of the brabender viscosity curves of various starches. **Cereal Chem.** 34: 141–153.
- Millan-Testa, C. E., M. G. Mendez-Montealvo, M.-A. Ottenhof, I. A. Farhat and L. A. Bello-Perez. 2005. Determination of the molecular and structural characteristics of okenia, mango and banana starches. **J. Agric. Food Chem.** 53: 495-501.
- Mitolo, J. J. 2006. Starch selection and interaction in foods. pp. 139-165. In A. G. Gaonkar and A. McPherson (Eds.). **Ingredient Interactions: Effects on Food Quality.** 2nd Ed. CRC Press, Boca Raton.
- Morrison, W. R., R. F. Tester, C. E. Snape, R. Law, M. J. Gidley. 1993. Swelling and gelatinisation of cereal starches. IV some effects of lipid-complexed amylose and free amylose in waxy and normal barley starches. **Cereal Chem.** 70: 385–391.
- Mousia, Z., S. Edherly, S. S. Pandiella and C. Webb. 2004. Effect of wheat pearling on flour quality. **Food Res. Int.** 37: 449-459.
- Newport Scientific. 1995. **Operation Manual for the Series 4 Rapid Visco Analyzer.** Warriewood, Australia.
- Nowjee, N. C. 2004. **Starch. Starch structure.** Available source: <http://www.cheng.cam.ac.uk/research/groups/polymer/RMP/nitin/Starchstructure.html>. June 14, 2006.

- Nugent, A. P. 2005. Health properties of resistant starch. **Br. Nutr. Foundation Nutr. Bull.** 30: 27-54.
- Nunez-Santiago, N. C., L. A. Bello-Perez and A. Tecante. 2004. Swelling solubility characteristics, granule size distribution and rheological behavior of banana (*Musa paradisiaca*) starch. **Carbohydr. Polym.** 56: 65-75.
- Oosten, B. J. 1982. Tentative hypothesis to explain how electrolytes affect the gelatinization temperature of starches in water. **Starch/Stärke.** 34: 233-239.
- Pacheco-Delahaye, E., R. Maldonado, E. Pérez and M. Schroeder. 2008. Production and characterization of unripe plantain (*Musa paradisiaca* L.) flour. **Interciencia.** 33: 290-296.
- Pukkahuta, C., S Shobsngob and S. Varavinit. 2007. Effect of osmotic pressure on starch: new method of physical modification of starch. **Starch/Starke.** 58: 78-90.
- Rashmi, S., and A. Urooj. 2003. Effect of processing on nutritionally important starch fractions in rice varieties. **Int. J. Food Sci. Nutr.** 54: 27-36
- Sajilata, M. G., R. S. Singhal and P. R. Kulkarni. 2006. Resistant starch – a review. **Compr. Rev. Food Sci. F.** 5: 1-17.
- Schoch, T. J. and E. C. Maywald. 1968. Preparation and properties of various legume starches. **Cereal Chem.** 45: 546–573.
- Shujun, W., Y. Jinglin, and G. Wenyuan. 2005. Use of X-ray diffractometry (XRD) for identification of *Fritillaria* according to geographical origin. **Am. J. Biochem. Biotechnol.** 1(4): 207-211.
- Singh, N., J. Singh, L. Kaur, N. S. Sodhi and B. S. Gill. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chem.** 81(2): 219-231.

- Singh, J., L. Kaur and O. J. McCarthy. 2007. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications—a review. **Food Hydrocolloid.** 21: 1-22.
- Sopade, P.A., P. J. Halley and L.L. Junming. 2004. Gelatinisation of starch in mixtures of sugars. II. application of differential scanning calorimetry. **Carbohydr. Polym.** 58: 311-321.
- Stevens, D. J. and G. A. H. Elton. 1971. Thermal properties of the starch/water system part I: measurement of heat of gelatinization by differential scanning calorimetry. **Starch/Starke.** 23: 8-11
- Taggart, P. 2004. Starch as an ingredient: manufacture and applications. pp. 363-392. In A.-C. Eliasson. (Ed.). **Starch in Food: Structure, Function and Applications.** CRC Press, Boca Raton.
- Takaya, T., C. Sano and K. Nishinari. 2000. Thermal studies on the gelatinisation and retrogradation of heat-moisture treated starch. **Carbohydr. Polym.** 41: 97-100.
- Tester, R. F. 1997. Starch : the polysaccharide fractions. pp. 163-147. In P. L. Frazies, A. M. Donald and P. Richmond. (Eds.). **Starch Structure and Functionality.** The Royal Society of Chemistry, U.K.
- _____, J. Karkalas and X. Qi. 2004a. Starch-composition, fine structure and architecture. **J. Cereal Sci.** 39: 151-165.
- _____, _____ and _____. 2004b. Starch structure and digestibility enzyme-substrate relationship. **World. Poultry Sci. J.** 60: 186-195.
- Thomas, D. J. and W. A. Atwell. 1998. Starch modification. pp. 31-48. In D. J. Thomas and W. A. Atwell. (Eds.). **Starches Handbook.** American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota.

- Uedaira, H., M. Ikura and H. Uedaira. 1989. Natural-abundance oxygen-17 magnetic relaxation in aqueous solutions of carbohydrates. **B. Chem. Soc. Jpn.** 62: 1-4.
- Unnikrishnan, K. R. and K. R. Bhattacharya. 1981. Swelling and solubility behavior of parboiled rice flour. **Int. J. Food Sci. Tech.** 16: 403-408.
- Vandeputte, G. E., V. Derycke, J. Geeroms and J. A. Delcour. 2003. Rice Starches. II. structural aspects provide insight into swelling and pasting properties. **J. Cereal Sci.** 38(1): 53-59.
- Vallous, N. A., M. A. Gavrielidou, T. D. Karapantsios, M. Kostoglou. 2002. Performance of a double drum dryer for producing pregelatinized maize starches. **J. Food Eng.** 51: 171-183.
- Villarreal, M. R. 2007. **Plastid. Plastids types**. Available source: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Plastids_types.svg#file. July 13, 2007.
- Vodovotz, Y. and P. Chinachoti. 1998. Glassy-rubbery transition and recrystallization during aging of wheat starch gel. **J. Agric. Food Chem.** 46: 446-453.
- Wadchararat, C., M. Thongngam and O. Naivikul. 2006. Characterization of pregelatinized and heat moisture treated rice flours. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)**. 40: 144-153.
- Waliszewskia, K. N., M. A. Aparicioa, L. A. Bellob and J. A. Monroy. 2003. Changes of banana starch by chemical and physical modification. **Carbohydr. Polym.** 52: 237-242.
- Wang, T. L., T. Y. Bogracheva and C. L. Hedley. 1998. Starch: as simple as A, B, C? **J. Exp. Bot.** 49: 481-502.
- Whistler, R. L. and J. N. BeMiller. 1999. Starch. pp. 117-151. In R. L. Whistler and J. N. BeMiller (Eds.). **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists**. 2nd Ed. Eagan Press, St. Paul, Minnesota.

_____ and E. F. Paschall. 1967. **Starch: Chemistry and Technology**. Academic Press, New York.

Wootton, M. and A. Bamunuarachchi. 1978. Water binding capacity of commercial produced native and modified starches. **Starch/Starke**. 30(9): 306-309.

Yu, X., C. Houtman and R. H. Atalla. 1996. The complex of amylose and iodine. **Carbohydr. Res.** 292: 129-141.

Yuan, R. C., D. B. Thompson and C. D. Boyer. 1993. Fine structure of amylopectin in relation to gelatinization and retrogradation behavior of maize starches from three *wx*-containing genotypes in two inbred lines. **Cereal Chem.** 70: 81-89.

Zhang, P., R. L. Whistler, J. N. BeMiller and B.R. Hamaker. 2005. Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility – a review. **Carbohydr. Polym.** 59: 443-458.

Zhou, X., B.-K. Baik, R. Wang and S.-T. Lim. 2010. Retrogradation of waxy and normal corn starch gels by temperature cycling. **J. Cereal Sci.** 51: 57-65.

Zobel, H. F. 1964. X-ray analysis of starch granules. pp. 109-113. *In* R. L. Whistler, R. J. Smith, J. N. BeMiller and M. L. Wolfrom (Eds.). **Methods in Carbohydrate Chemistry Volume IV: Starch**. Academic Press Inc., New York.

_____ and A. M. Stephen. 2006. Starch: structure, analysis and application. pp. 25-85. *In* A. M. Stephen, G. O. Phillips and P. A. Williams (Eds.). **Food Polysaccharides and Their Applications**. 2nd Ed. CRC Press, Boca Raton.





ก1. วิธีวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (A.O.A.C., 2000)

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1.1 ตู้อบลมร้อน (hot air oven)

1.1.2 ภาชนะใส่ตัวอย่าง (moisture can)

1.1.3 เดซิกเคเตอร์ (desiccator)

1.2 วิธีการวิเคราะห์

อบภาชนะใส่ตัวอย่าง ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำมาใส่ในเดซิกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอน ชั่งตัวอย่างแบ่งถ้วยให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 3 กรัมใส่ในภาชนะใส่ตัวอย่าง อบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำออกมาใส่ในเดซิกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปชั่งน้ำหนัก

1.3 วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{(W_1 - W_2)}{100} \times 100$$

หมายเหตุ W_1 = น้ำหนักตัวอย่างและภาชนะใส่ตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักตัวอย่างและภาชนะใส่ตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

ก2. วิธีวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (ดัดแปลงจากวิธีของ A.O.A.C, 2000)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1.1 เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (Soxtec System HT2; 1045 Extraction unit)

2.1.2 เครื่องทำความเย็น

2.1.3 Extraction cup

2.1.4 ทิมเบิล (thimble)

2.1.5 เดซิกเคเตอร์ (desiccator)

2.2 สารเคมี

ปิโตรเลียมอีเทอร์ที่มีจุดเดือดในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส

2.3 วิธีการวิเคราะห์

ซึ่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 2 กรัม บนกระดาษกรอง และห่อให้มีดซิติก จากนั้นนำมาใส่ลงในทิมเบิลที่สะอาดและแห้ง เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ที่มีจุดเดือดในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส ประมาณ 45 มิลลิลิตร ลงใน extraction cub นำทิมเบิลที่บรรจุตัวอย่างและ extraction cub ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ไขมัน ทำการสกัดไขมันโดยการจุ่มทิมเบิลที่มีตัวอย่างลงในปิโตรเลียมอีเทอร์ที่มีการให้ความร้อนตลอดเวลา (boiling) เป็นเวลา 20 นาที และยกทิมเบิลที่มีตัวอย่างขึ้น โดยให้ปิโตรเลียมอีเทอร์ไหลผ่านและชะไขมันออกจากตัวอย่างตลอดเวลา (rinsing) เป็นเวลา 45 นาที หลังจากนั้นระเหยปิโตรเลียมอีเธอร์ออกจากไขมันที่สกัดได้ (evaporation) เป็นเวลา 10 นาที นำ extraction cup ที่มีไขมันที่ได้จากตัวอย่างมาอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนัก

2.4 วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณไขมัน (ร้อยละ)} = \frac{(W_1 - W_2)}{100} \times 100$$

หมายเหตุ W_1 = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

W_2 = น้ำหนัก extraction cup ก่อนสกัดไขมัน (กรัม)

W_3 = น้ำหนัก extraction cup หลังสกัดไขมัน (กรัม)

ก3. วิธีวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (ดัดแปลงจากวิธีของ A.O.A.C, 2000)

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องย่อย Buchi

3.1.2 หลอดย่อยเคลดาล์ (Kjeldahl)

3.1.3 เครื่องกลั่นอัตโนมัติ Buchi

3.2 สารเคมี

3.2.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น

3.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 40

3.2.3 สารละลายบอริกเข้มข้นร้อยละ 4

3.2.4 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 โมลาร์

3.2.5 คอปเปอร์ซัลเฟต

3.2.6 โพแทสเซียมซัลเฟต

3.2.7 อินดิเคเตอร์ผสมระหว่างเมทิลเรดและโบรโมครีซอลกรีน

3.3 วิธีการวิเคราะห์

ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.5-1 กรัม ลงในหลอดย่อยเคลดาล์ (Kjeldahl) ใส่สารเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย โพแทสเซียมซัลเฟต 7 กรัมและคอปเปอร์ซัลเฟต 0.8 กรัม พร้อมด้วย glass bead 3 เม็ด เติมกรดซัลฟิวริกประมาณ 15 มิลลิลิตร ต่อชุดย่อยเข้ากับชุดจับไอกรดแล้วทำการย่อยจนได้สารละลายใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร ต่อเข้ากับชุดกลั่นซึ่งมีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 40 ลงไปประมาณ 50 มิลลิลิตร ทำการกลั่นเป็นเวลาประมาณ 3 นาที แล้วรองรับสิ่งที่กลั่นได้ด้วยขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่มีอินดิเคเตอร์ซึ่งประกอบด้วยเมทิลเรด 0.1 กรัม และโบรโมครีซอลกรีน 0.1 กรัม ละลายในเอทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร ประมาณ 3 หยด แล้วนำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นไม่มีสี โดยทำแบบลบล้างควบคู่ไปกับตัวอย่าง

3.4 วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณโปรตีน (ร้อยละ)} = \frac{(T - B) \times N \times 1.401 \times 100 \times 6.25}{W}$$

หมายเหตุ T = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์ (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)

W = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

*ค่าแฟกเตอร์ของโปรตีนเท่ากับ 6.25

ก4. วิธีวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (A.O.A.C., 2000)

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

4.1.1 เตาเผา (muffle furnace)

4.1.2 ถ้วยกระเบื้องเคลือบ (crucible)

4.1.3 เดซิกเคเตอร์ (desiccator)

4.2 วิธีการวิเคราะห์

ทำการเผาถ้วยกระเบื้องเคลือบพร้อมฝา ในเตาเผา muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง นำถ้วยกระเบื้องเคลือบพร้อมฝา มาใส่ในเดซิกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอน ชั่งตัวอย่างแป้งกล้วย 3 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องเคลือบ และนำไปเผาด้วยตะเกียงจนหมดควันจึงนำไปเข้าเตาเผา muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนตัวอย่างเป็นเถ้าสีขาวหรือสีเทา นำถ้วยกระเบื้องเคลือบที่บรรจุตัวอย่างที่ผ่านการเผาพร้อมฝา มาใส่ในเดซิกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและชั่งน้ำหนัก

4.3 วิธีการคำนวณ

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

หมายเหตุ W_1 = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องเคลือบพร้อมด้วยฝาและตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

W_2 = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องเคลือบพร้อมด้วยฝาและตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

W_3 = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

ก5. วิธีวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (ดัดแปลงมาจากวิธีของ Juliano, 1971)

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

5.1.1 ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิตร

5.1.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

5.1.3 อ่างควบคุมอุณหภูมิ

5.2 สารเคมี

5.2.1 แอมิโลสบริสุทธิ์จากสตาร์ชมันฝรั่ง

5.2.2 เอทิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 95

5.2.3 สารละลายเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์

5.2.4 กรดแอซิดิก ความเข้มข้น 1 โมลาร์

5.2.5 สารละลายไอโอดีน

5.3 วิธีการวิเคราะห์

5.3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแอมิโลส ซึ่งแอมิโลสบริสุทธิ์ 0.040 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิตร เติมน้ำเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ปริมาตร 1 มิลลิตร เขย่าเบาๆ เพื่อให้แอมิโลสเกาะผนังขวด เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 9 มิลลิตร ให้ความร้อนกับตัวอย่างในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ จากนั้นทิ้งให้เย็น เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิตร เขย่าให้สารละลายเข้ากันดี

5.3.2 การเตรียมตัวอย่างเตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายมาตรฐานแอมิโลส ยกเว้นแต่ชั่งตัวอย่างหนัก 0.1000 กรัม แทนแอมิโลสบริสุทธิ์

5.3.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง ปิเปตสารละลายจากข้อ 5.3.2 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 มิลลิลิตร ปิเปตกรดแอซิดิก 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และปิเปตสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 20 นาที และสำหรับเบลงค์ (blank) ทำเช่นเดียวกันแต่ไม่ต้องใส่ตัวอย่าง

วัดความเข้มสีโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเบลงค์เท่ากับ 0

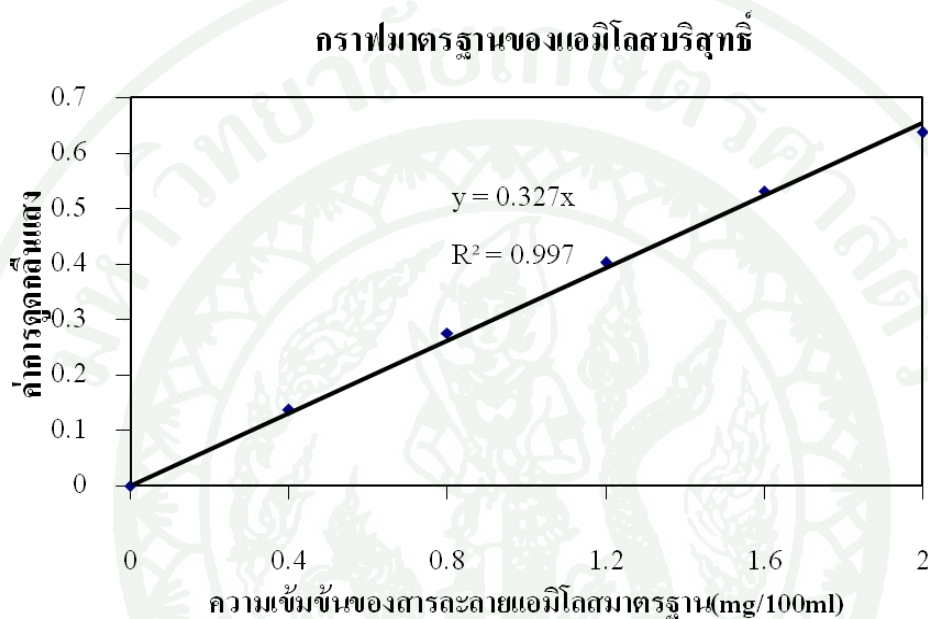
5.3.4 การเตรียมกราฟมาตรฐาน ปิเปตสารละลายมาตรฐานจากข้อ 5.3.1 ปริมาตร 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 70 มิลลิลิตร ปิเปตกรดแอซิดิก 1 โมลาร์ ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแก้วที่มีสารละลายมาตรฐานตามลำดับ และปิเปตสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายเข้ากัน

วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร และเขียนเป็นกราฟระหว่างแอมิโลส (กรัมต่อแป้ง 100 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 8, 16, 24, 31 และ 40) กับค่าดูดกลืนแสง

การเปลี่ยนค่าการดูดกลืนแสงเป็นปริมาณแอมิโลส นำค่าการดูดกลืนแสงที่มีปริมาณตัวอย่าง 0.1000 กรัมของแต่ละตัวอย่าง เทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วเปรียบเทียบค่าเป็นร้อยละของแอมิโลสต่อแป้ง 100 กรัม

5.4 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของปริมาณแอมิโลส} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่อ่านได้จากสารละลายแอมิโลสมาตรฐาน} \times 10}{5 \times \text{น้ำหนักสตาร์ชแห้ง (กรัม)}}$$



ภาพผนวกที่ ก1 ปริมาณแอมิโลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน

ก6. วิธีวิเคราะห์ปริมาณ resistant starch (ด้วยชุดทดสอบ Resistant Starch Assay Procedure (RSTAR 11/02) ของ Megazyme)

6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 6.1.1 อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking water baht)
- 6.1.2 เครื่องหมุนเหวี่ยงขนาดเล็ก (Bench Centrifuge)
- 6.1.3 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- 6.1.4 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

6.2 สารเคมี

6.2.1 สารเคมีที่มีอยู่ในชุด

- ก. Pancreatic α -amylase (Pancreatin, 10g, 3 Ceralpha Units/mg)
- ข. Amyloglucosidase (12 mL, 3300 Units/mL)
- ค. Glucose Determination Reagent (GOPOD) (for 1 litre)
- ง. Glucose Reagent Buffer (concentrate) (50 mL)
- จ. Glucose Standard Solution (1 mg/mL in 0.2% benzoic acid)
- ฉ. Resistant Starch Control (with stated level of RS)

6.2.2 สารเคมีอื่นๆ

- ก. กรดมาเลอิก เพื่อใช้เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมมาลเลอ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่พีเอช 6.0
- ข. กรดแอสติก เพื่อใช้เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมแอสเตอ ความเข้มข้น 1.2 โมลาร์ ที่พีเอช 3.8 และ 100 มิลลิโมลาร์ ที่พีเอช 4.5
- ค. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
- ง. เอทิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 99 โดยปริมาตร เพื่อเตรียม Aqueous IMS ร้อยละ 50 ปริมาตรโดยปริมาตร
- จ. แกลเซียมคลอไรด์
- ฉ. โซเดียมไฮดรอกไซด์
- ช. กรดไฮโดรคลอริก
- ซ. โซเดียมเอไซด์
- ฌ. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนอโทฟอสเฟต
- ญ. กรดเตตระไฮดรอกซีเบนโซอิก

6.3 วิธีการเตรียมสารเคมี

6.3.1 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมมาลิเอท ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ที่พีเอช 6.0

ละลายกรดมาเลอิก 23.2 กรัม ในน้ำกลั่น 1,600 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้เป็น 6.0 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลาร์ จากนั้นจึงเติมแคลเซียมคลอไรด์ ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 6 กรัม และโซเดียม-เอไซด์ 0.4 กรัม ปรับปริมาตรให้เป็น 2 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น (สามารถเก็บที่ 4 องศาเซลเซียสได้ 12 เดือน)

6.3.2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมแอซิเตท ความเข้มข้น 1.2 โมลาร์

ที่พีเอช 3.8

เติมกรดแอซติก 69.6 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้เป็น 3.8 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลาร์ จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น (สามารถเก็บที่อุณหภูมิห้องได้ 12 เดือน)

6.3.3 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมแอซิเตท ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์

ที่พีเอช 4.5

เติมกรดแอซติก 5.8 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 900 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้เป็น 4.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลาร์ จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น (สามารถเก็บที่ 4 องศาเซลเซียสได้ 12 เดือน)

6.3.4 การเตรียม Aqueous IMS ร้อยละ 50 ปริมาตรโดยปริมาตร

เจือจางเอธานอล 500 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น 1 ลิตร

6.3.5 การเตรียมสารละลายเจือจาง Amyloglucosidase ความเข้มข้น 300 U/mL

เจือจางสารละลาย Amyloglucosidase (AMG) เข้มข้น 2 มิลลิลิตร ลงในสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมมาลิเอท ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (ข้อ 6.3.1) 22 มิลลิลิตร (สามารถเก็บที่ -20 องศาเซลเซียสได้ 5 ปี)

หมายเหตุ : แบ่งใส่หลอดๆละ 5 มิลลิลิตร และเก็บแช่แข็งใน polypropylene container ในระหว่างการใส่

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

ละลาย Pancreatic α -amylase 1 กรัม ลงในสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมมาลิเอท ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (ข้อ 6.3.1) 100 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายเจือจาง Amyloglucosidase ความเข้มข้น 300 U/ml (ข้อ 6.3.5) 1 มิลลิลิตร และผสมให้เข้ากันดี เหยี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 1,500g เป็นเวลา 10 นาที

หมายเหตุ : ระวังในส่วนของตะกอนและสารละลายใส สารละลายควรใช้ในวันที่เตรียม

6.3.7 Glucose oxidase-peroxidase-aminoantipyrine reagent (GOPOD)

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

6.3.8 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้น

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

6.4 วิธีการวิเคราะห์

6.4.1 กระบวนการย่อยและละลายส่วนที่เป็น Non-resistant starch

ชั่งตัวอย่าง 0.01 กรัม ลงในหลอดแก้วที่มีฝาปิดสนิท เติม Pancreatic α -amylase (10mg/ml) plus AMG (3 U/mL) (ข้อ 6.3.6) ลงในแต่ละหลอด 4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ทำการบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เติมเอทานอล ร้อยละ 99 ลงในแต่ละหลอด 4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 1,500g (3,000 rpm) เป็นเวลา 10

นาที่ เทส่วนใส่ออกและละลายตะกอนด้วย Aqueous IMS ร้อยละ 50 ปริมาตรโดยปริมาตร (ข้อ 6.3.4) 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เติม Aqueous IMS ร้อยละ 50 ปริมาตรโดยปริมาตร (ข้อ 6.3.4) อีก 6 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 1,500g (3,000 rpm) เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใส่ออก ทำซ้ำอีก 1 ครั้ง และใช้กระดาษซับน้ำส่วนเกินออก

6.4.2 กระบวนการหาปริมาณ resistant starch

นำตัวอย่างจากข้อ 6.4.1 มาใส่แท่งแม่เหล็ก (ขนาด 4×12 มิลลิเมตร) และเติม โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 มิลลิลิตร เข้มข้น 2 โมลาร์ ลงในแต่ละหลอด กวนสารในหลอด ในอ่าง น้ำแข็งบนเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก เป็นเวลา 20 นาที เติมสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมแอซิเตท ความ เข้มข้น 1.2 โมลาร์ ที่พีเอช 3.8 (ข้อ 6.3.2) ลงในแต่ละหลอด 8 มิลลิลิตร เติมสาร AMG (3300 Units/ml) 0.1 มิลลิลิตร ลงในแต่ละหลอด ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ทันที เป็นเวลา 30 นาที (เขย่าเป็นช่วงๆ)

ก. สำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณ resistant starch มากกว่าร้อยละ 10

ทำการเจือจางตัวอย่างโดยใช้ขูดน้ำกลั่นค่อยๆ ไล่สารที่อยู่ในหลอดมาไว้ใน ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรจนเป็น 100 มิลลิลิตร

หมายเหตุ สำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณ resistant starch น้อยกว่าร้อยละ 10 ไม่ต้อง เจือจางตัวอย่าง

นำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 1,500g (3,000 rpm) เป็นเวลา 10 นาที ดูด ของเหลว 0.1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติม GOPOD (ข้อ 6.3.7) ปริมาตร 3 มิลลิลิตรลงในแต่ละหลอด ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสทันที เป็นเวลา 20 นาที

วัดความเข้มสีโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร โดยปรับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแบลนด์เท่ากับ 0

หมายเหตุ การเตรียมสารละลายแบลนด์ เตรียมโดยการนำสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียม-แอซิเตท ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ที่พีเอช 4.5 (ข้อ 6.3.3) 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD (ข้อ 6.3.7)

ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 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)

ก7. วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการละลายในน้ำเย็น (ดัดแปลงจากวิธีของ Jane and Seib, 1991)

7.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

7.1.1 เครื่องหมุนเหวี่ยงขนาดเล็ก (Bench Centrifuge)

7.1.2 เครื่องปั่น (blender)

7.1.3 ตู้อบลมร้อน (hot air oven)

7.1.4 ภาชนะใส่ตัวอย่าง (glass plate)

7.1.5 เดซิเคเตอร์ (desiccator)

7.2 วิธีการวิเคราะห์

ทดสอบความสามารถในการละลายในน้ำเย็น โดยค่อยๆ ละลายตัวอย่าง 1 กรัม ลงในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร นำไปปั่นด้วยเครื่องปั่น (blender) 2 นาที และใส่ลงในหลอด centrifuge นำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงขนาดเล็ก ที่สภาวะ 1,200 g ประมาณ 15 นาที จากนั้นดูดของเหลวด้านบน 25 มิลลิลิตร เพื่อ

นำไปอบหาน้ำหนัก ชั่งน้ำหนักและคำนวณหาความสามารถในการละลายในน้ำเย็น (Cold Water Solubility : CWS)

7.3 วิธีการคำนวณ

$$\text{ความสามารถในการละลายในน้ำเย็น (\%)} = \frac{(W_3 - W_2) \times 4 \times 100}{W_1}$$

หมายเหตุ W_1 = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

W_2 = น้ำหนักภาชนะก่อนอบ (กรัม)

W_3 = น้ำหนักภาชนะหลังอบ (กรัม)

ก8. การตรวจสอบลักษณะรูปร่างของ แป้ง และสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

8.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

8.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-6480LV, JEOL, Japan)

8.1.2 แท่น aluminium stub

8.1.3 เทปกาวคาร์บอนสองหน้า

8.1.4 เครื่องเคลือบทอง (SPI module sputter-coater)

8.2 วิธีการวิเคราะห์

ติดเทปกาวคาร์บอนหนึ่งด้านบน aluminium stub นำตัวอย่างที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วติดลงบนเทปกาวคาร์บอนลงบนด้านที่เหลือ จากนั้นนำ aluminium stub ที่ผ่านการติดตัวอย่างแล้วเข้าเครื่องเคลือบทอง เพื่อเคลือบทองลงบนผิวหน้าของตัวอย่าง สำหรับช่วยนำประจุอิเล็กตรอน วางแท่น aluminium stub ที่ผ่านการเคลือบทองแล้วใส่ลงในช่องใส่ aluminium stub ภายในตัวกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ตรวจสอบลักษณะรูปร่างตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยควบคุมอัตราเร่งความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยายที่ 500 ถึง 2,500 เท่า คัดเลือกภาพบริเวณที่ต้องการ ปรับโฟกัสให้ชัดเจนแล้วจึงทำการบันทึกภาพ

8.3 สถานที่วิเคราะห์

ฝ่ายบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก9. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งและสตาร์ช

9.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

9.1.1 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (JDX-3530, JEOL, Japan)

9.1.2 สไลด์หลุมสำหรับบรรจุตัวอย่าง

9.2 วิธีการวิเคราะห์

บรรจุตัวอย่างแป้งและสตาร์ชลงในสไลด์หลุมสำหรับบรรจุตัวอย่าง โดยเกลี่ยตัวอย่างให้แน่น และผิวหน้าเรียบเนียน วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้งและสตาร์ช ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ โดยกำหนดสภาวะการทดลองคือ แหล่งกำเนิดรังสีเป็นทองแดง ($\text{CuK}\alpha$) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ เริ่มสแกนที่มุมหักเหช่วง 3 ถึง 40 องศา ด้วยอัตราเร็วในการเปลี่ยนองศา 0.02 องศาต่อวินาที ทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม JADE 6 (Materials Data Inc., Livermore, CA.) บันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้และคำนวณค่าร้อยละของความเป็นผลึก โดยเปรียบเทียบ (Relative crystallinity)

9.3 วิธีการคำนวณ (Shujun *et al.*, 2005)

$$\text{ค่าร้อยละความเป็นผลึก} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีค}}{\text{พื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม}} \times 100$$

คำนวณพื้นที่โดยใช้โปรแกรม JADE 6 (Materials Data Inc., Livermore, CA.)

9.4 สถานที่วิเคราะห์

ห้องปฏิบัติการเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

ก10. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด (ไพลาภา, 2550)

10.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

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

10.1.2 ถ้วยอลูมิเนียมสำหรับตัวอย่างและใบพัดของเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว

10.2 วิธีการวิเคราะห์

ชั่งตัวอย่างจำนวน 2.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) จากนั้นชั่งน้ำหรือสารละลายเพิ่มจนน้ำหนักรวมของตัวอย่างครบ 28 กรัม ใส่ลงในถ้วยอลูมิเนียมของเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว ใส่ตัวอย่างที่ได้ชั่งไว้ลงในน้ำหรือสารละลาย ใช้ใบพายคนโดยยกใบพายขึ้นลงและคนไปมาประมาณ 10 ครั้ง จนกระทั่งตัวอย่างกระจายในสารละลายอย่างทั่วถึง ใส่ใบพายลงในถ้วยอลูมิเนียมและสวมใบพายเข้ากับที่ยึดของเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว โดยให้ตำแหน่งใบพายอยู่กึ่งกลางถ้วย แล้วจึงกดมอเตอร์ของเครื่องลง

ตารางผนวกที่ ก1 สภาวะที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลา

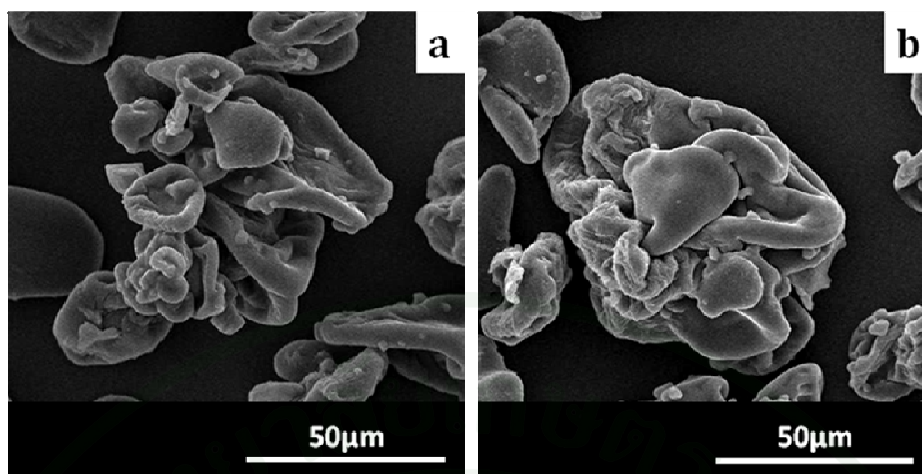
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที:วินาที)
50.0 (อุณหภูมิเริ่มต้น)	0:00
50.0	1:00
95.0	5:00
95.0	10:00
50.0	14:00
สิ้นสุดการทดสอบ	20:00

หมายเหตุ สำหรับความเร็วรอบเริ่มต้นที่ใช้คือ 960 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที แล้วจึงใช้ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที จนถึงตลอดการทดสอบ

บันทึกอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลงหรือค่าเบรกดาวน์ (breakdown) คือ ค่าความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด และค่าเซตแบค (setback) คือ ค่าความแตกต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด

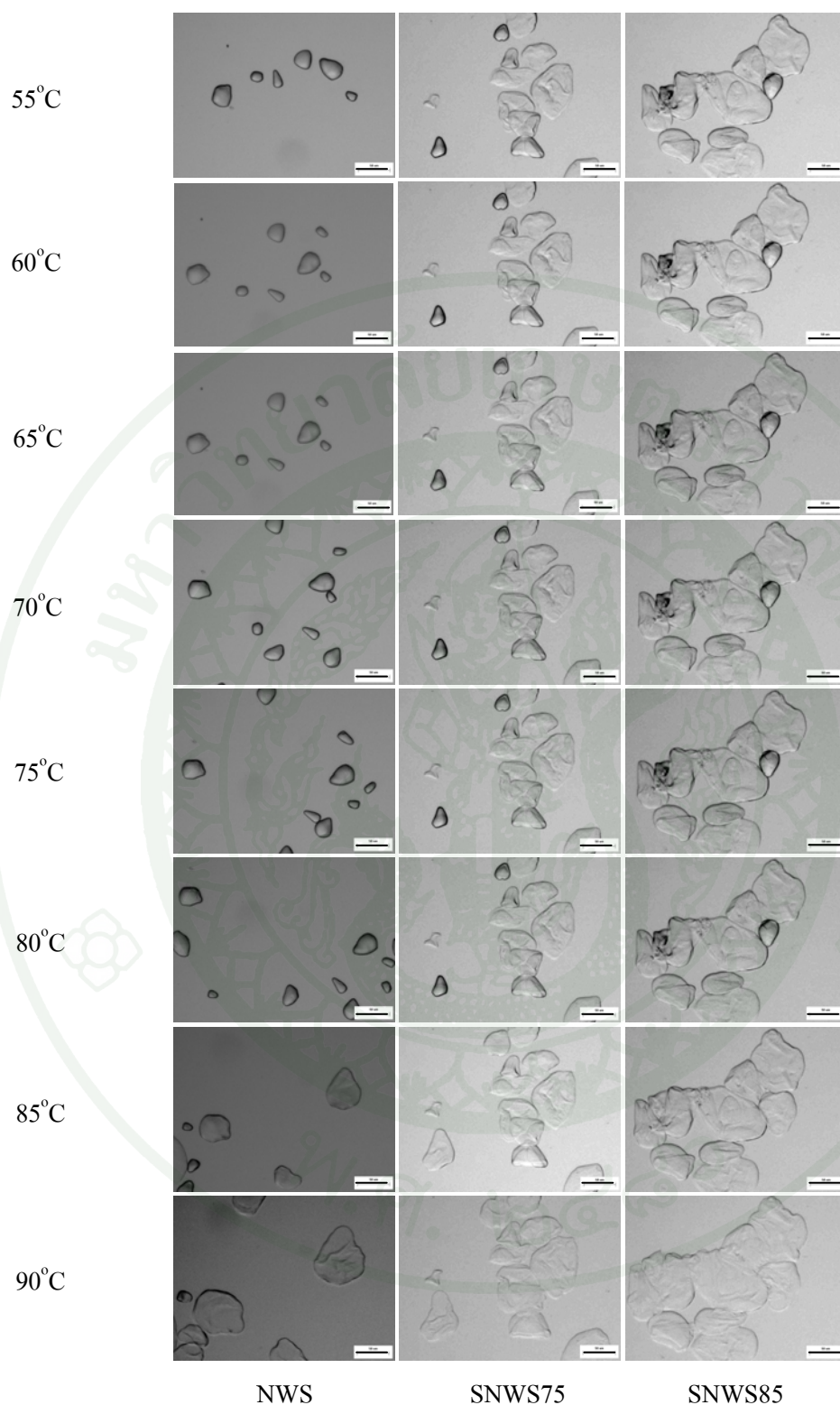






ภาพผนวกที่ ข1 ลักษณะด้านสัณฐานวิทยาของแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร a) SNWF75 และ b) SNWF85 เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500 เท่า





ภาพผนวกที่ ๑1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะด้านสัณฐานวิทยาของสตาร์ชเกรนูล เมื่อให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ของสตาร์ชกล้วยน้ำว้าธรรมชาติและสตาร์ชกล้วยน้ำว้าดัดแปร SNWS (scale bar = 50µm)



ตารางผนวกที่ ๑1 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติและแป้งกล้วยน้ำว้าดัดแปร

Sample	Pasting Temp (°C)	Viscosity (cP)				
		Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback
NWF	78.08 ^c ± 0.39	3,360.50 ^d ± 19.09	2,081.00 ^d ± 5.66	1,279.50 ^c ± 24.75	3,309.00 ^f ± 49.50	1,228 ^d ± 55.15
DNWF0.15	50.05 ^b ± 0.07	1,472.00 ^a ± 79.20	994.00 ^a ± 8.48	478.00 ^b ± 87.68	1,523.50 ^a ± 19.09	529.50 ^a ± 27.58
DNWF0.25	49.38 ^a ± 0.18	1,651.00 ^b ± 4.24	1,125.00 ^b ± 9.90	526.00 ^b ± 14.14	1,915.00 ^b ± 24.04	790.00 ^b ± 33.94
DNWF0.35	49.32 ^a ± 0.04	1,751.00 ^b ± 72.12	1,232.00 ^c ± 39.60	519.00 ^b ± 32.53	2,014.00 ^c ± 8.48	782.00 ^b ± 31.11
SNWF65	80.68 ^d ± 0.04	2,207.00 ^c ± 0.00	2,049.00 ^d ± 14.14	158.00 ^a ± 14.14	2,958.50 ^e ± 3.54	909.50 ^c ± 17.68
SNWF75	84.50 ^e ± 0.00	N/A	N/A	N/A	2,246.50 ^d ± 65.76	N/A
SNWF85	86.72 ^f ± 0.04	N/A	N/A	N/A	1,602.00 ^a ± 65.05	N/A

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

N/A (not available) คือ ไม่ปรากฏค่า



ภาคผนวก จ
อิทธิพลของส่วนประกอบอาหารต่อสมบัติด้านความหนืด
ของแป้งกล้วยน้ำว้า

ตารางผนวกที่ จ1 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ เมื่อเติมน้ำตาลซูโครสในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน

Sample	Pasting Temp (°C)	Peak Time (min)	Viscosity (cP)				
			Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback
NWF	78.08 ^c ± 0.39	5.00 ^a ± 0.00	3,360.50 ^c ± 19.09	2,081.00 ^c ± 5.66	1,279.50 ^c ± 24.75	3,309.00 ^c ± 49.50	1,228.00 ^c ± 55.15
NWF + 5%Sucrose	80.68 ^b ± 0.04	5.40 ^b ± 0.10	2,377.50 ^a ± 0.71	1,838.50 ^a ± 37.48	539.00 ^b ± 38.18	2,835.00 ^b ± 15.56	996.50 ^b ± 21.92
NWF + 10%Sucrose	82.92 ^c ± 0.04	5.50 ^b ± 0.04	2,431.00 ^b ± 1.41	1,890.00 ^{ab} ± 26.87	541.00 ^b ± 28.28	2,887.00 ^b ± 11.31	997.00 ^b ± 15.16
NWF + 20%Sucrose	86.50 ^d ± 0.00	6.20 ^c ± 0.00	2,364.00 ^a ± 12.73	1,933.00 ^b ± 39.60	431.00 ^a ± 26.87	2,804.50 ^a ± 17.68	771.50 ^a ± 21.92

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ จ2 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปรร DNWF เมื่อเติมน้ำตาลซูโครสในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน

Sample	Pasting Temp (°C) ^{ns}	Peak Time (min)	Viscosity (cP)				
			Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback ^{ns}
DNWF0.35	49.32 ± 0.04	4.87 ^a ± 0.28	1,751.00 ^c ± 72.12	1,232.00 ^c ± 39.60	519.00 ^b ± 32.53	2,014.00 ^c ± 8.48	782.00 ± 31.11
DNWF0.35 + 5%Sucrose	50.55 ± 0.64	6.96 ^b ± 0.05	1,174.50 ^b ± 50.20	1,135.00 ^b ± 35.36	39.50 ^a ± 14.85	1,871.00 ^b ± 8.48	736.00 ± 26.87
DNWF0.35 + 10%Sucrose	49.85 ± 0.92	6.96 ^b ± 0.05	1,110.50 ^b ± 44.55	1,081.00 ^b ± 26.87	29.50 ^a ± 17.68	1,794.00 ^b ± 65.05	713.00 ± 38.18
DNWF0.35 + 20%Sucrose	50.05 ± 0.07	6.94 ^b ± 0.09	965.00 ^a ± 8.48	935.50 ^a ± 3.54	29.50 ^a ± 4.95	1,671.00 ^a ± 15.56	735.50 ± 12.02

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๑3 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปรร SNWF เมื่อเติมน้ำตาลซูโครสในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน

Sample	Pasting Temp (°C)	Peak Time (min)	Viscosity (cP)				
			Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback
SNWF85	86.72 ^a ± 0.04	N/A	N/A	N/A	N/A	1,602.00 ^d ± 65.05	N/A
SNWF85 + 5%Sucrose	87.38 ^a ± 1.10	N/A	N/A	N/A	N/A	1,366.00 ^c ± 14.14	N/A
SNWF85 + 10%Sucrose	88.18 ^a ± 0.04	N/A	N/A	N/A	N/A	1,212.00 ^b ± 19.80	N/A
SNWF85 + 20%Sucrose	90.42 ^b ± 1.17	N/A	N/A	N/A	N/A	866.50 ^a ± 9.19	N/A

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

N/A (not available) คือ ไม่ปรากฏค่า

ตารางผนวกที่ ๑4 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าธรรมชาติ เมื่อเติมเกลือ โซเดียมคลอไรด์ในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน

Sample	Pasting Temp (°C)	Peak Time (min)	Viscosity (cP)				
			Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback
NWF	78.08 ^a ± 0.39	5.00 ^a ± 0.00	3,360.50 ^c ± 19.09	2,081.00 ^d ± 5.66	1,279.50 ^d ± 24.75	3,309.00 ^c ± 49.50	1,228.00 ^d ± 55.15
NWF + 5%NaCl	84.42 ^c ± 0.04	6.16 ^b ± 0.05	1,863.00 ^b ± 21.21	1,482.50 ^a ± 7.78	380.50 ^c ± 13.44	2,071.50 ^b ± 23.33	589.00 ^c ± 15.56
NWF + 10%NaCl	86.65 ^d ± 0.00	6.84 ^c ± 0.05	1,753.50 ^a ± 26.16	1,567.00 ^b ± 16.26	186.00 ^b ± 9.90	1,919.50 ^a ± 19.09	352.00 ^a ± 2.83
NWF + 20%NaCl	81.08 ^b ± 0.53	6.96 ^d ± 0.05	1,746.50 ^a ± 3.54	1,607.00 ^c ± 2.83	139.50 ^a ± 0.71	2,089.50 ^b ± 1.41	483.00 ^b ± 0.00

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๑5 สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปรร DNWF เมื่อเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน

Sample	Pasting Temp (°C) ^{ns}	Peak Time (min)	Viscosity (cP)				
			Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback
DNWF0.35	49.32 ± 0.04	4.87 ± 0.28	1,751.00 ± 72.12	1,232.00 ± 39.60	519.00 ± 32.53	2,014.00 ^c ± 8.48	782.00 ± 31.11
DNWF0.35 + 5%NaCl	50.32 ± 0.95	N/A	N/A	N/A	N/A	433.50 ^b ± 16.26	N/A
DNWF0.35 + 10%NaCl	51.10 ± 0.14	N/A	N/A	N/A	N/A	354.50 ^a ± 12.02	N/A
DNWF0.35 + 20%NaCl	50.15 ± 1.63	N/A	N/A	N/A	N/A	452.50 ^b ± 0.71	N/A

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

N/A (not available) คือ ไม่ปรากฏค่า

ตารางผนวกที่ ๑๖ สมบัติการเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยน้ำว้าตัดแปรร SNWF เมื่อเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน

Sample	Pasting Temp (°C)	Peak Time (min)	Viscosity (cP)				
			Peak	Trough	Breakdown	Final	Setback
SNWF85	86.72 ^a ± 0.04	N/A	N/A	N/A	N/A	1,602.00 ^d ± 65.05	N/A
SNWF85 + 5%NaCl	88.15 ^b ± 0.00	N/A	N/A	N/A	N/A	1,366.00 ^c ± 14.14	N/A
SNWF85 + 10%NaCl	89.32 ^c ± 0.46	N/A	N/A	N/A	N/A	1,212.00 ^b ± 19.80	N/A
SNWF85 + 20%NaCl	91.25 ^d ± 0.00	N/A	N/A	N/A	N/A	866.50 ^a ± 9.19	N/A

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

N/A (not available) คือ ไม่ปรากฏค่า

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวปัญญรัตน์ ไศภิชฐ์ประภา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	22 พฤษภาคม 2527
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท. บ. (เทคโนโลยีชีวภาพ) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพมหานคร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนโครงการจัดตั้งหน่วยปฏิบัติการวิจัยชีวชาญเฉพาะ ด้านข้าวและคาร์โบไฮเดรต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร