



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์การอาหาร

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งด้วยสตาร์ชมันสำปะหลังและ
แป้งข้าวเหนียว

Improving Quality of Frozen Rice Starch Gels Using Tapioca Starch and
Waxy Rice Flour

نامผู้วิจัย นางสาวณัฐสุดา ปรีชาธรรมวงศ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์อรอนงค์ นัยวิกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะบุญย์ สัจจานันตกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งด้วยสตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว

Improving Quality of Frozen Rice Starch Gels Using Tapioca Starch and Waxy Rice Flour

โดย

นางสาวณัฐสุดา ปรีชาธรรมวงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

พ.ศ. 2552

ณัฐสุดา ปรีชาธรรมวงศ์ 2552: การปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งด้วยสตาร์ช
มันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)
สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D. 102 หน้า

การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งที่มี
สตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักเสื่อมคุณภาพ ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยทั่วไปมักใช้ไฮโดรคอลลอยด์หรือ
สตาร์ชดัดแปรเพื่อลดการเกิดรีโทรเกรเดชัน อย่างไรก็ตามไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช่มักมีราคาแพง และผู้บริโภคบาง
กลุ่มไม่ยอมรับการใช้สตาร์ชดัดแปรเนื่องจากเกรงอันตรายจากสารเคมีที่ใช้ดัดแปร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมี
วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวซึ่งเป็นสารพอลิ-
แซ็กคาไรด์ของไทยมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็ง ในการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษา
ผลของการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวต่อความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลสตาร์ช
ข้าวเจ้า พบว่าการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวสามารถลดการแยกออกของน้ำได้ ในการคืนรูป
จากเยือกแข็งรอบที่ 1 เมื่อมีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวในระบบเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการแยก
ออกของน้ำจะมีค่าลดลง การเติมแป้งข้าวเหนียวสามารถลดการแยกออกของน้ำได้ดีกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง
ในทางตรงกันข้ามพบว่าการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 2-5 การเติมสตาร์ช มันสำปะหลังจะมีค่าความคงตัวสูง
กว่าการเติมแป้งข้าวเหนียว ซึ่งค่าการแยกออกของน้ำมีความสอดคล้องกับโครงสร้างระดับจุลภาคของเจล
สตาร์ช การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาผลของการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวและอัตราการใช้
เยือกแข็งต่อระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่าเจลสตาร์ชที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ผ่าน
การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเร็ว มีค่าการแยกออกของน้ำลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บ
รักษา เมื่อมีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวในระบบเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำจะมี
ค่าลดลง จากผลการทดลองพบว่าอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถลดการเกิดการแยกออกของน้ำได้ดีกว่า
อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า และการเติมแป้งข้าวเหนียวมีประสิทธิภาพในการลดการแยกออกของน้ำได้ดีกว่า
การเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง ค่าการแยกออกของน้ำนี้สอดคล้องกับโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ช เมื่อ
พิจารณาค่าความหนืดสุดท้ายของระบบพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ ในด้าน
เนื้อสัมผัสพบว่า การเติมสตาร์ชมันสำปะหลังลงในระบบของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งกลับทำให้เจล
สตาร์ชมีค่าความแข็งสูงขึ้นตามระดับการเติม ตรงกันข้ามกับการเติมแป้งข้าวเหนียว ซึ่งทำให้ค่าความแข็ง
น้อยลงตามระดับการเติมและมีค่าความแข็งน้อยกว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้า เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองพบว่า
สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็ง คือ เจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่
เติมแป้งข้าวเหนียวระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 และใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

Nutsuda Preechathamwong 2009: Improving Quality of Frozen Rice Starch Gels Using Tapioca Starch and Waxy Rice Flour. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Associate Professor Sanguansri Charoenrein, Ph.D. 102 pages.

Retrogradation of starch during frozen storage is one of the major reasons for the deterioration of frozen starch based products. Starch retrogradation can be retarded by adding hydrocolloids or modified starch. However, the cost of hydrocolloids is very expensive and most of consumers do not like to consume modified starches due to the safety aspect. Therefore, we attempted to use native tapioca starch (TS) and native waxy rice flour (WF) to retard retrogradation of frozen rice starch gel. In the first experiment, the effect of TS or WF addition on freeze–thaw stability was investigated. The result showed that in the first freeze-thaw cycle, TS or WF addition had effectively reduced syneresis of frozen rice starch gel. The percentage of syneresis gradually decreased with increasing TS or WF addition. WF addition showed more effective in reduction of syneresis in first freeze–thaw cycle than TS addition. On the contrary, in the second to fifth cycles, TS addition improved freeze-thaw stability of frozen rice starch gel better than WF addition. The results of % syneresis corresponded to gel microstructure. In the second experiment, frozen rice starch gels with and without TS and WF addition were stored for 0, 10, 20, 40 and 60 days at -18°C. We found that starch gels with TS or WF addition, which were frozen with slow and fast freezing rate, showed effectively reduce syneresis at all storage time. The percentage of syneresis decreased with increasing TS or WF addition. However, fast freezing rate was more effective in reducing syneresis than slow freezing rate. In addition, WF was a more effective ingredient for the reduction of syneresis than TS. We also found that the final viscosity of starch systems as determined by rapid visco analyzer increased with increasing TS or WF addition. There was a good linear relationship between final viscosity and % syneresis, which also corresponded to gel microstructure. Hardness of mixed starch gels after storage 0, 10 and 20 days was also investigated. The results showed that the hardness of mixed gels decreased with increasing addition of WF. On the contrary, the hardness of mixed gel increased with increasing addition of TS. Hardness of rice starch gels with 2%WF and fast freezing was similar to that of fresh rice starch gel. It is concluded that the best condition to most effectively stabilize rice starch gels was adding 2%WF with fast freezing.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สงวนศรี เจริญเหรียญ ที่ได้ให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และกรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น แนวทางในการแก้ไขปัญหา ความเอาใจใส่และความเมตตา ตลอดจนการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุดสาย ตีรวานิช ประธานควบคุมการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และ ผศ.ดร.รมณี สงวนดีกุล ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำเพิ่มเติมและช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่เมตตาอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ และการช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณรุ่นพี่นิสิตปริญญาโทและเอกภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารที่ได้ให้คำแนะนำ รวมถึงความช่วยเหลือต่างๆ และเป็นกำลังใจในการศึกษาและทำวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณพี่ชั้นยุบรุณ ธีรณารด และพี่ทิพย์ธิดา แก้วดาทิพย์ ที่ได้สอนเทคนิคและวิธีการทำวิจัย รวมถึงคำแนะนำที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (สวพ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่กรุณามอบทุนอุดหนุนวิจัย เพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การอบรมสั่งสอนเลี้ยงดู รวมถึงให้การศึกษาค้ำพองตั้งแต่ยังเยาว์วัย และส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ตลอดจนการสนับสนุนด้านกำลังใจทรัพย์และกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด ขอขอบคุณคุณปู่ น้าชาย รวมถึงผู้มีพระคุณที่มีได้เอื้อนามไว้ ณ ที่นี้ทุกท่าน สำหรับกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

ณัฐสุดา ปรีชาธรรมวงศ์

เมษายน 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	71
สรุป	71
ข้อเสนอแนะ	73
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	74
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบ	86
ภาคผนวก ข แผนภาพการแช่เยือกแข็ง	97
ภาคผนวก ค กราฟและผลการทดลอง	99
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว, สตาร์ชมันสำปะหลัง และแป้งข้าว-เหนียว	42
2	ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย เซตแบคและอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดวิกฤติ	45
3	ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ในการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1-5 ของเจลสตาร์ชที่เตรียมระบบแบบอัตราส่วนและแบบการเติม	46
4	ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ ในการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1-5 ของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (RS) ที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง (TS) หรือแป้งข้าวเหนียว (WF) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า	51
5	ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (RS) ที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง (TS) หรือแป้งข้าวเหนียว (WF) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0, 10, 20, 40 และ 60 วัน	55
6	ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (RS) ที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง (TS) หรือแป้งข้าวเหนียว (WF) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0, 10, 20, 40 และ 60 วัน	56
7	ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าว (RS) ที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง (TS) หรือแป้งข้าวเหนียว (WF) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ก่อนการแช่เยือกแข็ง	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
8	ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นระยะเวลา 0-60 วัน	65
9	ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นระยะเวลา 0-60 วัน	66
10	ปริมาณแอมิโลส-แอมิโลเพกทินในระบบของเจลสตาร์ช ซึ่งได้จากการคำนวณ	67
ตารางผนวกที่		
ก1	สรุปการใช้สัดส่วนแอมิโลส-แอมิโลเพกทิน (100-0,0-100) สำหรับวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส	90
ค1	ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย เซตแบคและอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด ของระบบซัสเพนชันสตาร์ชข้าว (rice starch suspension) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) และเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง)	101

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 รูปร่างของแอมิโลส	6
2 โครงสร้างของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน	7
3 ลักษณะโครงสร้างแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C	8
4 ลักษณะการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายสตาร์ช เมื่อได้รับความร้อนจนถึงจุดสูงสุดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้	16
5 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer	17
6 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชเมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลใน-เซชัน	18
7 การเกิดเจลในเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชัน	20
8 โครงสร้างการเกิดเจลเนื้อผสมแบบที่ 1	22
9 โครงสร้างการเกิดเจลเนื้อผสมแบบที่ 2	23
10 แผนภาพแสดงขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง	25
11 แผนภาพสภาวะการเปลี่ยนแปลงในระบบแช่เยือกแข็ง	26
12 กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเชิงเส้น	28
13 ค่าแฟกเตอร์การพองตัวของสตาร์ชและแป้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ	44
14 โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชที่มีอัตราส่วนระหว่างสตาร์ชข้าวเจ้าต่อแป้งข้าวเหนียวเป็น 6:2 (ข้าว) และเจลสตาร์ชข้าวที่มีการเติมแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 (ข้าว) ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า และคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (250x, Bar = 250 μm)	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลดสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนแช่เยือกแข็ง และเจลดสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า และคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 และ 5 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (250x, Bar = 250 μm)	53
16	แผนภาพค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของระบบซัสเพนชันสตาร์ชข้าว (rice starch suspension) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) และเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง)	58
17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) กับค่าร้อยละการแยกออกของน้ำของเจลดสตาร์ชที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งความเหนียวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเร็วและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ นาน 20 วัน	59
18	โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลดสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนแช่เยือกแข็ง และเจลดสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเร็ว และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ นาน 20 วัน จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (250x, Bar = 250 μm)	61
19	ลักษณะการเกิดผลึกน้ำแข็งและการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลดสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว	62
20	ค่าความแข็งของเจลดสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนการแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับเจลดสตาร์ชที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ นาน 20 วัน	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
21	เปรียบเทียบค่าร้อยละการแยกออกของน้ำและค่าความแข็งของเจลสตาร์ชผสมคอนซัลกูโคแมนแนน (KGM) ร้อยละ 0.5 กับเจลสตาร์ชที่เติมแป้งข้าวเหนียว (WF) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยทั้งสองตัวอย่างผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ นาน 10 วันอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ นาน 10 วัน	69
ภาพผนวกที่		
ก1	ปริมาณแอมิโลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน	91
ข1	แผนภาพการแช่เยือกแข็งของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (0.49°ซ/นาท)	98
ข2	แผนภาพการแช่เยือกแข็งของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (3.7°ซ/นาท)	98
ค1	กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดจากการวิเคราะห์สัณฐานด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว	100
ค2	กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็วของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2	100

การปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งด้วยสตาร์ชมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียว

Improving Quality of Frozen Rice Starch Gels Using Tapioca Starch and Waxy Rice Flour

คำนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ทำให้อุตสาหกรรมอาหารแช่เยือกแข็งมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะอาหารพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็ง (ready-to-eat food) จะมีสัดส่วนในตลาดอาหารแช่เยือกแข็งสูง (ไพบูลย์, 2532; รุ่งนภา, 2535; วิไล, 2546 และสายสนม, 2546) รวมถึงผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็งจำพวกขนมหวานไทย (frozen desserts) พบว่ามีอัตราการขยายตัวสูงมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากวิถีชีวิตที่เร่งรีบของคนในปัจจุบันที่ต้องการความสะดวกและรวดเร็ว และอาจรวมถึงการยอมรับในคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งพร้อมบริโภคที่สูงขึ้นด้วย

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้ประเทศปีละไม่ต่ำกว่า 65,000 ล้านบาทและเป็นอาหารหลักประจำวันของคนไทยกว่า 60 ล้านคน นอกจากบริโภคข้าวโดยตรงแล้วยังมีการนำข้าวมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลายชนิด รวมถึงแป้งข้าวเจ้า (rice flour) ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารหลายชนิด เช่น เส้นก๋วยเตี๋ยว ประเภทต่างๆ ขนมไทย ผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็ง เป็นต้น ในปัจจุบันได้มีการนำแป้งข้าวเจ้า มาใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งจำพวกขนมหวาน เพื่อทำให้มีความข้นหนืดและเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น

กระบวนการถนอมอาหารด้วยการแช่เยือกแข็งสามารถช่วยคงคุณค่าทางอาหาร รักษากลิ่นรส และสีของผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะสิ่งสำคัญสองประการคือ การใช้อุณหภูมิต่ำ และการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ทำให้ปริมาณวอเตอร์แอกทิวิตี (water activity) ลดลง ทำให้ปฏิกิริยาต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหารลดลงด้วย สำหรับในระบบของอาหารแช่เยือกแข็งที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบนั้น เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (texture) ที่แข็งขึ้นของผลิตภัณฑ์ ซึ่งกระทบต่อการยอมรับของผู้บริโภค การ

เปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสดังกล่าว คือ การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของเจลสตาร์ช ทำให้เกิดโครงสร้างฟองน้ำ (spongy structure) และการแยกตัวของน้ำ (syneresis) ในระบบของขนมหวานที่ใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ลอดช่อง ขนมเปียกปูน ขนมกล้วยนั้น เจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่ใช้จัดเป็นสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีปริมาณแอมิโลสในระดับปานกลางถึงสูง และปัญหาสำคัญที่มักเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็งคือ ในระหว่างการเก็บรักษาและนำมาคืนรูปจากเยือกแข็ง (thawing) จะเกิดการแยกตัวของน้ำ (syneresis), เกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช และเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของอาหาร โดยเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำขึ้น เป็นเหตุให้อาหารแช่เยือกแข็งเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพ (Lee *et al.*, 2002; Ferrero and Zaritzky, 2000; Rahman, 1999) ซึ่งทำให้เกิดเนื้อสัมผัสที่ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

โดยทั่วไปแล้วการลดปัญหาการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหารพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็งที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นองค์ประกอบหลักดังกล่าวข้างต้น มักนำสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ซึ่งจัดเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็ง เช่น คอนยัคกลูโคแมนแนน ซึ่งอรรณและสงวนศรี (2549) และ Arunyanart and Charoenrein (2008b) พบว่าการเติม คอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถลดการเกิดโครงสร้างฟองน้ำ การแยกของน้ำ ระหว่างการเก็บรักษาเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งได้ แต่สารไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้มักมีราคาแพง และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นหากมีการนำสารพอลิแซ็กคาไรด์ของไทยที่มีราคาถูกและสามารถผลิตได้ภายในประเทศมาใช้ทดแทนสารไฮโดรคอลลอยด์จากต่างประเทศ จะทำให้อลดต้นทุนการผลิตอาหารแช่เยือกแข็ง

สตาร์ชประกอบด้วยแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ซึ่งมีบทบาทในการเกิดรีโทรเกรเดชันแตกต่างกัน โดยที่อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของ แอมิโลสจะใช้เวลาในการเกิดผลึกแอมิโลส 2-3 ชั่วโมง ในขณะที่แอมิโลเพกทินจะใช้เวลาในการเกิดผลึกแอมิโลเพกทินนานถึง 2-3 สัปดาห์ (Soest *et al.*, 1994) เนื่องจากธรรมชาติของสายโซ่แอมิโลสมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โมเลกุลจึงสามารถรวมตัวกันใหม่ได้ง่าย ส่วนสายโซ่แอมิโลเพกทินมีลักษณะเป็นเชิงกิ่งทำให้เกิดการรวมตัวกันได้ยากกว่า (Taub and Singh, 1998) จากคุณสมบัติของแอมิโลเพกทินนี้ จึงมีความสนใจในการประยุกต์ใช้แป้งหรือสตาร์ชชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณแอมิโลเพกทินแตกต่างกันมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ศึกษาแทนผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็งจำพวกอาหารคาว โดยที่สตาร์ชมันสำปะหลัง (tapioca starch) และแป้งข้าวเหนียว (waxy rice flour) สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมากภายในประเทศไทย และมีราคาถูกกว่าสารไฮโดรคอลลอยด์หลายเท่าตัว สตาร์ชมันสำปะหลัง เป็นสตาร์ชที่ได้จากหัวมันสำปะหลัง เมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ได้

จากรากและพืชหัวชนิดอื่นๆ พบว่าเจลสตาร์ชมันสำปะหลังแช่เย็นเกิดรีโทเกรเดชันต่ำกว่าเจลสตาร์ชจากรากและจากพืชหัวแช่เย็นชนิดอื่นๆ นอกจากนั้นเมื่อทำการผสมกับสตาร์ชจากพืชหัวชนิดอื่นๆ ยังพบว่าสามารถลดการเกิดรีโทเกรเดชันในเจลสตาร์ชผสมแช่เย็นได้ด้วย (Gunaratne and Hoover, 2002) สำหรับแป้งข้าวเหนียวเป็นแป้งที่สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมากในประเทศ และยังพบว่าเมื่อทำการผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะสามารถลดการเกิดรีโทเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวแช่เย็นที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางและต่ำได้ (Ding *et al.*, 2005)

จากผลวิจัยเหล่านี้ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำสตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมากในประเทศไทยและมีราคาถูก มาใช้ปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็ง โดยคาดว่าจะการผสมแป้งหรือสตาร์ชแต่ละชนิด (สตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว) ในระบบของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็ง จะสามารถลดการเสื่อมเสียคุณภาพของเจลสตาร์ชลงได้ โดยงานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณของสตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่เหมาะสมต่อการลดการเกิดรีโทเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็ง เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็งที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าให้มีคุณภาพและความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งมากขึ้น มีผลทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาและรักษาความสดใหม่ของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ ส่งเสริมการถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้สู่ชุมชนท้องถิ่น จนได้เป็นสินค้าสู่ตลาดการค้าสากล

วัตถุประสงค์

1. เพื่อตรวจสอบผลของอัตราการใช้เชื้อเพลิง การเติมสารแต่ละชนิด (สารขี้มัน-
ลำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว) ต่อการแยกออกของน้ำ การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส การเกิด
โครงสร้างแบบฟองน้ำ และการเกิดรีโทเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าใช้เชื้อเพลิง
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดการเปลี่ยนแปลงต่างๆของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าใช้
เชื้อเพลิงด้วยสารขี้มันลำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวระหว่างการใช้เชื้อเพลิงและการเก็บรักษา

การตรวจเอกสาร

1. โครงสร้างของแป้งและสตาร์ช

แป้งที่คนไทยเรียกกันทั่วๆ ไปนั้น ได้รวมความหมายเกี่ยวกับการเรียกแป้งในภาษาอังกฤษ 2 ประเภท ด้วยกัน คือ แป้งหรือฟลาวร์ (Flour) และสตาร์ช (Starch) ซึ่งแป้งและสตาร์ชนั้นมี ส่วนประกอบทางเคมีต่างกัน ส่งผลให้สมบัติต่างกันไปด้วยโดยแป้งหรือฟลาวร์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์แป้งที่ผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตรชนิดต่างๆ เช่น ข้าวเจ้า ข้าวเหนียว ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง ข้าวโพด และลำต้นสาธู เป็นต้น โดยนำวัตถุดิบทั้งหมดมาโม่หรือบด จนละเอียดมาก ดังนั้น ส่วนประกอบของแป้ง จึงประกอบด้วยสารอาหารต่างๆ ที่มีอยู่ในวัตถุดิบ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใย แร่ธาตุต่างๆ เป็นต้น ในส่วนของสตาร์ช หมายถึง ผลิตภัณฑ์แป้งที่ผ่านการ แยกเอาเฉพาะส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตไว้โดยมีสารอื่นมาปะปนน้อยที่สุด ดังนั้นสตาร์ชจึง ประกอบด้วยสารอาหารที่เป็นคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ (อรพิน, 2533)

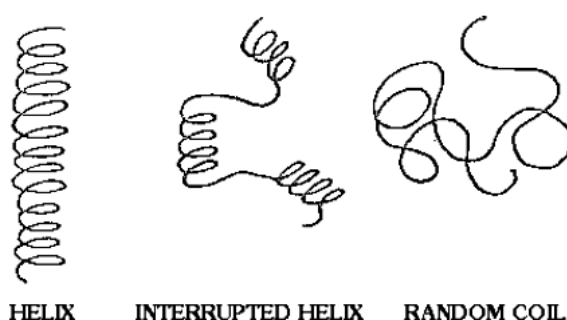
สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 โดยมีสูตรทางเคมี คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่ง ประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่ คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) สตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของ กลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (แอมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (แอมิโลเพกทิน) สตาร์ชจาก แหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินแตกต่างกันทำให้คุณสมบัติของ สตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกัน (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

1.1. แอมิโลส

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกัน ด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4 (α -1,4) (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) ดังภาพที่ 1 จาก การศึกษาในปัจจุบันพบว่าแอมิโลสบางโมเลกุลจะมีพอลิเมอร์เชิงกิ่งอยู่ประมาณร้อยละ 0.3-0.5 ของจำนวนพันธะทั้งหมด เชื่อมต่อกับสายหลักด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,6 (α -1,6) (Buleon *et al.*, 1998; Roy and James, 1999) โดยปกติแล้วจำนวนอัตราส่วนของปริมาณแอมิโลสต่อ

ปริมาณแอมิโลเพกทินของสตาร์ชแต่ละชนิดในพืชจะมีปริมาณค่อนข้างคงที่ และสตาร์ชจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง มีปริมาณแอมิโลสสูงกว่าสตาร์ชจากหัวและราก ในขณะที่สตาร์ช ข้าวเหนียว (waxy starch) จะมีแต่แอมิโลเพกทินเท่านั้น (Deman, 1999) แต่แอมิโลเมส (amylomaize) มีปริมาณแอมิโลสมากถึงร้อยละ 80 แอมิโลสมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 150,000 ถึง 1,000,000 โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของสตาร์ช (Hood, 1982) ในสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ช มันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าสตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชสาลี โดยสตาร์ชแต่ละชนิดมี Degree of Polymerization (DP) ของแอมิโลสแตกต่างกัน สตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังมี DPn ของแอมิโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 ซึ่งสูงกว่าสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชสาลีที่มี DPn ของแอมิโลสอยู่ในช่วง 200 ถึง 1,200 สตาร์ชที่มีโมเลกุลของแอมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการ เกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลง (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

รูปร่างของแอมิโลสที่อยู่ในสารละลายจะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ ลักษณะเป็นเกลียว ม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) และ ม้วนอิสระ (random coil) ดังภาพที่ 1 สีของ ไอโอดีนจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแป้ง โดยสีที่เกิดขึ้นอยู่กับความยาวของสายโซ่แอมิโลส ถ้าความยาวของโซ่มีค่ามากกว่า 45 สารประกอบไอโอดีนจะทำปฏิกิริยากับน้ำแป้ง และ เปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน โดยที่กลูโคส 6 โมเลกุลจะรวมกับไอโอดีน 1 โมเลกุล (Deman, 1999) นอกจากนี้โครงสร้างของแอมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย โดยแอมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุล อยู่ในช่วง 6,500-160,000 อยู่ในลักษณะเกลียวคู่ (double helix) ส่วนแอมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุล น้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 อยู่ในลักษณะม้วนอิสระ และอาจมีบางส่วนละลายได้ (Whistler and Daniel, 1984)



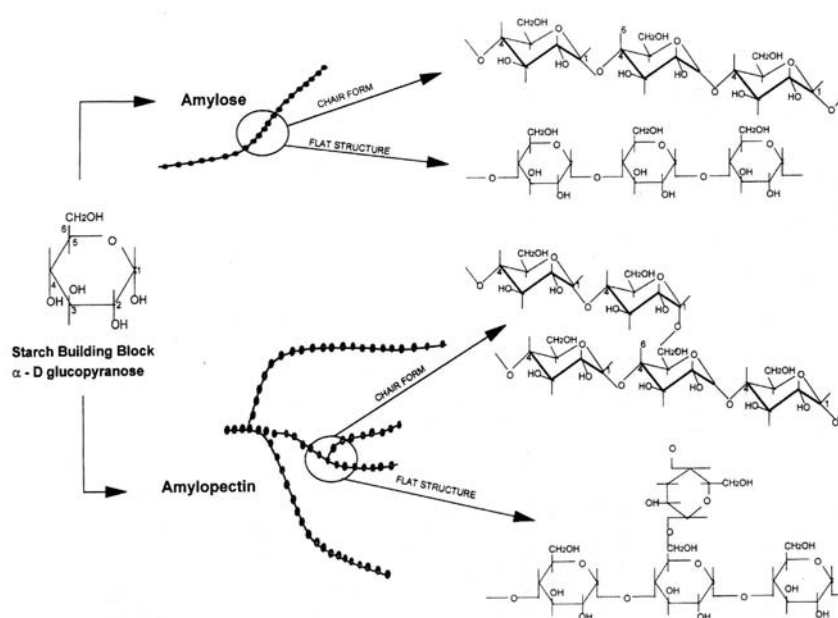
ภาพที่ 1 รูปร่างของแอมิโลส

ที่มา: Whistler and Daniel (1984)

1.2. แอมิโลเพกทิน

แอมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคสประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 (ภาพที่ 2) แอมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าแอมิโลส ประมาณ 1,000 เท่า คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน โดยปกติแอมิโลเพกทินจะมีค่า DP มากกว่า 1,000,000 และมีอัตราในการเกิดรีโทร-เกรเดชันต่ำ เนื่องจากแอมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

แอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่เป็นองค์ประกอบในเม็ดสตาร์ช (starch granule) แต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่น้ำหนักโมเลกุล Degree of polymerization (DP) ของแต่ละสายตำแหน่งที่อยู่ในเม็ดสตาร์ช และสัดส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ดังนั้นสมบัติของสตาร์ชที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน การที่สตาร์ชแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน จึงมีความสามารถในการทำหน้าที่ (Functionality) ได้แตกต่างกัน เนื่องมาจากสัดส่วนขององค์ประกอบและ/หรือโครงสร้างขององค์ประกอบ (นิธิยา, 2545)



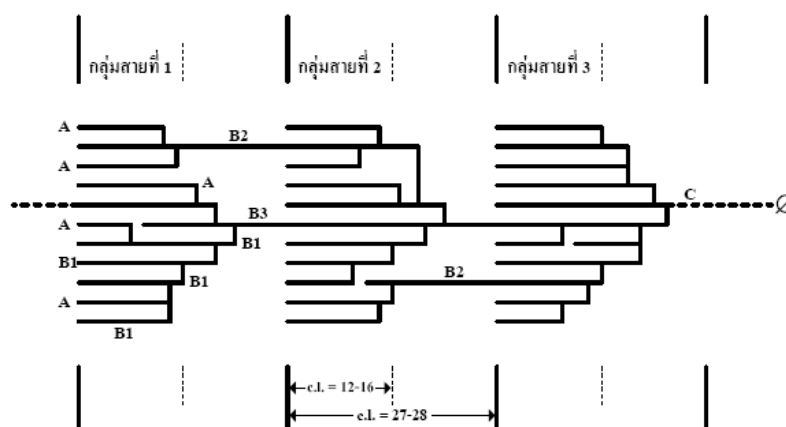
ภาพที่ 2 โครงสร้างของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Taggart (2004)

Hizukuri (1986) แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน ดังภาพที่ 3 โดยโครงสร้างแบบกิ่งของแอมิโลเพกทินประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิด คือ

1. สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว และไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายโซ่ชนิดนี้ (unbranched structure)
2. สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า
3. สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซ์ 1 หมู่ ในโมเลกุลแอมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสาย C เพียงหนึ่งสายเท่านั้น

โครงสร้างแอมิโลเพกทินประกอบด้วยสาย A และ สาย B ในอัตราส่วน 0.8-0.9:1 และ สาย C (C - chain) เป็นสายแกนที่ประกอบด้วยหมู่รีดิวซ์ซึ่ง 1 หมู่ โดยโมเลกุลของแอมิโลเพกทินจะมีสาย C เพียงหนึ่งสายเท่านั้น (Hizukuri, 1986)



ภาพที่ 3 ลักษณะโครงสร้างแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C

ที่มา: Hizukuri (1986)

ขนาดของสายโซ่กิ่งของโมเลกุลแอมิโลเพกทินมีตั้งแต่ขนาดเล็กซึ่งมี DP ประมาณ 15 หน่วย (ประกอบด้วยสาย A และ สาย B ขนาดเล็ก) จนถึงสายโซ่ขนาดใหญ่ที่มี DP ประมาณ 45 หน่วย (ประกอบด้วยสาย B สายยาว) ซึ่งสายเหล่านี้อยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster) (Robin *et al.*, 1974; กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) การจัดเรียงตัวของแอมิโลเพกทินเป็นกลุ่มก้อนประกอบด้วย

โครงสร้างที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบเรียกว่า Crystalline region หรือบางครั้งเรียกว่า โครงสร้างเป็นผลึก เกิดจากส่วนของสายโซ่ที่เป็นเส้นตรงของสตาร์ชอยู่ขนานกันและมีความยาวของกลูโคสมากกว่า 10 หน่วย โมเลกุลสองสายจะเกิดพันธะไฮโดรเจนและจัดเรียงตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นเกลียวคู่ ในขณะที่บริเวณกึ่งที่เป็นพันธะ α -1,6 จะไม่สามารถจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบได้ จึงเกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบหรือที่เรียกว่า โครงสร้างอสัณฐาน (amorphous region) ขึ้น ค่าความเป็นผลึกโดยปกติจะมีค่าประมาณร้อยละ 15-45 (Oates, 1997) ซึ่งสามารถทดสอบได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) โดยแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือแบบ A แบบ B และแบบ C รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน เกิดจากการเรียงตัวของส่วนเกลียวคู่ที่เป็นแขนงข้างของสายเอมิโลเพกทิน ความเป็นผลึกที่เกิดจากสายเอมิโลเพกทินสองสายในแบบเส้นตรงที่มีหน่วยของกลูโคสมากกว่า 10 หน่วยจะเกิดเป็นเกลียวคู่ เกลียวคู่นี้สามารถแตกออกแล้วได้โครงสร้างทั้งแบบ A หรือ แบบ B (Gidley and Bociek, 1985) สตาร์ชที่พบในธัญพืชจะแสดงแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นแบบ A เช่น สตาร์ชข้าว สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชที่พบในส่วนหัวจะแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นแบบ B เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง เป็นต้น และสตาร์ชที่พบในเมล็ดจะแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นแบบ C ซึ่งเป็นลักษณะผสมของแบบ A และ B เช่น สตาร์ชท้าวายม่อม สตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว (Gallant *et al.*, 1992) ในส่วนของสตาร์ชมันสำปะหลังพบทั้งแบบ A และ B

2. แป้งข้าวและแป้งมันสำปะหลัง

2.1. แป้งข้าว (ข้าวเจ้าและข้าวเหนียว)

ข้าว หมายถึง เมล็ดของพืชพวกหญ้าในวงศ์แกรมินีอี (Gramineae) ใช้เป็นอาหารสำคัญปลูกกันในเขตร้อนโดยมากมี 2 ชนิด คือ ข้าวเจ้า และข้าวเหนียว ข้าวจัดเป็นธัญชาติชนิดหนึ่งซึ่งได้มาจากเมล็ดของพืชพวกหญ้า มีลำต้นเป็นไม้เนื้ออ่อน เป็นพืชล้มลุกที่มีอายุเพียงหนึ่งปี (annual grass) มีใบชนิดใบเลี้ยงเดี่ยว (Monocotyledon) มีรากเป็นระบบรากฝอย (Fibrous root system) สามารถเจริญเติบโตได้ในลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศที่แตกต่างกันทั้งในเขตร้อน (tropical zone) และเขตอบอุ่น (temperate zone) ตั้งแต่พื้นที่น้ำท่วมสูงไปจนถึงพื้นที่สูงตามไหล่เขา ทำให้เกิดความหลากหลายของข้าวชนิดต่าง ๆ ที่แพร่กระจายไปทั่วโลก อย่างน้อย 23 ชนิด ซึ่งมีเพียง 2 ชนิด ที่มนุษย์ปลูกเพื่อบริโภค คือ ข้าวแอฟริกา (*Oryza glaberrima* Steud) ซึ่งนิยมปลูกในทวีปแอฟริกาฝั่งตะวันตก และข้าวเอเชีย (*Oryza sativa* Linn) ที่นิยมปลูกในทวีปต่าง ๆ ทั่วโลกข้าวเอเชียแบ่งออกเป็น 3 สายพันธุ์ (อรอนงค์, 2547) คือ

1. จาปอนิกา (Japonica) โดยการนำข้าวจากเอเชียจากบริเวณเนปาล-ฮัสสัม-พม่า ยูนาน เข้าไปปลูกบริเวณลุ่มน้ำเหลืองของจีน และจากอินโดจีนไปตามชายฝั่งเข้าสู่บริเวณตอนล่างของแม่น้ำแยงซีเกียง จนได้สายพันธุ์เฉพาะที่เหมาะสมในการปลูกเขตอบอุ่น มีชื่อว่า “Keng” หรือ “Japonica” ต่อมาจึงแพร่กระจายไปยังเกาหลี และญี่ปุ่น เมื่อประมาณ 300 ปี ก่อนคริสตกาล ข้าวสายพันธุ์นี้มีลักษณะเมล็ดสั้น ทนต่ออากาศหนาว และมีปริมาณแอมิโลสต่ำ ต่อมาได้มีการนำข้าวนี้ไปปลูกทางตอนใต้ของยุโรป รัสเซีย และอเมริกาใต้

2. อินดิกา (Indica) โดยแพร่กระจายลงมาจากทางตอนใต้ของอินเดียสู่ศรีลังกา และหมู่เกาะมลายู แล้วแพร่กระจายกลับไปทางตอนเหนือยังภาคกลางและภาคใต้ของจีน มีชื่อว่า “Hsien” สันนิษฐานว่ามีการปลูกข้าวสายพันธุ์ “อินดิกา” นี้ในบริเวณภาคกลางของกลุ่มแม่น้ำแยงซีเกียงเมื่อประมาณ ค.ศ.200 และเชื่อว่าจากสมัยอินเดียโบราณ มนุษย์ได้นำข้าวสายพันธุ์นี้ไปสู่โลกซีกตะวันตก แอฟริกา ยุโรป แอฟริกา อเมริกาใต้ และอเมริกากลาง ส่วนอเมริกาเหนือในประเทศสหรัฐอเมริกา มีรายงานว่า ได้นำข้าวสายพันธุ์อินดิกานี้มาจากหมู่เกาะมะละกาไปปลูกเมื่อประมาณคริสต์ศตวรรษที่ 17 ข้าวสายพันธุ์นี้มีลักษณะเมล็ดยาว ขึ้นได้ดีในเขตร้อน ซึ่งประเทศไทยนิยมปลูกข้าวสายพันธุ์นี้

3. จาวานิกา (Javanica) สันนิษฐานว่าข้าวสายพันธุ์นี้เป็นผลการคัดเลือกจากข้าวสายพันธุ์อินดิก้า มีการปลูกในอินโดนีเซีย เมื่อประมาณ 1,800 ปี ก่อนคริสตกาล ต่อมาได้แพร่กระจายไปยังประเทศฟิลิปปินส์ ไต้หวัน กลุ่มหมู่เกาะริวกู (Ryukyu) และญี่ปุ่น ข้าวสายพันธุ์นี้มีลักษณะเมล็ดใหญ่ ป้อม ต้นสูง

องค์ประกอบทางเคมีหรือสารอาหารหลักที่มีในข้าว คือ คาร์โบไฮเดรต นอกจากนี้ในข้าวยังประกอบด้วย โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ และเถ้า องค์ประกอบทางเคมีของข้าวจะแตกต่างกัน ทั้งนี้มีผลมาจากสายพันธุ์ สภาพการปลูกซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อปริมาณโปรตีนในข้าว เช่นการใส่ปุ๋ยในโตรเจนในระยะต่างๆ ขณะที่ข้าวเจริญเติบโตจะมีผลต่อการสร้างโปรตีนในเมล็ดข้าว นอกจากนี้ระยะเวลาในการปลูกที่สั้น สภาพอากาศที่มีเมฆปกคลุมมากในขณะที่ข้าวสร้างเมล็ด เช่น ฤดูฝนจะมีผลให้เมล็ดข้าวมีโปรตีนในเมล็ดข้าวสูงขึ้น สภาพแวดล้อมที่ผิดปกติบางช่วง เช่น ดินมีสภาพเบสหรือมีเกลือสูง อุณหภูมิสูงหรือต่ำมากทำให้เมล็ดข้าวมีโปรตีนสูงขึ้นได้ และเมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณสตาร์ชในเมล็ดข้าวลดลง (อรอนงค์, 2547) นอกจากนี้กระบวนการแปรรูปข้าวยังมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง

ข้าวแดงกับข้าวเปลือก พบว่าข้าวเปลือกจะมีเยื่อใยและเถ้าสูงกว่า แต่มีโปรตีนต่ำกว่า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากรำข้าวจะมีเยื่อใยและเถ้าสูง และมีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่ใช้ได้ต่ำ (Juliano, 1972)

พืชแต่ละชนิดมีปริมาณแอมิโลสในเมล็ดสสารแตกต่างกัน ซึ่งอัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ทำให้จุดประสงค์ในการนำไปใช้ประโยชน์ต่างกัน Juliano (1992) ได้แบ่งข้าวตามปริมาณแอมิโลสไว้ 5 ระดับ คือ

1. ข้าวแอมิโลสสูง มีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 25.0 ของน้ำหนักแห้ง
2. ข้าวแอมิโลสปานกลาง มีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบเท่ากับร้อยละ 20.1-25.0 ของน้ำหนักแห้ง
3. ข้าวแอมิโลสต่ำ มีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบเท่ากับร้อยละ 12.1-20.0 ของน้ำหนักแห้ง
4. ข้าวแอมิโลสต่ำมาก มีปริมาณแอมิโลสที่เป็นองค์ประกอบเท่ากับร้อยละ 5.1-12.0 ของน้ำหนักแห้ง
5. ข้าวเหนียว มีปริมาณแอมิโลสที่เป็นองค์ประกอบเท่ากับร้อยละ 0-5.0 ของน้ำหนักแห้ง

กระบวนการผลิตข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสารนั้น จะเกิดข้าวหักขึ้นในระหว่างการผลิต ซึ่งข้าวหักนี้จะถูกนำไปแปรรูปเป็นแป้งข้าว โดยนำมาทำความสะอาดแล้วนำไปโม่ให้เป็นแป้ง ทำได้ 3 วิธี คือ

1. การโม่แบบเปียกหรือการโม่น้ำ เป็นวิธีการที่ใช้ในการผลิตแป้งข้าวเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย เนื่องจากใช้วัตถุดิบเป็นข้าวหักซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว จึงยังมีสิ่งเจือปนอยู่มาก ต้องทำความสะอาดในระบบด้วยเครื่องแยกชนิดต่างๆ แล้วนำมาล้างด้วยน้ำให้สะอาด แช่วข้าวหักจนนุ่ม จึงทำการ โม่ด้วยเครื่องโม่แบบหินจานซึ่งใช้ไฟฟ้าในการทำงาน พร้อมกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้ได้แป้งที่ละเอียดสม่ำเสมอ ต่อจากนั้นจึงผ่านน้ำแป้งเข้าเครื่องแยกน้ำออกจากแป้ง โรงงานขนาดใหญ่นิยมใช้เครื่องกรองด้วยแรงอัดสูง (Filter Press) ได้ก้อนแป้งที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 40 นำก้อนแป้งไปตีปั่นให้เป็นผงก่อนจึงผ่านเข้าเครื่องอบแป้งให้แห้ง อาจใช้วิธีเป่าด้วยลมร้อน จนแป้งเป็นผงแห้ง หลังจากนั้นนำมาเข้าเครื่องบดและร่อนจนได้แป้งที่มีขนาดสม่ำเสมอประมาณ 180 ไมโครเมตร และมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 13

2. การโม่แบบแห้ง เป็นการนำข้าวหักที่ผ่านระบบการทำความสะอาดแบบแห้งแล้วเข้าสู่เครื่องโม่หรือบดแห้งเป็นแป้งผง แล้วผ่านเข้าเครื่องร่อนจนได้แป้งที่มีขนาดสม่ำเสมอประมาณ 180 ไมโครเมตร

3. การโม่แบบผสม มีขั้นตอนการโม่คล้ายคลึงกับวิธีการโม่แบบเปียกในช่วงล้างข้าวหักและแช่ข้าวจนนิ่ม ต่อจากนั้นนำข้าวหักขึ้นจากน้ำมาสะเด็ดน้ำให้แห้ง แล้วผ่านไปยังเครื่องอบข้าวให้ข้าวแห้งในระดับหนึ่ง (ประมาณร้อยละ 15-17) จึงนำข้าวหักเข้าบดหรือโม่แบบแห้ง ตามวิธีการโม่แบบแห้งจนได้แป้งแห้งผ่านเข้าเครื่องร่อนจนได้แป้งที่มีขนาดสม่ำเสมอประมาณ 180 ไมโครเมตร

ในประเทศไทยมีการผลิตแป้งข้าววางขายตามท้องตลาดอยู่ 2 ชนิด คือแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว โดย starch ข้าวสามารถผลิตได้จากการนำแป้งข้าวไปผ่านกระบวนการแยก starch (starch isolation) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมไซยาไนด์ร่วมกับเพอร์ออกไซด์เพื่อกำจัดส่วนของโปรตีนที่ติดอยู่กับเม็ดสตาร์ชออกไปจนได้สตาร์ชข้าวที่มีความบริสุทธิ์ (Lumdubwong and Seib, 2000) แป้งข้าวเหนียวมีความแตกต่างจากแป้งหรือสตาร์ชข้าวชนิดอื่นๆ คือเพสต์ของแป้งข้าวเหนียวสามารถทนต่อการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้ดีกว่า เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณแอมิโลสต่ำ เมื่อทำการผสมแป้งข้าวเหนียวกับแป้งสาลีในอัตราส่วน 40-60 พบว่าสามารถเพิ่มความคงตัวของซอส (sauces) และน้ำเกรวี่ (gravies) ที่เก็บรักษาที่ 0 องศาเซลเซียสได้นาน 5-6 เดือน และหากใช้เป็นแป้งข้าวเหนียวเพียงชนิดเดียวจะสามารถเก็บรักษาได้นานมากขึ้น ซึ่งแป้งประเภทข้าวเหนียวจากธัญพืชชนิดอื่น เช่น แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว ก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน การที่แป้งข้าวเหนียวสามารถทนต่อการแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าสตาร์ชหรือแป้งชนิดอื่นอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีหรือเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก (Luh and Liu, 1991)

ข้าวมีขนาดของเม็ดสตาร์ชเล็กที่สุดชนิดหนึ่งในบรรดาเมล็ดพืชจากธัญชาติ สตาร์ชข้าวจะมีขนาดของเม็ดสตาร์ชแตกต่างกันในแต่สายพันธุ์ รูปร่างของสตาร์ชข้าวจะมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมรูปร่างไม่แน่นอน และมีขนาดอยู่ในช่วง 2.4-5.7 ไมครอน โดยสตาร์ชข้าวเจ้าจะมีขนาดของเม็ดสตาร์ชเท่ากับ 3.1-5.4 ไมครอน ในขณะที่สตาร์ชข้าวเหนียวจะมีขนาดของเม็ดสตาร์ชใหญ่กว่าสตาร์ชข้าวเจ้าคือ 4.9-5.7 ไมครอน (Qi *et al.*, 2003) ในข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้วมีเม็ดสตาร์ชเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 90 (Champagne, 1996) สตาร์ชข้าวมีข้อดีคือ เม็ดสตาร์ชมีขนาดเล็ก และขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ ไม่ทำให้เกิดกลิ่นรสที่แปลกปลอม (bland flavor) เมื่อนำไปเป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์อาหาร และก่อให้เกิดอาการแพ้น้อยกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ๆ (Alexander, 1995; Lumdubwong and Seib, 2000)

แอมิโลสของสตาร์ชข้าวเจ้ามีลักษณะเป็นเส้นตรงและเป็นกิ่ง จากค่าเปอร์เซ็นต์การถูกย่อยด้วยปีตา-แอมิเลสอยู่ในช่วงร้อยละ 73-81 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างที่เป็นกิ่งก้านโดยเฉลี่ย 3-4 กิ่ง สตาร์ชข้าวมีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์อยู่ในช่วง 1,000-1,100 AGU (Anhydro Glucose Unit) และความยาวเฉลี่ยของสายโมเลกุลเท่ากับ 250-320 AGU (Hizukuri *et al.*, 1989) จากงานวิจัยของ Takeda *et al.*, (1993) พบว่าโซ่ข้างของแอมิโลสในสตาร์ชข้าวประกอบด้วยโซ่ข้างขนาดยาวมาก (DP>200) โซ่ข้างขนาดยาว (DP 30-200) และโซ่ข้างขนาดสั้น (DP 10-30) ในอัตราส่วนประมาณ 4:3:20 แสดงว่าโซ่ข้างส่วนใหญ่ของแอมิโลสเป็นสายสั้น และจากการที่สายแอมิโลสมักอยู่ในรูปเกลียว (helix) ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสส่วนที่เหลือจะอยู่บนผิวด้านนอกของเกลียวทำให้ช่องกลางภายในเกลียวมีลักษณะเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) แอมิโลสจึงสามารถยึดเกาะกับสารพวกที่ไม่ชอบน้ำภายในเกลียวของแอมิโลสด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ได้ (Godet *et al.*, 1993)

สำหรับแอมิโลเพกทินของสตาร์ชข้าวมีค่าเปอร์เซ็นต์การถูกย่อยด้วยปีตา-แอมิเลสอยู่ในช่วงร้อยละ 56-62 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 50 จึงมีค่าเฉลี่ยของ exterior chain length (ECL) สูงกว่าค่าเฉลี่ยของ interior chain length (ICL) ส่งผลทำให้การเกิดโครงสร้างแบบผลึก (crystal conformation) ที่มีความคงตัวดี สตาร์ชข้าวมีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์อยู่ในช่วง 2,700-12,000 AGU และความยาวเฉลี่ยของสายโมเลกุลเท่ากับ 15-22 AGU (Lu *et al.*, 1997) และการมีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ที่ต่ำ (DP 6-9) เป็นส่วนใหญ่ ในส่วนของสตาร์ชข้าวเหนียวจะมีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ ประมาณ 19,000 AGU (Hizukuri, 1993) โดยแอมิโลเพกทินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการเกิดโครงสร้างแบบผลึกของสตาร์ช ถ้าสตาร์ชข้าวมีปริมาณแอมิโลเพกทินสูงจะมีความเป็นผลึกมากกว่าสตาร์ชข้าวที่มีแอมิโลเพกทินต่ำ ซึ่งจากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของสตาร์ชข้าวด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (x-ray diffractometer) พบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวจะมีความเป็นผลึกสูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า นอกจากนี้ยังพบว่าอาจเกิดจากปัจจัยอื่นได้อีก เช่น ความยาวของแอมิโลเพกทิน, พันธุ์ของข้าวและสภาพภูมิอากาศ (Eliasson, 2004)

2.2. แป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในอเมริกาใต้เช่น บราซิล เม็กซิโก มีการเรียกชื่อต่างกัันตามรากศัพท์ภาษาอังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน โปรตุเกส เช่น cassava, mandioca, yucca, tapioca และ manioc โดยในทางพฤกษศาสตร์ มันสำปะหลังจัดเป็นพืชในวงศ์ (class) ใบเลี้ยงคู่ (dicotyledoneae) ตระกูล (family) Euphobiaceae และมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz (ซึ่งเดิมมีการใช้ชื่อว่า *Manihot utilisima* Pohl.) (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2543)

ในขณะที่ประเทศผู้ปลูกมันสำปะหลังรายใหญ่ เช่น บราซิล อินโดนีเซีย และประเทศในทวีปแอฟริกามีการใช้ประโยชน์มันสำปะหลังเพื่อการบริโภคเป็นอาหาร โดยตรงและให้ความสำคัญต่อคุณภาพในการรับประทานเป็นอาหาร (organoleptic cooking quality) เป็นหลักนั้น ประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศผู้ผลิตมันสำปะหลังรายใหญ่ของโลกจะมีการใช้ประโยชน์และส่งออกมันสำปะหลังในแง่อุตสาหกรรมแป้งและแป้งแปรรูปเป็นหลัก (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2543)

เทคโนโลยีการผลิตแป้งมันสำปะหลังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรกคือ ช่วงของการผลิตแป้งมันชั้นสอง (tapioca flour) ซึ่งมีโรงงานที่จดทะเบียนกับกระทรวงอุตสาหกรรม 96 โรงงาน การแยกแป้งจะใช้วิธีตกตะกอน การอบแห้งใช้ระบบตากบนเตาเผา เรียกการผลิตแบบนี้ว่า “แบบอึ่งไฟ” ช่วงที่สองคือ การพัฒนาการแยกโดยระบบเหวี่ยงแยกและอบแห้งโดยระบบลมร้อน เรียกการผลิตแบบนี้ว่า “แบบสไลด์แห้ง” ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพสูง เมื่อทำการสำรวจในปี 2528 พบว่ามีโรงงานแบบสไลด์แห้ง 54 โรงงาน และโรงงานชนิดอึ่งไฟเหลืออยู่ 33 โรงงาน (มรกด, 2537) ซึ่งในปัจจุบันนี้ไม่มีรายงานว่ามีโรงงานแบบอึ่งไฟดำเนินกิจการอยู่เลย และช่วงที่สามคือ การพัฒนาเทคโนโลยีให้เข้าใกล้อุตสาหกรรมอาหารมากที่สุด ในปัจจุบันการผลิตแป้งมันสำปะหลังในประเทศไทยผลิตด้วยกรรมวิธีทันสมัย ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ของแป้งสูง จึงจัดเป็นแป้งสตาร์ช (starch) จากการสำรวจของสมาคมการค้าอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทยสำปะหลัง ในช่วง พ.ศ. 2530 ถึง 2540 ประเทศไทยสามารถผลิตแป้งมัน ได้มากถึง 2 ล้านตันต่อปี มีการส่งออกจำหน่ายต่างประเทศประมาณ 1 ล้านตัน โดยที่เหลือเป็นการใช้ภายในประเทศในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมแป้งแปรรูป อุตสาหกรรมสารให้ความหวาน และอุตสาหกรรมผงชูรส เป็นต้น (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว ลักษณะเด่นคือมีความบริสุทธิ์สูง โดยมีสตาร์ชมากกว่าร้อยละ 95 ลักษณะของเม็ดสตาร์ชเมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่ามีรูปร่างแตกต่างกัน แต่ส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นทรงกลมที่มีปลายตัดคล้ายปากแตร (truncated end) เม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีขนาดอยู่ในช่วง 5-40 ไมโครเมตร เม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง 25-35 ไมโครเมตร และขนาดเล็กอยู่ในช่วง 5-15 ไมโครเมตร สตาร์ชมันสำปะหลังจัดเป็นสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสค่อนข้างต่ำคือ ร้อยละ 18-23 Takeda *et al.* (1987) พบว่าแอมิโลสของสตาร์ชมันสำปะหลังประกอบด้วยสายตรงที่มีกิ่งและไม่มียิ่งในปริมาณใกล้เคียงกันโดยอัตราส่วนของโครงสร้างที่เป็นสายตรง และโครงสร้างที่เป็นกิ่งมีค่าเท่ากับ 0.58 ต่อ 0.42 ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยระดับขึ้นการเกิดพอลิเมอร์เท่ากับ 2,600 AGU ค่าเฉลี่ยความยาวของสายโมเลกุลเท่ากับ 340 AGU ซึ่งใกล้เคียงกับ Gunaratne and Hoover (2002) ที่พบว่าระดับขึ้นการเกิดพอลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 2500

AGU แอมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นกึ่งสูง น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมีค่าประมาณ 10^7 (Balagapalan *et al.*, 1988) โดยมีระดับชั้นการเกิดพอลิเมอร์อยู่ในช่วง 10,000-100,000 AGU (Moorthy, 2000) สตาร์ชมันสำปะหลังพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทยได้แก่ ระยะเวลา 1 ระยะเวลา 60 ระยะเวลา 90 และเกษตรศาสตร์ 50 มีค่า DP อยู่ในช่วง 1,035-1,216 AGU (Sriroth *et al.* 1999) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้วัดขนาด

3. สมบัติพื้นฐานของสตาร์ช

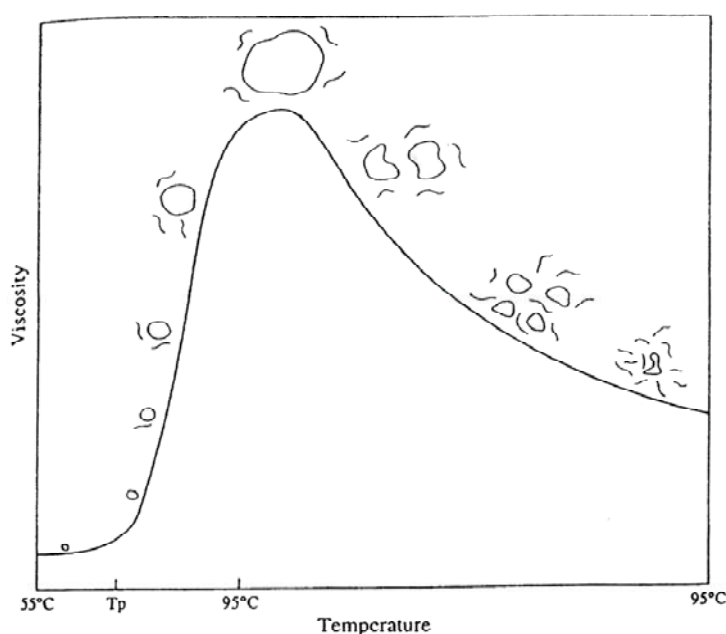
3.1. การพองตัวและการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ช

เม็ดสตาร์ชตามธรรมชาติ (native starch) มีสมบัติ optical birefringence คือจะปรากฏเป็นแสงสองระนาบเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบโพลาไรซิง (polarizing microscope) สมบัตินี้บ่งชี้ว่าสตาร์ชมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (order orientation) หรืออยู่ในรูปผลึก (crystallinity) เม็ดสตาร์ชที่สมบูรณ์ไม่ถูกทำลายขณะแปรรูป จะไม่ละลายน้ำเย็นและสามารถดูดน้ำเย็นได้เพียงเล็กน้อย ความสามารถในการดูดน้ำของเม็ดสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อละลายอยู่ในน้ำอุ่นเม็ดสตาร์ชจะค่อยๆดูดน้ำและพองตัวออกได้ และการพองตัวนี้สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ เพราะเม็ดสตาร์ชสามารถหดตัวลงได้เมื่อนำไปอบไล่ไอน้ำออกหรือทำให้แห้ง (นิธิยา, 2545)

การพองตัวของเม็ดสตาร์ชสามารถตรวจสอบได้หลายวิธีเช่น วิธีของ Schoch (1964) โดยหาการพองตัวของเม็ดสตาร์ชในรูปของค่ากำลังการพองตัว (swelling power, SP) ซึ่งได้จากปริมาตร หรือน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ ค่าความสามารถในการละลายได้ด้วย ซึ่งแสดงถึงน้ำหนักของสตาร์ชที่สามารถละลายน้ำได้ นอกจากนี้ยังมีวิธีของ Tester and Morrison (1990) ซึ่งแสดงในรูปของค่าแฟกเตอร์การพองตัว (swelling factor, SF) เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองวิธีพบว่า วิธีของ Tester and Morrison (1990) ให้ค่าที่ถูกต้องมากกว่าเนื่องจากเป็นวิธีที่วัดเฉพาะปริมาณน้ำที่เม็ดสตาร์ชดูดซับไว้ในระหว่างการพองตัวเท่านั้น ส่วนการหาในรูปค่ากำลังการพองตัวจะวัดรวมปริมาณน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ช ภายหลังการพองตัวเข้าไปด้วย (Gunaratne and Hoover, 2002; Tester and Morrison, 1990)

เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำรอบ ๆ บริเวณเม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืดขึ้นและเมื่อเม็ดสตาร์ชมีการพองตัวสูงสุดจะให้ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) จากนั้นเม็ดสตาร์ชจะเริ่มแตกออก เมื่อเพิ่ม

อุณหภูมิต่อไปเรื่อย ๆ เม็ดสตาร์ชจะแตกตัวอย่างสมบูรณ์ ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญอย่างหนึ่งของสตาร์ชที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิด องค์ประกอบของสตาร์ช การตัดแปรแป้งด้วยวิธีต่าง ๆ ความเข้มข้นและวิธีการทำให้แป้งสุก นอกจากนี้แรงเหวี่ยงทางกลจะมีผลในการลดความหนืดของแป้งสุก เนื่องจากแรงเหวี่ยงจะทำให้เม็ดแป้งที่บวมแตกออก ส่งผลให้ความหนืดของน้ำแป้งลดต่ำลง (ภาพที่ 4)

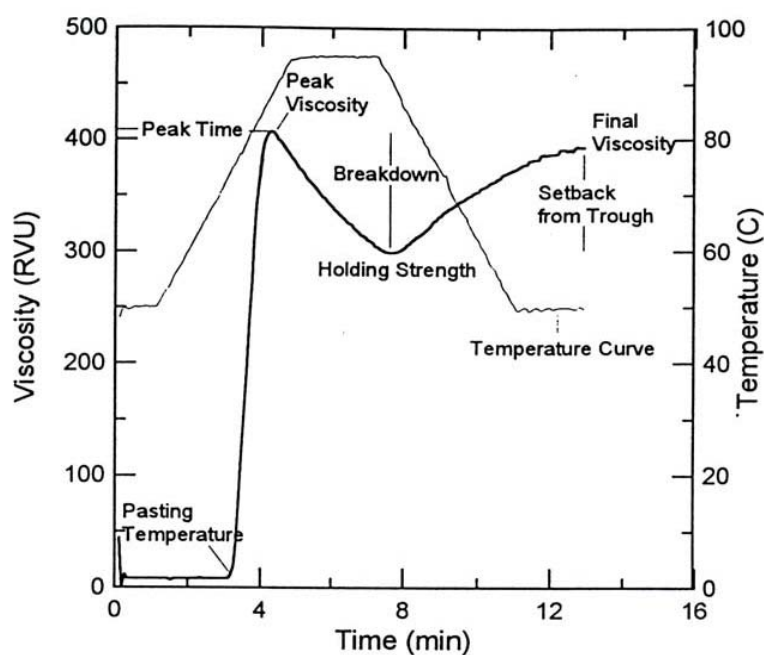


ภาพที่ 4 ลักษณะการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายสตาร์ช เมื่อได้รับความร้อนจนถึงจุดสูงสุดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้

ที่มา: นิธิยา (2545)

การติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำสตาร์ช มีเครื่องมือหลายชนิดที่ใช้ในการวัดความหนืด มีทั้งที่ปรับอุณหภูมิได้และปรับอุณหภูมิไม่ได้ (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) เครื่องมือที่ใช้วัดความหนืดที่สำคัญ ได้แก่ เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA) ซึ่งเป็นเครื่องวัดความหนืดที่วัดความหนืดขณะที่ให้ความร้อนและลดอุณหภูมิได้ คุณสมบัติพิเศษคือสามารถปรับเปลี่ยนระดับอุณหภูมิของตัวอย่างให้ร้อนและเย็นได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว รวมทั้งสามารถรักษอุณหภูมิให้คงที่ได้ ค่าความหนืดที่ได้มีหน่วยเป็น Rapid Visco Unit (RVU) ในการวิเคราะห์ความหนืดของน้ำสตาร์ชด้วยเครื่อง RVA สามารถอ่านค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. Peak time: เวลาที่เกิดจุดสูงสุด (peak) ของความหนืด มีหน่วยเป็นนาที
2. Pasting temperature : อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
3. Peak temperature : อุณหภูมิที่เกิดจุดสูงสุด (peak) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
4. Peak viscosity : ความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
5. Trough : ความหนืดต่ำสุดระหว่างการทำเย็น มีหน่วยเป็น RVU
6. Breakdown : ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU
7. Final viscosity : ความหนืดสูงสุดเมื่อสตาร์ชขึ้นตัวลง มีหน่วยเป็น RVU
8. Setback from peak : ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด (peak) มีหน่วยเป็น RVU
9. Setback from trough : ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

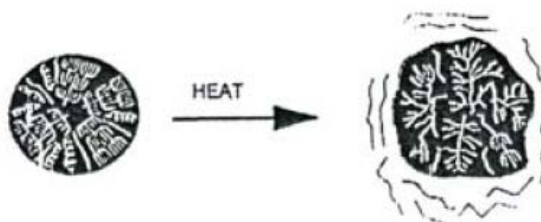


ภาพที่ 5 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer

ที่มา: Newport Scientific Pty, Ltd. (1995)

3.2. การเกิดเจลลิตินในเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophillic) แต่เนื่องจากโครงสร้างความเป็นผลึกของสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชละลายได้ยากเมื่ออยู่ในน้ำเย็น โดยเมื่อกวนเม็ดสตาร์ชจะแขวนลอยอยู่ในน้ำ แต่เมื่อดึงทิ้งไว้เม็ดสตาร์ชจะกลับมาตกตะกอนอีกครั้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ แต่เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำแป้งในสถานะที่มีน้ำมากเกินไป พันธะไฮโดรเจนก็จะเริ่มคลายตัวลงเม็ดแป้งจะค่อยๆ ดูดน้ำและพองตัวขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิเจลลิตินในเซชัน (gelatinization temperature) ความหนืดของระบบจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเม็ดสตาร์ชก็จะพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ (อรรวรรณ, 2549; กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2546; Tester and Morrison, 1990; Whistler and Bemiller, 1999) ซึ่งการเกิดเจลลิตินในเซชัน (gelatinization) เป็นการทำลายโครงร่างแบบผลึก (molecule order) ภายในเม็ดสตาร์ช โดยที่โมเลกุลน้ำจะสามารถแพร่เข้าไปในส่วนอสัณฐาน (amorphous) ของเม็ดสตาร์ช ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลสตาร์ชในส่วนอสัณฐานอ่อนแอลง ดังภาพที่ 6 (Kaletunc and Breslauer, 2003)



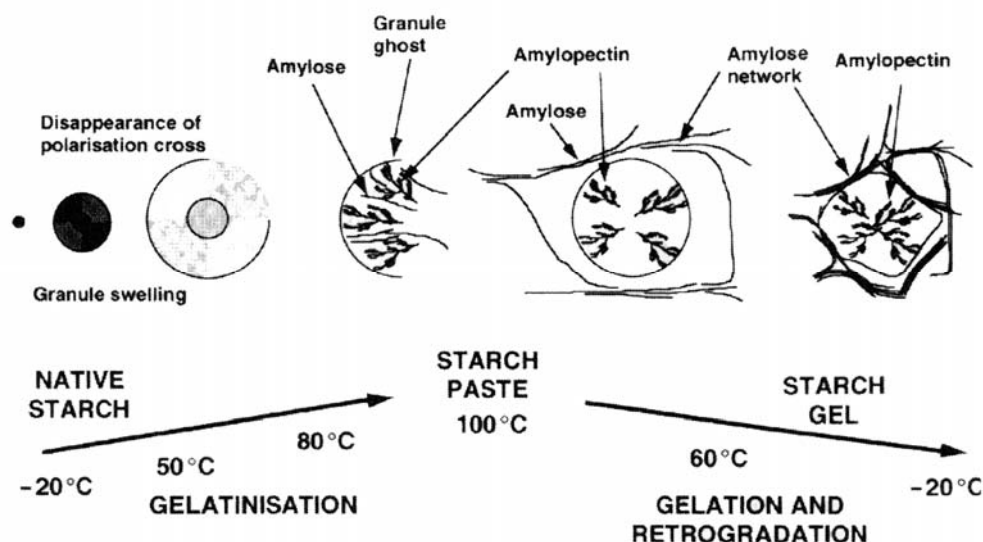
ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชเมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลิตินในเซชัน

ที่มา: Murphy (2000)

ในปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาการเกิดเจลลิตินในเซชันได้แก่ การวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) เพื่อหาค่าพลังงานเอนทัลปีและช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature, T_p) และอุณหภูมิสิ้นสุดการเกิดเจลลิตินในเซชัน (conclusion temperature, T_c) โดยใช้หลักการวิเคราะห์จากค่าพลังงานความร้อนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง (Baets *et al.*, 2002; James, 1999) ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC นอกจากจะขึ้นอยู่กับ

ชนิดของสสารแล้วยังขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำต่อสสารที่ใช้ในการทดลอง (Appelqvist and Debet, 1997) ซึ่งโดยปกติควรมีน้ำอย่างน้อยร้อยละ 60 เพื่อให้ได้ผลการเปลี่ยนแปลงความร้อนเพียงฟิคเดียวโดยไม่เกิดฟิครบกวน (Gonera and Cornillon, 2002) และสำหรับค่าพลังงานเอนทัลปีที่วัดนั้นแต่เดิมเชื่อว่าเป็นการวัดค่าพลังงานที่ใช้ในการทำลายความเป็นผลึกในโครงสร้าง แต่ในปัจจุบันพบว่า น่าจะเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการทำลายการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ (double helixes) ภายในโครงสร้างมากกว่า โดยการสูญเสียความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่นั้นน่าจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันมากกว่าจะเกิดการสูญเสียความเป็นผลึกก่อน แสดงให้เห็นว่าแรงยึดเกาะกันภายในเม็ดสสารขึ้นกับระดับการจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่มากกว่าระดับความเป็นผลึกในโครงสร้าง (Appelqvist and Debet, 1997)

เมื่อเม็ดสสารได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป เม็ดสสารจะพองตัวเต็มที่และแตกออก ความหนืดของระบบจะลดลงที่สภาวะนี้จะเกิดการละลายของโมเลกุล ส่วนที่สามารถละลายออกมาได้ คือ แอมิโลส เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงหรือนำไปเก็บรักษา จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในระบบ โดยโมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการควบแน่นเข้ามาอีก เรียกโครงสร้างของระบบที่ไม่แสดงการไหลนี้ว่า เจล และเรียกกระบวนการนี้ว่าการเกิดเจล (ปาริฉัตร, 2545; Morris, 1990) ซึ่งการเกิดเจลนี้เป็นส่วนหนึ่งของการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546) ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การเกิดเจลในเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชัน

ที่มา: Lang (2004)

การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง หรือสตาร์ช ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น ปริมาณและขนาดของแอมิโลส แอมิโลเพกทิน โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินมีบทบาทในการเกิดรีโทรเกรเดชันแตกต่างกัน ซึ่งอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสจะใช้เวลา 2-3 ชั่วโมง ในขณะที่แอมิโลเพกทินจะใช้เวลานานถึง 2-3 สัปดาห์ (Soest *et al.*, 1994) เนื่องจากธรรมชาติของแอมิโลสมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โมเลกุลจึงสามารถรวมตัวกันใหม่ได้ง่าย ส่วนแอมิโลเพกทินมีลักษณะเป็นเชิงกิ่งทำให้เกิดการรวมตัวได้ยากกว่า (Taub and Singh, 1998)

เมื่อเปรียบเทียบการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากพืชหัวและราก Gunaratne และ Hoover (2002) ได้ทำการศึกษาด้วย DSC โดยสตาร์ชจากพืชหัวได้จาก มันฝรั่ง, เผือก, โคโคแยมพันธุ์ใหม่ (new cocoyam) และแยมแท้ (true yam) และสตาร์ชจากรากได้จากมันสำปะหลัง นำเจลสตาร์ชที่เตรียมได้ไปเก็บที่ 4 °ซ เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าค่าเอนทัลปีของการเกิดรีโทรเกรเดชัน (ΔH_R) ของสตาร์ชมันสำปะหลังในวันที่ 7 มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชชนิดอื่นๆ ดังนั้นจากค่า ΔH_R สามารถเรียงลำดับการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากมากไปน้อยได้ดังนี้ แยมแท้ > มันฝรั่ง > เผือก > โคโคแยมพันธุ์ใหม่ > มันสำปะหลัง

ปริมาณและขนาดเอมิโลสของสตาร์ชมีความสำคัญต่อการเกิดการรีโทเกรเดชัน สตาร์ชที่มีปริมาณเอมิโลสสูงจะเกิดการรีโทเกรเดชันได้มากและเร็วกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณเอมิโลสเพกทินสูง และอัตราการรีโทเกรเดชันจะสูงสุดเมื่อขนาดโมเลกุลของเอมิโลสเท่ากับ 100-200 อัตราการเกิดรีโทเกรเดชันจะลดลงเมื่อโมเลกุลของเอมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ซึ่งเอมิโลเพกทินจะมีผลต่อการเกิดรีโทเกรเดชันได้น้อยมาก แป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการเกิดรีโทเกรเดชันแตกต่างกัน โดยในสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีอัตราการคืนตัวของแป้งต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีเอมิโลสในสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวเลย แต่สำหรับสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชสาลิจะมีอัตราการเกิดรีโทเกรเดชันสูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลัง เนื่องมาจากสตาร์ชจากธัญพืชจะมีปริมาณเอมิโลสสูง และมีขนาดโมเลกุลเล็ก (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

การเกิดรีโทเกรเดชันของเอมิโลสและเอมิโลเพกทินประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ (Pataux *et al.*, 2000)

- 1) สายโมเลกุลเอมิโลสหรือเอมิโลเพกทินเกิดอันตรกิริยาต่อกัน (interaction)
- 2) สายโมเลกุลพันกันเป็นเกลียวคู่ (double helices)
- 3) รวมตัวกันจนเกิดลักษณะเป็นผลึก (crystallization)
- 4) เกิดเป็นโครงร่างแห (network)

การศึกษาการเกิดรีโทเกรเดชันของสตาร์ชแต่ละชนิดในปัจจุบันมักทำโดยการเก็บรักษาเจลสตาร์ชที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (isothermal treatment) เช่น ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสหรือโดยการเร่งการเกิดรีโทเกรเดชันด้วยวิธีการหาสมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw cycle process, FTC process) ซึ่งทำโดยการแช่เยือกแข็งและทำละลายเจลสตาร์ชที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซ้ำไปมาหลาย ๆ รอบ (Biliaderis, 1998; Jacobson and BeMiller, 1998) จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาอัตราและปริมาณการเกิดรีโทเกรเดชันด้วยวิธีต่างๆ เช่น การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส การวัดความขุ่นของเจลสตาร์ชที่เพิ่มสูงขึ้น (turbidometric method) การหาร้อยละการแยกของน้ำ (syneresis) โดยวิธีการหมุนเหวี่ยง (centrifugation method) (Baker and Duarte, 1998; Yuan and Thompson, 1998; Charoenrein *et al.*, 2008) การตรวจสอบโครงสร้างแบบผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อหา XRD-pattern ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดรีโทเกรเดชันและการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนด้วยเครื่อง DSC ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้เมื่อเจลสตาร์ชมีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 20 (Jacobson and BeMiller, 1998; Karim *et al.*, 2000)

4. ระบบของเจลสตาร์ชเนื้อผสม

การผสมเป็นหน่วยปฏิบัติการที่มีการกระจายขององค์ประกอบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป และนำมารวมกันแล้วทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอระหว่างสารที่ผสมเข้าด้วยกัน การผสมเป็นกระบวนการที่ช่วยในการแปรรูปให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพด้านบริโภคนิยม (รุ่งนภา, 2549) ในระบบของเจลที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปจัดเป็นเจลเนื้อผสม ซึ่งลักษณะการเกิดเจลเนื้อผสมที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังภาพที่ 8 และ 9 แสดงการเกิดเจลแบบที่ 1 และ 2 Morris (1986) ได้แบ่งชนิดของเจลตามความแตกต่างที่เห็นได้ชัด คือ การเกิดเจลเนื้อผสมแบบที่ 1 พอลิเมอร์ชนิดแรกจะเกิดโครงสร้างแบบเป็นเจล และพอลิเมอร์ชนิดที่สองจะมีอิทธิพลต่อการเกิด เจลของพอลิเมอร์ชนิดแรก โดยแทรกอยู่ในโครงข่าย (network) ของเจล (ภาพที่ 8)

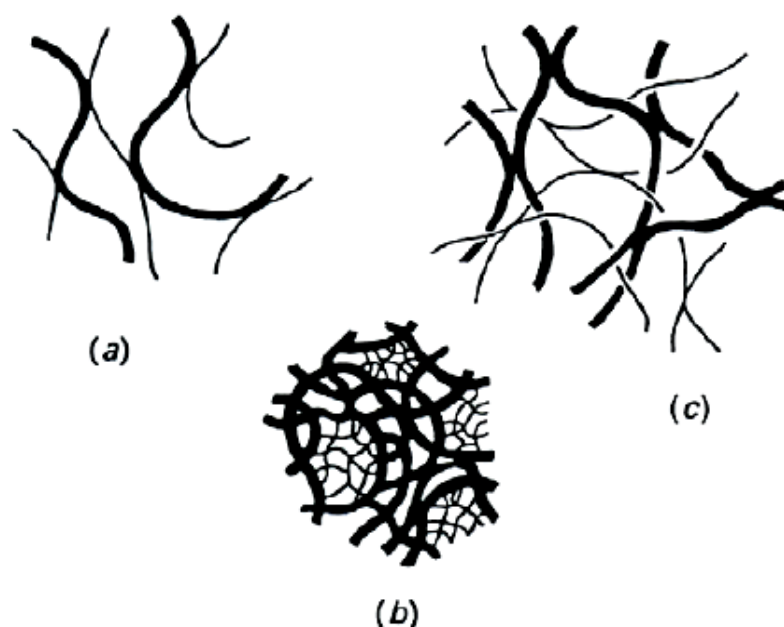


ภาพที่ 8 โครงสร้างการเกิดเจลเนื้อผสมแบบที่ 1

ที่มา: Brownsey and Morris (1998)

ส่วนการเกิดเจลเนื้อผสมแบบที่ 2 ระบบประกอบด้วยพอลิเมอร์สองชนิด ซึ่งสามารถเกิดโครงสร้างแบบเป็นเจลได้ภายใต้สภาวะที่สนับสนุนการเกิดเจลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยโครงสร้างของเจลเนื้อผสมที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ (Brownsey and Morris, 1998) คือ

1. แบบ a หรือ แบบร่วมกันสานตัว (coupled networks) พอลิเมอร์ทั้งสองในระบบสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ แล้วเกิดเป็นโครงสร้างแบบเจลขึ้น
2. แบบ b หรือ แบบแยกกันสานตัว (phase-separated networks) พอลิเมอร์ทั้งสองไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน เจลเนื้อผสมที่ได้มีลักษณะเป็นเจลของพอลิเมอร์ชนิดที่ 1 แทรกตัวอยู่ร่วมกับเจลของพอลิเมอร์ชนิดที่ 2
3. แบบ c หรือ แบบสอดแทรกสานตัว (interpenetrating networks, IPN) เจลเนื้อผสมที่ได้ประกอบด้วยโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดแทรกอยู่ด้วยกัน โดยตลอดทั้งโครงสร้างของเจล



ภาพที่ 9 โครงสร้างการเกิดเจลเนื้อผสมแบบที่ 2

(a) coupled networks (b) phase-separated networks และ (c) interpenetrating networks

ที่มา: Brownsey and Morris (1998)

สตาร์ชและไฮโดรคอลลอยด์จัดเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ (นิธิยา, 2545) โดยที่สตาร์ชมีส่วนการใ้้มากที่สุดในตลาดโลก และมักถูกใช้ร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์เพื่อใช้ในการปรับปรุงเนื้อสัมผัส ควบคุมความชื้น และปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีการวิจัยเกี่ยวกับการผสมสตาร์ช 2 ชนิด เข้าด้วยกันเพื่อลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของระบบ

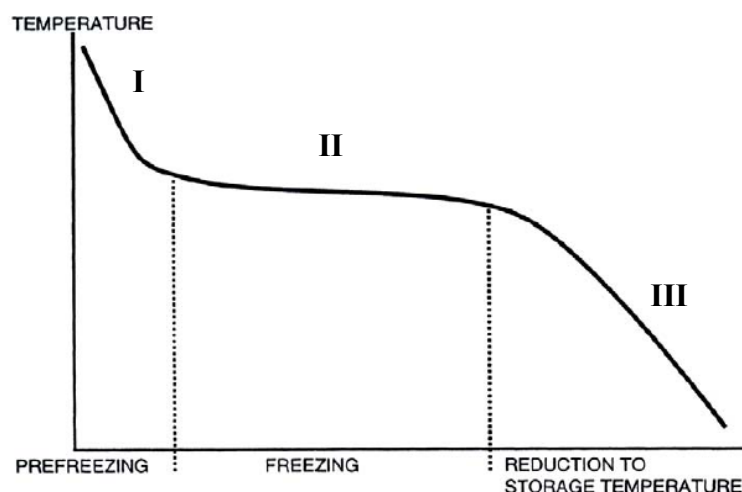
เนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชเนื้อผสมนั้น Ding *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวแช่เย็นที่มีปริมาณแอมิโลส 4 ระดับคือ แอมิโลสสูง, ปานกลาง, ต่ำ และต่ำมาก พบว่าเจลสตาร์ชข้าวแอมิโลสต่ำมากจะมีค่าความแข็ง (hardness) ต่ำที่สุด รองลงมาคือ เจลสตาร์ชข้าวแอมิโลสต่ำ, ปานกลาง, และสูง ตามลำดับ และเมื่อทำการผสมสตาร์ชแอมิโลสต่ำ, ปานกลาง, และสูง กับสตาร์ชข้าวแอมิโลสต่ำมากในอัตราส่วน 75:25 พบว่าสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ โดยที่เจลเนื้อผสมของสตาร์ชข้าวแอมิโลสต่ำกับสตาร์ชข้าวแอมิโลสต่ำมาก และเจลเนื้อผสมของสตาร์ชข้าวแอมิโลสปานกลางกับสตาร์ชข้าวแอมิโลสต่ำมาก มีค่าความแข็งลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเจลเนื้อผสมของสตาร์ชข้าวแอมิโลสสูงกับสตาร์ชข้าวแอมิโลสต่ำมาก มีค่าความแข็งลดลงเล็กน้อย

5. การแช่เยือกแข็ง

5.1. กระบวนการแช่เยือกแข็ง

หลักพื้นฐานในการแช่เยือกแข็ง คือ การลดอุณหภูมิของอาหารหรือผลิตภัณฑ์ให้ต่ำลงจนถึงระดับที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถจะดำเนินปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่อไปได้ โดยทั่วไปมักจะเป็นที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า หลักสำคัญคือ การเปลี่ยนสถานะของน้ำในอาหารที่เป็นของเหลวให้เป็นน้ำแข็ง เพื่อมิให้น้ำนั้นสามารถทำหน้าที่ต่างๆในปฏิกิริยาเคมี (สายสนม, 2546)

การแช่เยือกแข็งเป็นวิธีการเก็บรักษาอาหารที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย วิธีการแช่เยือกแข็งนี้สามารถรักษากลิ่น รส สี และคุณค่าทางอาหาร รวมถึงลักษณะเนื้อสัมผัส (texture) เมื่อทำการแช่เยือกแข็งอาหารด้วยวิธีที่ถูกต้อง (รุ่งนภา, 2549) นอกจากนี้คุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายประการ เช่น องค์ประกอบของวัตถุดิบ พื้นที่ผิวของอาหาร การเตรียมวัตถุดิบก่อนการแช่เยือกแข็ง วิธีการแช่เยือกแข็ง อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิการเก็บรักษาเป็นต้น (ไพบูลย์, 2532)

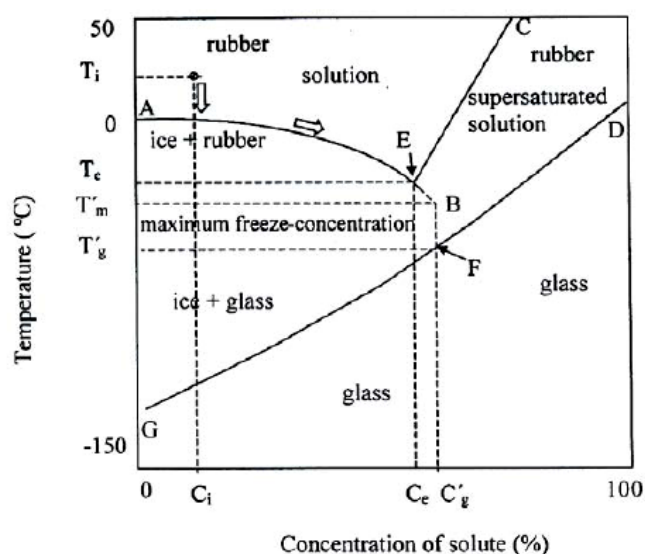


ภาพที่ 10 แผนภาพแสดงขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง

ที่มา: Heldman and Taylor (1997)

ขั้นตอนการแช่เยือกแข็งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นช่วงก่อนเข้าสู่การแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิเกิดผลึกน้ำแข็ง (freezing point) โดยน้ำในระบบจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลึกน้ำแข็ง ช่วงที่ 2 คือ ช่วงการแช่เยือกแข็ง และช่วงที่ 3 คือ ช่วงการลดอุณหภูมิไปจนถึงอุณหภูมิในการเก็บรักษาซึ่งจะเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิที่เกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุดไปจนถึงอุณหภูมิที่ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานความร้อน (Persson and Londahl, 1993) ซึ่งแผนภาพการแช่เยือกแข็งดังแสดงในภาพที่ 10

กระบวนการแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการตกผลึกน้ำแข็งซึ่งมีขั้นตอนการเกิดที่สำคัญ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการก่อผลึกนิวเคลียส (nucleation) และการเติบโตของผลึก (propagation or crystal growth) (George, 1997; Goff, 1997) โดยการเปลี่ยนแปลงระหว่างการแช่เยือกแข็งเกี่ยวข้องกับ การเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างสภาพอสัณฐาน (amorphous state) ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่สมดุล (non equilibrium state) ระบบยังเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในโครงสร้างตลอดเวลา กับสภาวะ กลาส (glassy state) ซึ่งเป็นสภาวะที่ระบบมีความหนืดสูง โมเลกุลต่าง ๆ ภายในระบบจึงเคลื่อนที่ และเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้น้อยลง (Goff, 1997; Roos and Karel, 1991)



ภาพที่ 11 แผนภาพสภาวะการเปลี่ยนแปลงในระบบแช่เยือกแข็ง

ที่มา: Chanes *et al.* (2004)

แผนภาพสภาวะการเปลี่ยนแปลงในระบบแช่เยือกแข็งจะเกี่ยวข้องกับ อุณหภูมิในระหว่างการแช่เยือกแข็ง และความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในภาพที่ 11 โดยเส้น AB คือเส้นกราฟการแช่เยือกแข็ง เส้น CE คือ เส้นกราฟการละลาย จุด E คือ จุดยูเทกติก (eutectic point) เส้น DFG คือ เส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงสู่สภาวะกลาส (glass transition) (Chanes *et al.*, 2004) เหนือเส้น DFG ระบบจะอยู่ในช่วงสภาวะรับเบอรี (rubbery state) ซึ่งการเปลี่ยนจากสภาวะกลาสไปสู่สภาวะรับเบอรีนี้จะทำให้ความหนืดของระบบลดลงอย่างมาก (Christel *et al.*, 1995) เพราะสภาวะรับเบอรีนี้ระบบจะมีพลังงานเพิ่มขึ้น โมเลกุลจึงมีการเคลื่อนไหว ทำให้เกิดนิเวศของผลึกและมีการโตของผลึก จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเกิดการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และได้เส้น DFG ระบบจะอยู่ในช่วงสภาวะกลาส (glassy state) ซึ่งเป็นสภาวะที่ระบบมีความหนืดสูง โมเลกุลต่าง ๆ ภายในระบบจึงเคลื่อนที่และเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ลดน้อยลง (Roos, 1995)

5.2. อัตราการแช่เยือกแข็ง

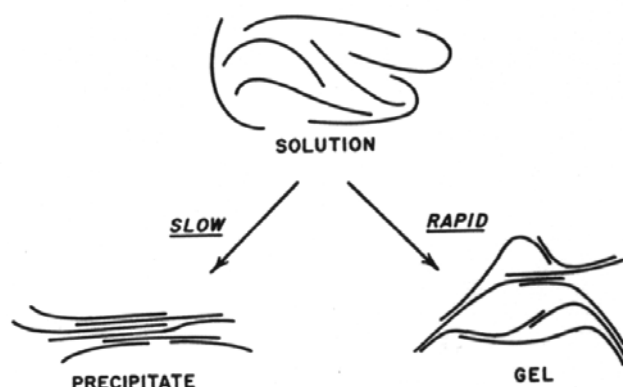
อัตราการแช่เยือกแข็งกำหนดเป็น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของการแช่เยือกแข็งต่อระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งมีหน่วยเป็น อุณหภูมิต่อระยะ

เวลาหรืออาจกำหนดเป็นระยะทางการเกิดผลึกน้ำแข็งที่เคลื่อนที่เข้าไปจากผิวนอกของผลิตภัณฑ์ต่อระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งมีหน่วยเป็นระยะทางต่อเวลา (Heldman and Taylor, 1997; Persson and Londahl, 1993) International Institute of Refrigeration (IIR) ได้กำหนดอัตราการแช่เยือกแข็งไว้เป็นการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีค่าเท่ากับ 0.2-0.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมงซึ่งทำโดยการแช่เยือกแข็งในห้องเย็น แบบเร็วเท่ากับ 0.5-3 เซนติเมตรต่อชั่วโมงโดยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า (airblast freezers) หรือแบบแผ่นทำความเย็น (plate freezers) แบบรวดเร็วเท่ากับ 5-10 เซนติเมตรต่อชั่วโมงและแบบรวดเร็วมากเท่ากับ 10-100 เซนติเมตรต่อชั่วโมง (Ferrero *et al.*, 1990)

อัตราการแช่เยือกแข็งมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งคือ ขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ได้จะขึ้นอยู่กับอัตราการแช่เยือกแข็ง โดยการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะช่วยเร่งการก่อนิวเคลียสผลึก และช่วยลดการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง ดังนั้นผลึกของน้ำแข็งที่ได้จึงมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (MacDonald and Lanier, 1997)

5.3. การเปลี่ยนแปลงของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนและน้ำที่เพียงพอ เม็ดสตาร์ชจะเกิดเจลาทิไนเซชัน ซึ่งมีผลทำให้สตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพในระหว่างแช่เยือกแข็งได้ง่ายขึ้น การเปลี่ยนแปลงระหว่างการแช่เยือกแข็งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่พึงประสงค์ การเปลี่ยนแปลงนี้ประกอบด้วย ผลิตภัณฑ์จะมีความข้นเพิ่มขึ้น เกิดโครงสร้างที่แข็งกระด้าง เจลเกิดความแข็งขึ้น และเกิดการแยกตัวของน้ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชเคลื่อนที่มาจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเรียกว่าการเกิด “รีโทรเกรเดชัน” โดยที่โมเลกุลของสตาร์ชเชิงเส้นจะมีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันได้สูงกว่าโมเลกุลของสตาร์ชเชิงกิ่ง นอกจากนี้ยังพบว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชเชิงเส้นมีความสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของสตาร์ช ถ้าระบบสตาร์ชมีความเข้มข้นต่ำพบว่าสตาร์ชเชิงเส้นจะเรียงตัวกันช้า ตกตะกอนรวมกัน ทำให้เกิดการเรียงตัวแน่น และเกิดเป็นเพสต์ (paste) แต่ระบบของสตาร์ชที่มีความเข้มข้นสูงกว่าพบว่าสตาร์ชจะเรียงตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดลักษณะเป็นเจล ดังนั้นระดับความเข้มข้นของสตาร์ชมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งระหว่างการเก็บรักษาโดยที่ถ้ามีความเข้มข้นของสตาร์ชสูงมากจะยังเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างการแช่เยือกแข็งได้เร็ว (Schoch, 1968) ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ซเชิงเส้น

ที่มา: Schoch (1968)

การศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ซแต่ละชนิดในปัจจุบันมักทำโดยการเก็บรักษาเจลสตาร์ซที่อุณหภูมิเดียวกันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (isothermal treatment) หรือการเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการหาสมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw cycle process, FTC process) ทำโดยการแช่เยือกแข็งและทำละลายเจลสตาร์ซที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซ้ำไปมาหลาย ๆ รอบ (Biliaderis, 1998; Jacobson and BeMiller, 1998) จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาอัตราและปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การหาร้อยละการแยกออกของน้ำโดยวิธีการหมุนเหวี่ยง (centrifugation method) (Charoenrein *et al.*, 2008), และการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Ding *et al.*, 2005) นอกจากนี้ยังอาจใช้ข้อมูลจากการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Arunyanart and Charoenrein, 2008a) เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ดังกล่าวได้อีกด้วย

การเปลี่ยนแปลงของเจลสตาร์ซแช่เยือกแข็งระหว่างการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็ง เช่น การแยกออกของน้ำและการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส เป็นผลมาจากปริมาณแอมิโลสของสตาร์ซหรือแป้งนั้นๆ ซึ่ง Varavinit *et al.* (2002) ได้ตรวจสอบความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลที่เตรียมจากแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกัน คือ แป้งข้าวแอมิโลสสูง, แป้งข้าวแอมิโลสต่ำ และแป้งข้าวแอมิโลสต่ำมาก (แป้งข้าวเหนียว) ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 28, 18 และ 5 ตามลำดับ โดยพบว่าปริมาณแอมิโลสมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน ถ้าปริมาณแอมิโลสยิ่งสูงจะยิ่งทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันมากขึ้น เป็นผลทำให้เจลสตาร์ซแช่เยือกแข็งหลังการคืนรูปมีเนื้อสัมผัสหยาบและเกิดการแยกออกของน้ำมากที่สุด เนื่องมาจากแอมิโลสมีลักษณะเป็นเชิง

เส้น แต่แอมิโลเพกทินมีลักษณะความเป็นกึ่งก้านสูง การจัดเรียงตัวเป็นผลึกของของสายโซ่โมเลกุลแอมิโลเพกทินจึงเกิดได้ยาก ดังนั้นจึงเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำกว่า

การแช่เยือกแข็งและการทำละลาย (freeze-thaw) สามารถชักนำให้เกิดการแยกออกของน้ำและการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ได้ ซึ่งการเติมไฮโดรคอลลอยด์สามารถลดการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ได้ แต่กลไกการลดการทำลายจากขนาดผลึกน้ำแข็งยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน โดยผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อการแช่เยือกแข็งและการทำละลายขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด รูปร่าง โมเลกุล และปัจจัยจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ความแข็งแรงของไอออน (ionic strength) ของเจลดวียเช่นกัน (Lee *et al.*, 2002)

มีงานวิจัยหลายชิ้นที่นำไฮโดรคอลลอยด์มาใช้ในการลดการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชระหว่างการแช่เยือกแข็ง เช่น การใช้แซนแทนกัมในการลดการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชข้าวโพดแช่เยือกแข็ง (Ferrero and Zaritzky, 2000) การใช้แซนแทนกัมในการลดการเปลี่ยนแปลงของเจลดสตาร์ชมันสำปะหลังแช่เยือกแข็ง (Muadklay and Charoenrein, 2008) และการใช้คอนยัคคูลูโคแมนแนนในการลดการเปลี่ยนแปลงของเจลดสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็ง (อรรณ และ สงวนศรี, 2549) จากการทดลองพบว่าไฮโดรคอลลอยด์สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในเจลดสตาร์ชแช่เยือกแข็งได้

นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ หลายชนิดในเจลดสตาร์ชชนิดเดียวกัน จากการศึกษาของ Lee และคณะ (2002) พบว่าการใช้กัมพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดต่างๆ เช่น กัวร์กัม, อัลจิเนต และแซนแทนกัมในเจลดสตาร์ชมันเทศแช่เยือกแข็ง สามารถเพิ่มความคงตัวของระบบ เจลดสตาร์ชมันเทศแช่เยือกแข็งได้ เมื่อทำการการแช่เยือกแข็งและทำละลายซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง พบว่ากัวร์กัมสามารถทำให้ระบบมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้ดีที่สุด (freeze-thaw stability) รองลงมาคือ อัลจิเนตจะมีผลในการชะลอการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่โมเลกุลสตาร์ช (starch recrystallization) ในระหว่างการแช่เยือกแข็งและทำละลายได้ และรองลงมาคือ แซนแทนกัม โดยกัวร์กัมและอัลจิเนตจะเพิ่มความหนืดของระบบ แต่แซนแทนกัมจะลดความหนืดของระบบ

กลไกการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันนี้อาจเกิดจากโมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์เข้าไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของแอมิโลสที่แยกออกมาจากเม็ดสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งมีผู้สันนิษฐานไว้ 2 แบบคือ อาจเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชและโมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์ (Christianson *et al.* 1981; Shi and BeMiller, 2002)

หรือเกิดจากโมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชโดยไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีโอกาสมาจับกันลดน้อยลง (Chaisawang and Supphantharika, 2005; Mandala *et al.*, 2002)

นอกจากนี้ยังสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในระบบเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้โดยการเติมน้ำตาล ซึ่งสามารถลดการเกิดการแยกออกของน้ำ ลดขนาดของรูพรุนที่เกิดจากการทำลายของผลึกน้ำแข็งได้ และทำให้โครงสร้างทางกายภาพจากการคูด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านดีขึ้น Aranyanart และ Charoenrein (2008a) พบว่าการใช้น้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20 สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งได้ โดยน้ำตาลซูโครสจะไปมีผลทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถแข็งตัวได้ในระบบลดลง (freezable water) จึงสามารถลดขนาดของรูพรุนที่เกิดจากการทำลายของผลึกน้ำแข็งและทำให้ผนังรอบรูพรุนมีความหนาแน่นขึ้น นอกจากนี้ยังมีน้ำตาลไรโบส ไซโลส กลูโคส ฟรักโทส และมอลโทส ก็สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในเจลสตาร์ชข้าวได้เช่นกัน (Lii *et al.*, 1998)

การตรวจวัดความเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชสามารถตรวจวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer) หรือเครื่องมืออื่นๆ ที่ออกแบบมาให้ประยุกต์ใช้กับเทคนิคนี้ได้ โดยเทคนิคที่นิยมใช้ตรวจวัดมากคือ Texture Profile Analysis (TPA) ซึ่งเทคนิคนี้เป็นวิธีทดสอบที่เลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ โดยเครื่องจะทำการกดลงบนตัวอย่างติดต่อกัน 2 ครั้ง ซึ่งเครื่องจะรายงานเป็นค่าตัวแปรทางเนื้อสัมผัสที่สัมพันธ์กับคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส (ธงชัย, 2549) เช่น ค่าความแข็ง (hardness) ซึ่งได้จากแรงกดสูงสุดของการกดตัวอย่างครั้งแรก สามารถนำมาเป็นค่าบ่งชี้การเกิดรีโทรเกรเดชันและการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งได้

Ding *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวแช่เย็นที่เก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส และเป็นระยะเวลา 3 และ 7 วัน โดยวัดค่าความแข็งของเจลสตาร์ชเพื่อเป็นตัวชี้วัดการเกิดรีโทรเกรเดชัน จากการทดลองพบว่าเจลสตาร์ชข้าวแอมิโลสต่ำมากจะมีค่าความแข็งต่ำที่สุด รองลงมาคือ เจลสตาร์ชข้าวแอมิโลสต่ำ, ปานกลาง, และสูง ตามลำดับ และเมื่อทำการผสมสตาร์ชข้าวแอมิโลสต่ำมากกับสตาร์ชชนิดอื่นๆ ในอัตราส่วน 25:75 พบว่าเจลสตาร์ชมีค่าความแข็งลดลง

อรรวรรณ และ สงวนศรี (2549) พบว่าการเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนในระบบเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งสามารถลดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสที่แข็งขึ้นระหว่างการเก็บรักษาได้ โดยการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถลดค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้

ดีกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า เนื่องจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้ระบบผ่านอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของระบบไปได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการเกิดรีโทรเกรดชันของแอมิไลสจึงลดต่ำลง โดยสภาวะที่ดีที่สุดในการทดลอง คือ การผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 ร่วมกับการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

Aranyanart and Charoenrein (2008b) ได้ทำการศึกษาเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมซูโครสหรือไซลิทอลร่วมกับการใช้คอนยัคกลูโคแมนแนน ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษา หลังจากนำตัวอย่างมาคืนรูปจากเยือกแข็ง พบว่าการใช้น้ำตาลซูโครสร่วมกับคอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถลดค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวระหว่างการเก็บรักษาได้ แต่ในทางตรงกันข้ามการใช้น้ำตาลไซลิทอลร่วมกับคอนยัคกลูโคแมนแนนจะไปเพิ่มค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าว

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

- 1.1. สตาร์ชข้าว (Rice Starch, Food grade) ของบริษัท อุตสาหกรรมแป้งไทย จำกัด
- 1.2. สตาร์ชมันสำปะหลัง (Tapioca Starch, Food grade) ของบริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช
- 1.3. แป้งข้าวเหนียว (Waxy Rice Flour, Food grade) ของบริษัท โรงเส้นหมีขอสง จำกัด

2. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.1. เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเตรียมเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งและการคืนรูป
 - 2.1.1. เครื่องกวนที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ (High torque stirrer, Ingenieurburo CAT, M.Zip รุ่น R50D, Germany)
 - 2.1.2. หลอดขนาด 25 มิลลิลิตร
 - 2.1.3. หม้อนึ่ง
 - 2.1.4. อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิได้ (Mettmert, รุ่น WB22, Germany)
 - 2.1.5. ตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิต่ำ (low temperature incubator)
 - 2.1.6. ตู้แช่เยือกแข็ง (Sanyo refrigerator, model SF-C1497)
 - 2.1.7. เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไครโอเจนิก (cryogenic freezer) (รุ่น Mini Batch Freezer 1000L, Bangkok Industrial Gas Co., Ltd.)
 - 2.1.8. สายเทอร์มอคัปเปิล (thermocouple) และเครื่องบันทึกข้อมูล (data-logger)
 - 2.1.9. แผ่นความร้อน (hot plate)
 - 2.1.10. ขวดสีชาขนาด 500 มิลลิลิตร
 - 2.1.11. พาราฟิล์ม (parafilm)
 - 2.1.12. ก่อ้งโฟม

2.2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพ

- 2.2.1. ตู้อบแบบลมร้อน (Hot air Oven, Memmert รุ่น ULE 500, Germany)
- 2.2.2. เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (Kjeldahl apparatus, Buchi)
- 2.2.3. เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Tecator รุ่น Soxtec system HT)
- 2.2.4. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace, Gallenkamp รุ่น FSE-261-210D)
- 2.2.5. สเปกโตรโฟมิเตอร์ (Spectrophotometer, Thermo scientific รุ่น Spectronic Biomate 3, Genesys 10)
- 2.2.6. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC, Pyris1 Perkin-Elmer, USA)
- 2.2.7. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge CN-1050, MRC Ltd., Holon, Israel)
- 2.2.8. เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis, Stable Micro System รุ่น TA XT2, UK)
- 2.2.9. เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA3D, Newport Scientific Instrument & Engineering, Australia)
- 2.2.10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, JSM-5600LV, JEOL, England).
- 2.2.11. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Scaltec รุ่น SPB31)
- 2.2.12. อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3. สารเคมี

3.1. สารเคมีสำหรับวิเคราะห์แอมิโลส

- 3.1.1. เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 (Absolute ethanol , Analytical grade, Merck, Germany)
- 3.1.2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, Analytical grade, Merck, Germany)
- 3.1.3. กรดแอซิกกลั่น (Acetic acid 100%, Analytical grade, Merck, Germany)
- 3.1.4. แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (Amylose from potato starch, Analytical grade, Sigma, USA)

3.1.5. แอมิโลเพกทินบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (Amylopectin from potato starch, Analytical grade, Sigma, USA)

3.1.6. ไอโอดีน (Iodine, Analytical grade, Merck, Germany)

3.1.7. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, Analytical grade, Merck, Germany)

3.2. สารเคมีสำหรับวิเคราะห์โปรตีน

3.2.1. กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 95-97 (Sulfuric acid 95-97%, Analytical grade, Merck, Germany)

3.2.2. คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper (II) sulfate pentahydrate, Analytical grade, Merck, Germany)

3.2.3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, Analytical grade, Merck, Germany)

3.2.4. กรดบอริก (Boric acid, Analytical grade, Merck, Germany)

3.2.5. โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulfate, Analytical grade, Merck, Germany)

3.2.6. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid fuming 37%, Analytical grade, Merck, Germany)

3.2.7. เมทิลเรด (Methy red, Analytical grade, Ajax Finechem, Australia)

3.2.8. โบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol green, Analytical grade, Ajax Finechem, Australia)

3.3. สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ไขมัน ได้แก่ ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether, Analytical grade, Mallinckrodt, Paris, KY)

3.4. สารเคมีสำหรับวิเคราะห์สมบัติการพองตัว ได้แก่ บลูเดกซ์แทรน (blue dextran, Analytical grade, Sigma, USA)

วิธีการ

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของแป้งและสตาร์ช (ภาคผนวก ก)

1.1. การวิเคราะห์องค์ประกอบของสตาร์ชข้าวเจ้า, สตาร์ชมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียว

- 1.1.1. ความชื้น ตามวิธีการของ AACC (2000)
- 1.1.2. ปริมาณแอมิโลส คัดแปลงจากวิธีการของ Hoover *et al.* (2001)
- 1.1.3. ปริมาณโปรตีน คัดแปลงจากวิธีการของ AACC (2000)
- 1.1.4. ปริมาณไขมัน คัดแปลงจากวิธีการของ AACC (2000)
- 1.1.5. ปริมาณเถ้า ตามวิธีการของ AACC (2000)

1.2. การวิเคราะห์สมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า, สตาร์ชมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียว

1.2.1. ค่าแฟกเตอร์การพองตัวของเม็ดสตาร์ช (คัดแปลงจากวิธีการของ Tester and Morrison, 1990)

ชั่งแป้งหรือสตาร์ชจำนวน 200 มิลลิกรัม ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งลงในหลอดที่มีฝาเกลียวปิดขนาด 10 มิลลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจำนวน 5 มิลลิตร นำหลอดที่ปิดฝาแล้วไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 30 นาที โดยกำหนดอุณหภูมิเป็น 50, 60, 70, 80 หรือ 90 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเขย่าทุกๆ 5 นาที เมื่อครบกำหนดเวลา นำหลอดมาทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วในอ่างน้ำแข็งจนอุณหภูมิลดลงถึง 20 องศาเซลเซียส เติมน้ำละลายยาลูกเดือย (blue dextran) เข้มข้น 5 มิลลิกรัม/มิลลิตร จำนวน 0.5 มิลลิตร และผสมให้เข้ากัน นำหลอดไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 x g เป็นเวลา 15 นาที แล้วดูดส่วนใสวัดค่าการดูดกลืนแสงของหลอดที่มีตัวอย่างเป็น A_S และของหลอดที่ไม่มีการใส่ตัวอย่างแป้งเป็น A_R ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร นำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาแฟกเตอร์การพองตัว (swelling factor, SF) ตามสูตร

$$SF = 1 + ((7,700/W)((A_S - A_R)/A_S))$$

1.2.2. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด (AACC, 2000)

2. การศึกษาหาระบบการผสมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงคุณภาพเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

2.1. วิธีการเตรียมเจลสตาร์ชแบบระบบอัตราส่วน (ratio)

เตรียมซัสเพนชันสตาร์ชที่มีความเข้มข้นสตาร์ชผสมทั้งหมดเป็นร้อยละ 8 (น้ำหนักแห้ง) โดยมีอัตราส่วนระหว่างสตาร์ชข้าวเจ้าต่อสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว เป็น 8:0 และ 6:2 แล้วนำไปคนกวนให้ระบบเข้ากัน แล้วจึงนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิได้ที่อุณหภูมิ 80 °ซ หลังจากนั้นแบ่งถ่ายใส่ในหลอด แล้วนำไปนึ่งนาน 9 นาที หลังจากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิต่ำอุณหภูมิ 25 °ซ เป็นเวลา 2 ชม. จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติความคงตัว (freeze-thaw stability) ตามวิธีในข้อ 5.1 ดังจะกล่าวต่อไป เพื่อหาระบบที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง ซึ่งจะนำไปศึกษาต่อในข้อ 3-6

2.2. วิธีการเตรียมเจลสตาร์ชแบบระบบการเติม (starch addition)

เตรียมซัสเพนชันสตาร์ชข้าว (rice starch suspension) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) หลังจากนั้นเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0, และ 2 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) แล้วนำไปคนกวนให้ระบบเข้ากัน แล้วจึงนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิได้ที่อุณหภูมิ 80 °ซ หลังจากนั้นแบ่งถ่ายใส่ในหลอด แล้วนำไปนึ่งนาน 9 นาที หลังจากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิต่ำอุณหภูมิ 25 °ซ เป็นเวลา 2 ชม. จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติความคงตัว (freeze-thaw stability) ตามวิธีในข้อ 5.1 ดังจะกล่าวต่อไป เพื่อหาระบบที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง ซึ่งจะนำไปศึกษาต่อในข้อ 3-6

3. การศึกษาผลของการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนการแช่เยือกแข็ง

3.1. ศึกษาผลของการเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียวต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของระบบสตาร์ชข้าวเจ้า (ภาคผนวกที่ ก6)

เตรียมซัสเพนชันสตาร์ชข้าว (rice starch suspension) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) หลังจากนั้นเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyzer) (ดัดแปลงจากวิธีของ Funami *et al.*, 2005)

3.2. ศึกษาผลของการเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียวต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า

เตรียมตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าว (rice starch suspension) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) ที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) ตามวิธีในข้อ 4.1 แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ด้วยวิธี Texture Profile Analyzer โดยใช้หัววัด P/100 (ดัดแปลงจากวิธีของ Yoshimura *et al.*, 1996) ตามวิธีในข้อ 6.2

4. การเตรียมเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง

4.1. การเตรียมเจลสตาร์ช (ดัดแปลงจากวิธีของ Charoenrein *et al.*, 2008)

เตรียมซัสเพนชันสตาร์ชข้าว (rice starch suspension) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) หลังจากนั้นเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) แล้วนำไปคนกวนให้ระบบเข้ากัน แล้วจึงนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิได้ที่อุณหภูมิ 80 °ซ หลังจากนั้นแบ่งถ่ายใส่ในหลอด แล้วนำไปนึ่งนาน 9 นาที หลังจากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 25 °ซ เป็นเวลา 2 ชม.

4.2. การแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าว

นำเจลสตาร์ชข้าวเจ้าและเจลสตาร์ชผสมที่เตรียมได้จากข้อ 4.1 ไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง 2 ระดับ คือ แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเร็ว ด้วยเครื่องไครโอจินิกที่อุณหภูมิ -20°C ($0.49^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) และ -80°C ($3.7^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) ตามลำดับ จนอุณหภูมิสุดท้ายของตัวอย่างเป็น -20°C จากนั้นนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C องศาเซลเซียส (ตัวอย่างข้อมูลการแช่เยือกแข็งดังภาพผนวกที่ ข1 และ ข2)

4.3. การคืนรูปจากเยือกแข็ง (thawing)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งมาทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง โดยการนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากพิมพ์ แล้วนำไปตรวจสอบสมบัติต่างๆ ในข้อ 5

5. การศึกษาความเข้มข้นของสตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว ต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

5.1. ศึกษาสมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (ดัดแปลงจากวิธีของ Charoenrein *et al.*, 2008)

นำเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า จากข้อ 4.2 ไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็ง (ดังข้อ 4.3) สุ่มตัวอย่างออกมาจำนวน 5 หลอด (ตัวอย่างที่เหลือนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C องศาเซลเซียสต่อไป ทำซ้ำเช่นเดิมจนครบ 5 รอบ)

นำตัวอย่างที่สุ่มได้้ออกจากพิมพ์ แล้วนำตัวอย่างเจลสตาร์ชใส่ในหลอดที่มีกระดาษกรองวางอยู่ข้างใน เพื่อให้แยกส่วนของเหลวออกจากเจล นำหลอดไปหมุนเหวี่ยงแยกที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที นาน 15 นาที แล้วชั่งน้ำหนักน้ำที่แยกออกจากเจล นำไปคำนวณหาค่าร้อยละการแยกออกของน้ำตามสูตร

$$\text{ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำที่ถูกเหวี่ยงแยกออกมา}}{\text{น้ำหนักของเจลเริ่มต้นก่อนการเหวี่ยง}} \times 100$$

5.2. การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค (microstructure) ของสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า จากข้อ 4.2 ที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 และ 5 รอบ มาขจัดน้ำออกจากตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ในเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 50, 70, 90 และเอทิลแอลกอฮอล์ส่วนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงตามลำดับ แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งจุดวิกฤต (critical point dryer) จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

6. การศึกษาผลของการเติมของสตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว อัตราการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง ระยะเวลาการเก็บรักษาของต่อคุณภาพของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

6.1. การตรวจสอบค่าร้อยละการแยกออกของน้ำของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษา (ดัดแปลงจากวิธีของ Charoenrein *et al.*, 2008)

นำเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 ระดับ จากข้อ 4.2 ไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 10, 20, 40 และ 60 วัน (ชุดละ 5 ตัวอย่าง) มาทำการคืนรูปจากเยือกแข็งโดยนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างเจลสตาร์ชใส่ในหลอดที่มีกระดาษกรองวางอยู่ข้างใน เพื่อให้แยกส่วนของเหลวออกจากเจล นำหลอดไปหมุนเหวี่ยงแยกที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที นาน 15 นาที แล้วชั่งน้ำหนักน้ำที่แยกออกจากเจล จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าร้อยละการแยกออกของน้ำตามสูตรในข้อ 5.1

6.2. การตรวจสอบเนื้อสัมผัส ของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษา (ดัดแปลงจากวิธีของ Yoshimura *et al.*, 1998)

นำเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 ระดับ จากข้อ 3.2 ไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 10, 20, 40 และ 60 วัน (ชุดละ 5 ตัวอย่าง) มาทำการคืนรูปจากเยือกแข็งโดยนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาตัดให้มีคามสูง 20 มิลลิเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร) จากนั้นนำไปตรวจสอบเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) ด้วยวิธี Texture Profile Analysis โดยใช้หัววัด P/100 กดตัวอย่างด้วยความเร็ว

0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยกดเจลให้มีระดับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation level) ร้อยละ 40 จากความสูงดั้งเดิมของเจล อ่านค่าความแข็งของเจล (hardness) จากแรงสูงสุด (maximum force)

6.3. การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค (microstructure) ของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษา ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

นำเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 ระดับ จากข้อ 3.2 ไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 10, 20, 40 และ 60 วัน มาทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง และนำไปขจัดน้ำออกจากตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ในเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 50, 70, 90 และเอทิลแอลกอฮอล์ล้วนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงตามลำดับ แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งจุลวิฤต จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

7. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design: CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการทดลองเปรียบเทียบสมบัติด้านต่าง ๆ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS (version 12.0) ถ้ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจะนำมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple's Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์

ระบบของอาหารพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็งที่ใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ลอดช่อง ขนมเปียกปูน ขนมกล้วย มักใช้แป้งข้าวเจ้าที่มีปริมาณแอมิโลสในระดับปานกลางถึงสูง และปัญหาสำคัญที่มักเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็งเหล่านี้คือ ในระหว่างการเก็บรักษาโดยการแช่เยือกแข็ง และนำมาคืนรูปจากเยือกแข็ง (thawing) จะเกิดการแยกตัวของน้ำ (syneresis), เกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช และเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของอาหาร โดยเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำขึ้น เป็นเหตุให้อาหารแช่เยือกแข็งเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพ (Lee *et al.*, 2002; Ferrero and Zaritzky, 2000; Rahman, 1999) ได้มีผู้วิจัยหลายท่านใช้การศึกษาในเจลสตาร์ช ข้าวแช่เยือกแข็งเป็นแบบจำลองแทนระบบของอาหารแช่เยือกแข็งที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้วมักนำสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของเจล สตาร์ชแช่เยือกแข็งร่วมกับการเพิ่มอัตราการใช้แป้งข้าวเจ้า (Ferrero *et al.*, 1994; Ferrero and Zaritzky, 2000; Funami *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2002) อย่างไรก็ตามสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้มักมีราคาแพง

ในเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งพบว่าการปรับสัดส่วนแอมิโลเพกทินในระบบให้สูงขึ้นสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชได้ (Ding *et al.*, 2005) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการทำให้ระบบมีปริมาณแอมิโลเพกทินสูงขึ้น โดยเติมแป้งหรือสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลเพกทินสูงลงในระบบ (starch addition) เพื่อลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็ง ซึ่งยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้มาก่อน

1. องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของวัตถุดิบ

1.1. องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

สตาร์ชข้าวเจ้า (RS) สตาร์ชมันสำปะหลัง (TS) และแป้งข้าวเหนียว (WF) ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นสตาร์ชและแป้งทางการค้ามีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 โดยสตาร์ชข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณแอมิโลส ร้อยละ 37.50 และ 4.11 ตามลำดับ ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงและข้าวเหนียวตามลำดับ (Juliano, 1992) ส่วนสตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 17.13 จากรายงานของ Singh *et al.* (2000) ได้ทำการทดลองสกัดสตาร์ชข้าวจากข้าวพันธุ์อินดิกา (Indica) ซึ่งจัดเป็นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง พบว่าองค์ประกอบทางเคมี

ได้แก่ แอมิโลส โปรตีน ไขมัน และเถ้า ของสตาร์ชข้าวที่สกัดได้มีค่าเท่ากับร้อยละ 34.60, 0.45, 0.08 และ 0.22 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างจากที่วิเคราะห์ได้ในการทดลองนี้เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการสกัดที่ต่างกัน (Lumdubwong and Seib, 2000) สำหรับปริมาณองค์ประกอบของสตาร์ชมันสำปะหลังนั้น Sriroth *et al.* (1999) รายงานว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง 4 พันธุ์ได้แก่ ระยะเวลา 1, ระยะเวลา 60, ระยะเวลา 90, และเกษตรศาสตร์ 50 มีแอมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 14-28 โปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 0.15-0.30 ไขมันประมาณร้อยละ 0.01 เถ้าร้อยละ 0.08-0.15 และฟอสฟอรัสร้อยละ 2.04-2.45 ซึ่งมีความแตกต่างจากที่วิเคราะห์ได้ในการทดลองนี้เล็กน้อย โดยปริมาณที่แตกต่างกันอาจเกิดจากพันธุ์ อายุ ฤดูกาลการเก็บเกี่ยว และวิธีที่ใช้ในการสกัด (Moorthy, 2002) และในส่วนขององค์ประกอบของแป้งข้าวเหนียวนั้น Varavinit *et al.* (2002) ได้ทำการทดลองโดยใช้แป้งข้าวเหนียวเชิงการค้า และได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบ พบว่ามีปริมาณ แอมิโลส โปรตีน ไขมัน และเถ้าเท่ากับ ร้อยละ 5, 7.78, 0.37 และ 0.24 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างจากที่วิเคราะห์ได้ในการทดลองนี้เล็กน้อย

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว, สตาร์ชมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียว

(หน่วย: ร้อยละ โดยน้ำหนักแห้ง)

องค์ประกอบ	สตาร์ชข้าวเจ้า	สตาร์ชมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเหนียว
ความชื้น*	12.56 ± 0.01	12.69 ± 0.01	11.69 ± 0.01
แอมิโลส**	37.50 ± 0.63	17.13 ± 0.60	4.11 ± 0.08
โปรตีน*	0.62 ± 0.03	0.03 ± 0.00	6.99 ± 0.02
ไขมัน**	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.00	0.25 ± 0.05
เถ้า*	0.21 ± 0.03	0.1 ± 0.06	0.24 ± 0.02

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

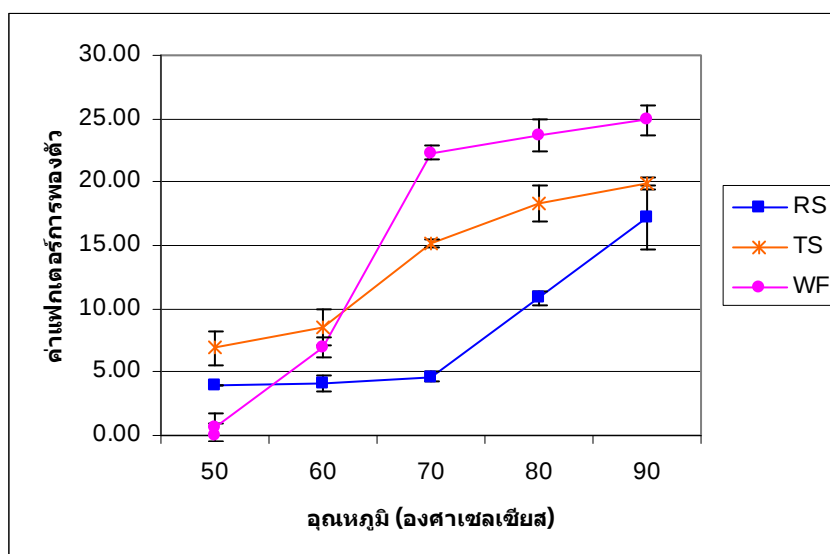
1.2. สมบัติด้านต่างๆ ของวัตถุดิบ

ค่าแฟกเตอร์การพองตัว (swelling factor, SP) ของตัวอย่างแป้งและสตาร์ชดังแสดงในภาพที่ 13 พบว่าที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส สตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าแฟกเตอร์การพองตัวเท่ากับ

4.01, 4.09 และ 4.64 ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 และ 90 องศาเซลเซียส ค่าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 10.85 และ 17.22 ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิช่วง 70-90 องศาเซลเซียสน่าจะเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้า

ส่วนสตาร์ชมันสำปะหลัง ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ค่าแฟกเตอร์การพองตัวมีค่าเท่ากับ 7.69 และ 7.74 ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70 องศาเซลเซียส ค่าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 15.18 ซึ่งอุณหภูมิช่วง 60-70 องศาเซลเซียสน่าจะเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชมันสำปะหลัง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 และ 90 องศาเซลเซียส ค่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 18.34 และ 19.91 ตามลำดับ ซึ่งโดยทั่วไปสตาร์ชมันสำปะหลังจะเกิดเจลลาติโนเซชันในช่วง 58-70 องศาเซลเซียส (Moorthy, 1985)

ส่วนแป้งข้าวเหนียว ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าแฟกเตอร์การพองตัวมีค่าเท่ากับ 0.69 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชชนิดอื่นๆ สันนิษฐานว่าน่าจะเป็นผลมาจากปริมาณโปรตีนที่สูงกว่าสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชมันสำปะหลัง Chrastil (1990) และ Hamaker and Griffin (1993) พบว่าโปรตีนมีผลต่อการพองตัวของเม็ดสตาร์ชข้าว โดยโครงสร้างของโปรตีนชนิดที่มีพันธะซัลไฟด์คู่ที่เกาะอยู่กับเม็ดสตาร์ช อาจขัดขวางการดูดซับน้ำและการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ณ อุณหภูมินี้ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 60-70 องศาเซลเซียส ค่าแฟกเตอร์การพองตัวของแป้งข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นสูงอย่างมาก เป็น 6.93 และ 22.31 ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าเป็นเพราะโปรตีนที่เกาะอยู่กับเม็ดสตาร์ชอาจแปลงสภาพ (denature) ไป เช่น ออริเซนิน (oryzenin) ซึ่งเป็นโปรตีนหลักในข้าวจะมีช่วงอุณหภูมิการแปลงสภาพ (denaturation temperature) เท่ากับ 45-62 องศาเซลเซียส (Teo *et al.*, 2000) ทำให้ไม่สามารถขัดขวางการดูดซับน้ำและการพองตัวของเม็ดสตาร์ช เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 และ 90 องศาเซลเซียส ค่าแฟกเตอร์การพองตัวเพิ่มขึ้นเป็น 23.66 และ 24.87 ตามลำดับ



ภาพที่ 13 ค่าแฟกเตอร์การพังตัวของสสารและแป้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) พบว่า สสารข้าวเจ้า, สสารมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเหนียวมีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดหรืออุณหภูมิที่เกิดเจลในเซชันเท่ากับ 82.78, 71.08 และ 69.45 °ซ ตามลำดับ ซึ่งผลสอดคล้องกับค่าแฟกเตอร์การพังตัว สำหรับค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และค่าเซตแบค แสดงในตารางที่ 2 และภาพผนวกที่ 1 เมื่อเทียบค่าเซตแบคของสสารและแป้งทุกชนิดด้วยกันพบว่าแป้งข้าวเหนียวมีค่าเซตแบคต่ำที่สุดรองลงมาเป็นสสารมันสำปะหลังและสสารข้าวตามลำดับ ทั้งนี้จะเป็นผลมาจากปริมาณเอมิโลสที่แตกต่างกันของวัตถุดิบ เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่าเซตแบคของวัตถุดิบทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 2 ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย เซตแบคและ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดวัตถุดิบ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่ม เกิดความ หนืด (°C)	ความหนืด (RVU)				เซตแบค
		ความหนืด สูงสุด	ความหนืด ต่ำสุด	ความหนืด ลดลง	ความหนืด สุดท้าย	
RS	82.78a	228.92c	186.63a	42.29c	305.67a	119.04a
TS	71.08b	406.17a	150.13b	256.04a	255.04b	104.92b
WF	69.45c	286.79b	140.63c	146.17b	173.17c	32.54c

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

2. การศึกษาระบบการผสมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว เพื่อหาระบบที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงคุณภาพเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาทดลองเบื้องต้นโดยการศึกษากระบวนการผสมที่เหมาะสมในการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ (1) ระบบอัตราส่วน (ratio) จะใช้ความเข้มข้นรวมทั้งหมดของซัสเพนชันสตาร์ช (starch suspension) เป็นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) โดยเมื่อมีการผสมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวเพิ่มลงในระบบ จะมีการลดสัดส่วนของสตาร์ชข้าวเจ้าลง ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการศึกษาที่อัตราส่วน 8:0 และ 6:2 และ (2) ระบบการเติม (starch addition) จะใช้ความเข้มข้นของซัสเพนชันสตาร์ชข้าว (rice starch suspension) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) หลังจากนั้นเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวเพิ่มเข้าไปในระบบ ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการเติมสตาร์ช มันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวเพิ่มลงในระบบของสตาร์ชข้าวเจ้า ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 2 เจลสตาร์ชที่ได้จากทั้ง 2 ระบบ จะถูกนำไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วแบบช้า และทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าร้อยละการแยกออกของน้ำโดยเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการนำเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็งแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งโดยทำเช่นนี้ซ้ำไปมาเป็นจำนวนรอบ (freeze-thaw cycle process; FTC process) ซึ่งเป็นการทำให้เกิดการแยกออกของน้ำเร็วขึ้น จากนั้น

นำไปตรวจสอบค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ โดยผลการทดลองหาสมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งของระบบเจลสตาร์ชทั้ง 2 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ในการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1-5 ของเจลสตาร์ชที่เตรียมระบบแบบอัตราส่วนและแบบการเติม

รอบ ที่	ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ				
	สตาร์ชมันสำปะหลัง			แป้งข้าวเหนียว	
	8:0 หรือ	แบบอัตราส่วน	แบบเติม	แบบอัตราส่วน	แบบเติม
	8% RS	RS:TS	8% RS	RS:WF	8% RS
		6:2	+2% TS	6:2	+2% WF
1	35.96aA ± 1.56	29.11aB ± 1.66	21.94aC ± 1.89	10.50aE ± 3.83	14.05aD ± 2.64
2	55.42bB ± 0.79	52.61bB ± 0.62	39.25bD ± 0.9	56.32bA ± 1.33	47.60bC ± 0.84
3	56.90bB ± 1.06	56.75cB ± 0.83	43.11cC ± 2.04	63.32cA ± 1.22	55.44cB ± 1.32
4	56.25bB ± 1.30	56.31cB ± 0.68	45.51cC ± 1.67	65.93cA ± 0.48	56.00cB ± 1.84
5	57.96bB ± 0.59	57.98cB ± 0.77	45.41cC ± 2.21	67.12cA ± 0.97	56.79cB ± 0.64

หมายเหตุ - RS = สตาร์ชข้าวเจ้า, TS = สตาร์ชมันสำปะหลัง, WF = แป้งข้าวเหนียว

- ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

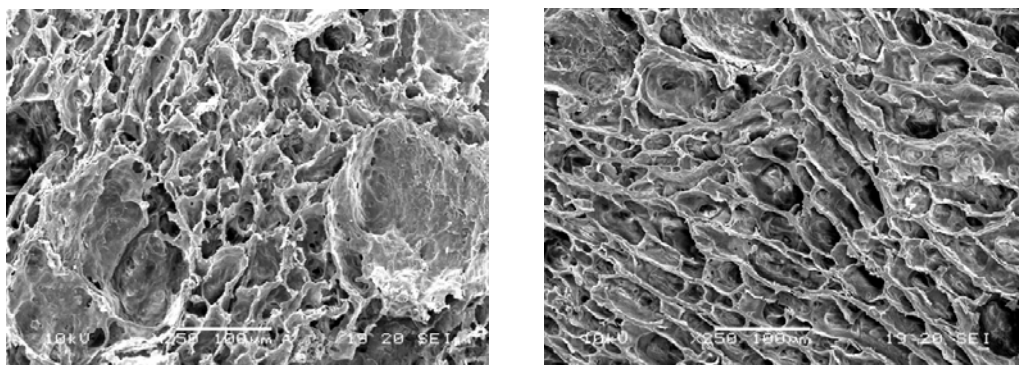
จากผลการทดลองพบว่าทำให้ระบบเจลสตาร์ชทั้งสองระบบมีปริมาณเอมิโลเฟกทินในระบบสูงขึ้นจะสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งได้ ซึ่งพิจารณาได้จากค่าร้อยละการแยกออกของน้ำจะมีค่าลดลง ในระบบอัตราส่วนพบว่าการใช้สตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวสามารถลดค่าร้อยละการแยกออกของน้ำได้ในรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 โดยค่าร้อยละการแยกออกของน้ำของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่อัตราส่วน 8:0 มีค่าร้อยละ

ละ 35.96 เมื่อมีการปรับอัตราส่วนระหว่างสตาร์ชข้าวเจ้าต่อสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวเป็น 6:2 พบว่าค่าร้อยละการแยกออกของน้ำมีค่าลดลงเป็นร้อยละ 29.11 และ 10.50 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของสตาร์ชมีความสำคัญต่อการเกิดการรีโทเกรเดชัน โดยสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลเพกทินต่ำ (แอมิโลสสูง) นั้นจะเกิดการรีโทเกรเดชันได้มาก และเร็วกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลเพกทินสูง (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) ดังนั้นการปรับสัดส่วนปริมาณแอมิโลเพกทินในระบบให้สูงขึ้น จึงมีผลทำให้ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำมีค่าลดลง แต่หลังจากการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 2 ไปแล้วพบว่าตัวอย่างที่มีการปรับอัตราส่วนด้วย สตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวจะมีค่าร้อยละการแยกออกของน้ำสูงขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าค่าร้อยละการแยกออกของน้ำของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระบบอัตราส่วนของเจลสตาร์ชที่อัตราส่วนระหว่างสตาร์ชข้าวเจ้าต่อแป้งข้าวเหนียวเป็น 6:2 พบว่าในรอบการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 2-5 ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำมีค่าสูงกว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) และมีแนวโน้มมีค่าสูงมากขึ้นเรื่อยๆ ตามจำนวนรอบการคั้นรูปจากเยือกแข็ง ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากความเข้มข้นของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เหมาะสมในการฟอร์มตัวเป็นเจลสตาร์ชคือร้อยละ 8 แต่ในระบบอัตราส่วน ความเข้มข้นของสตาร์ชข้าวเจ้ามีค่าลดลงเหลือร้อยละ 6 และมีการผสมแป้งข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 2 ลงในระบบแทน ส่งผลให้เจลสตาร์ชที่ได้มีโครงสร้างไม่แข็งแรง เมื่อเจลสตาร์ชผ่านการการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายๆ รอบ จึงอาจทำให้เกิดการยุบตัวของโครงสร้างเจลสตาร์ช และเกิดการขับน้ำออกจากเจลมากกว่าปกติ ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งการยุบตัวของโครงสร้างเจลสตาร์ชดังกล่าวอาจเป็นปัญหาในการผลิตผลิตภัณฑ์

ในระบบการเติมได้ทำการศึกษาการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 เพิ่มลงในระบบของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 จากผลการทดลองพบว่าการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวลงในระบบสามารถลดค่าร้อยละการแยกออกของน้ำได้เช่นเดียวกับการใช้ระบบอัตราส่วน โดยในรอบการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 พบว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) จะมีค่าร้อยละการแยกออกของน้ำเป็น 35.96 และเมื่อเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 เพิ่มลงในระบบพบค่าร้อยละการแยกออกของน้ำมีค่าลดลงเป็นร้อยละ 21.94 และ 14.05 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ระบบอัตราส่วน เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการแยกออกของน้ำในรอบการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 2-5 พบว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว จะมีค่าร้อยละการแยกออกของน้ำสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามจำนวนรอบการคั้นรูปจากเยือกแข็ง จนมีค่าใกล้เคียงกับเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) ยกเว้นตัวอย่างที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังร้อยละ 2 ที่ในรอบการทำละลายที่ 5

ยังคงมีค่าร้อยละการแยกออกของน้ำน้อยกว่าตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวเจ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาจากค่าร้อยละการแยกออกของน้ำของทั้งสองระบบเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าการเตรียมเจลทั้งสองระบบสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งได้ แต่จากผลการทดลองพบว่าในระบบอัตราส่วน เจลสตาร์ชที่มีอัตราส่วนระหว่างสตาร์ชข้าวเจ้าต่อแป้งข้าวเหนียวเป็น 6:2 ในรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 2-5 ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำมีแนวโน้มมีค่าสูงมากขึ้นเรื่อยๆ ตามจำนวนรอบการคืนรูปจากเยือกแข็ง และมีค่าสูงเกินกว่าตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) ในขณะที่ระบบการเติมพบว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีการเติมแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 ในรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 2 มีค่าร้อยละการแยกออกของน้ำน้อยกว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) และรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3-5 มีค่าร้อยละการแยกออกของน้ำใกล้เคียงและมีค่าไม่สูงเกินกว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชในรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 (ภาพที่ 14) พบว่าเจลสตาร์ชระบบอัตราส่วนระหว่างสตาร์ชข้าวเจ้าต่อแป้งข้าวเหนียวเป็น 6:2 มีโครงสร้างที่ถูกทำลายจากผลึกน้ำแข็งมากกว่า ซึ่งสะท้อนได้ว่าเจลสตาร์ชมีความแข็งแรงน้อยกว่าเจลสตาร์ชระบบการเติมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 2



ภาพที่ 14 โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชที่มีอัตราส่วนระหว่างสตาร์ชข้าวเจ้าต่อแป้งข้าวเหนียวเป็น 6:2 (ซ้าย) และเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีการเติมแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 (ขวา) ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า และคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (250x, Bar = 250 μ m)

จากผลการทดลองข้างต้น เจลสตาร์ชที่เตรียมด้วยระบบการเติมจะทำให้เจลสตาร์ชที่ได้มีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าและมีค่าความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งสูงกว่าระบบอัตราส่วน ดังนั้นจึงขอ

เลือกการเตรียมเจลแบบระบบการเดิมมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

3. การศึกษาความเข้มข้นของสตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว ต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

ในการทดลองนี้ทำการเดิมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ลงในระบบของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า ซึ่งระดับความเข้มข้นของสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นระดับการเดิมที่สามารถขึ้นรูปเป็นเจลสตาร์ชได้ดี (หากเดิมมากกว่าร้อยละ 2 จะไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเจลสตาร์ชได้) เจลสตาร์ชที่เตรียมได้ถูกนำไปทดลองหาสมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง ทำการศึกษาโดยเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการนำเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็งแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งโดยทำเช่นนี้ซ้ำไปมาเป็นจำนวนรอบ (freeze-thaw cycle process; FTC process) จากนั้นนำไปตรวจสอบค่าร้อยละการแยกออกของน้ำด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยง

ผลของการเดิมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวต่อสมบัติด้านความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลสตาร์ช ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าในการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 เจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่มีการเดิมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว (control) จะมีค่าร้อยละการแยกออกของน้ำเท่ากับ 38.14 ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวอย่างเจลอื่นๆ และในการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 2-5 ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำจะสูงมากขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากสตาร์ชข้าวเจ้าที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 37.5 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มแอมิโลสสูง (Juliano, 1992) เป็นผลให้เจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่เยือกแข็งเกิดรีโทรเกรเดชันสูง Varavinit *et al.* (2002) ได้ตรวจสอบความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลที่เตรียมจากแป้งข้าว 3 สายพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกัน คือ แป้งข้าวแอมิโลสสูง, แป้งข้าวแอมิโลสดำ และแป้งข้าวแอมิโลสดำมาก (แป้งข้าวเหนียว) ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 28, 18 และ 5 ตามลำดับ โดยพบว่าเจลแป้งข้าวเหนียวมีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งมากที่สุด รองลงมาเป็นเจลแป้งข้าวแอมิโลสดำ และเจลแป้งข้าวแอมิโลสสูงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองนี้

เจลสตาร์ชข้าวที่มีการเดิมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1, 1.5 และ 2 พบว่าในการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 การเดิมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวสามารถลดค่าร้อยละการแยกออกของน้ำได้ และจะมีค่าลดลงตามระดับความเข้มข้น

ของสสารไขมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งค่าร้อยละการแยกออกของน้ำที่ลดลงนี้จะเป็นผลมาจากเอมิโลเพกทินของสสารไขมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่เติมลงในระบบ โดยเอมิโลเพกทินที่มีโครงสร้างเป็นกึ่งก้านจะมีผลเข้าขัดขวางการรวมตัวกันเองของเอมิโลสในสสารข้าวเจ้าทำให้ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำมีค่าลดลง และเมื่อระดับการเติมเพิ่มขึ้น ปริมาณเอมิโลเพกทินที่เติมลงในระบบก็สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นค่าร้อยละการแยกออกของน้ำจึงมีค่าลดลงตามระดับการเติมที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระดับการเติมร้อยละ 1 และ 1.5 พบว่าการเติมสสารไขมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวเพื่อลดค่าร้อยละการแยกออกของน้ำของเจลสสารไขมันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ที่ระดับการเติมร้อยละ 2 พบว่าการเติมแป้งข้าวเหนียวจะสามารถลดค่าร้อยละการแยกออกของน้ำได้ดีกว่าการเติมสสารไขมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ในการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 2-5 พบว่าการเติมสสารไขมันสำปะหลังสามารถลดค่าร้อยละการแยกออกของน้ำในเจลสสารข้าวเจ้าได้ดีกว่าการเติมแป้งข้าวเหนียว ซึ่งแสดงว่าเจลสสารข้าวเจ้าที่เติมสสารไขมันสำปะหลังมีค่าความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งสูงกว่าการเติมแป้งข้าวเหนียว ทั้งนี้จะเป็นผลมาจากโครงสร้างการเกิดเจลเนื้อผสมทั้งสองชนิด (เจลสสารที่มีการเติมสสารไขมันสำปะหลัง และเจลสสารที่มีการเติมแป้งข้าวเหนียว) อาจมีความแข็งแรงแตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาค่าระดับชั้นการเกิดพอลิเมอร์เฉลี่ย (DPn) พบว่าสายเอมิโลสของสสารไขมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวมีค่า DPn เท่ากับ 2,600 และ 1,000 AGU ตามลำดับ (Hizukuri, 1988) จากข้อมูลดังกล่าวอาจสันนิษฐานได้ว่าสายเอมิโลสของสสารไขมันสำปะหลังที่มีขนาดใหญ่กว่าแป้งข้าวเหนียวนี้ น่าจะมีบริเวณที่สามารถเกิดบริเวณการพันกัน (junction zone) ระหว่างสายเอมิโลสของสสารไขมันสำปะหลังกับสายเอมิโลสของสสารข้าวเจ้าได้มากกว่า และส่งผลให้เจลสสารที่เติมสสารไขมันสำปะหลังมีความแข็งแรงมากกว่าเจลสสารที่เติมแป้งข้าวเหนียว ทำให้เจลสสารที่สามารถอุ้มน้ำและทนต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งได้ดีกว่า จึงทำให้ค่าการแยกออกของน้ำรอบการทำละลายที่ 2-5 มีค่าน้อยกว่าเจลสสารข้าว (control) และมีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งสูงกว่าการเติมแป้งข้าวเหนียว

ตารางที่ 4 ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ ในการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1-5 ของเจลสตาร์ข้าวเจ้า (RS) ที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง (TS) หรือแป้งข้าวเหนียว (WF) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

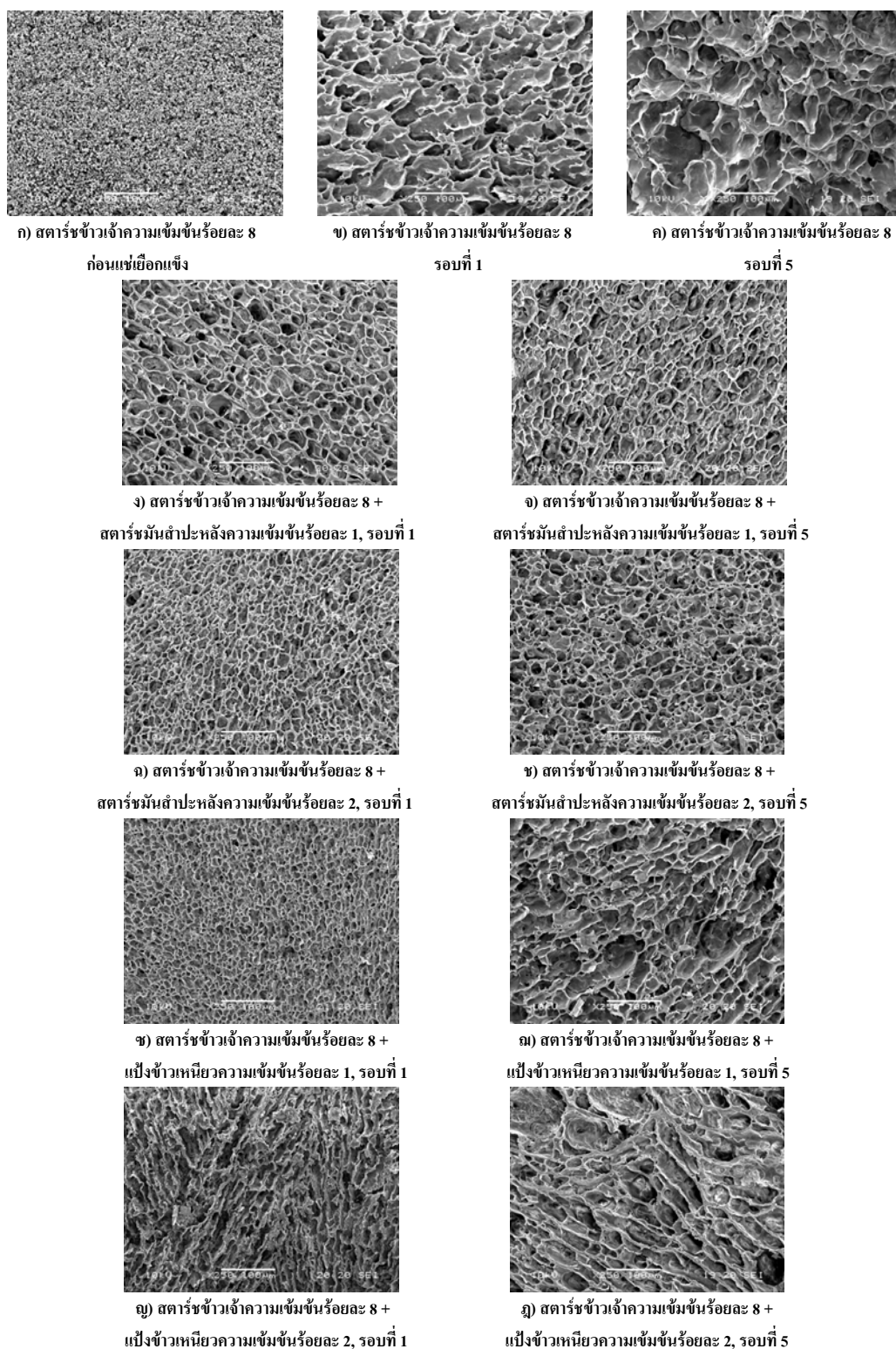
ตัวอย่าง	ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ				
	จำนวนรอบการคั้นรูปจากเยือกแข็ง				
	1	2	3	4	5
8% RS	38.14aA $\pm$ 0.69	52.65aB $\pm$ 0.58	55.76aC $\pm$ 2.11	56.74abC $\pm$ 1.06	57.49aC $\pm$ 1.60
8% RS +1% TS	28.52bA $\pm$ 3.16	46.61cB $\pm$ 1.29	48.36bBC $\pm$ 1.95	49.74cC $\pm$ 0.73	49.26bC $\pm$ 1.46
8% RS +1.5% TS	24.24cdA $\pm$ 1.59	41.70dB $\pm$ 2.28	44.30cC $\pm$ 0.5	45.13dCD $\pm$ 0.18	46.80cD $\pm$ 0.84
8% RS +2% TS	21.94dA $\pm$ 1.89	39.25eB $\pm$ 0.9	43.11cC $\pm$ 2.04	45.51dC $\pm$ 1.67	45.41cC $\pm$ 2.21
8% RS +1% WF	26.97bcA $\pm$ 4.02	52.56aB $\pm$ 0.88	54.49aBC $\pm$ 4.53	56.48abC $\pm$ 0.70	57.49aC $\pm$ 0.39
8% RS +1.5% WF	20.82dA $\pm$ 2.72	49.62bB $\pm$ 2.17	55.24aC $\pm$ 0.64	57.72aD $\pm$ 0.81	57.73aD $\pm$ 0.31
8% RS +2% WF	14.05eA $\pm$ 2.64	47.60cB $\pm$ 0.84	55.44aC $\pm$ 1.32	56.00bC $\pm$ 1.84	56.79aC $\pm$ 0.64

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

จากการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบซ้ำ และผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 และ 5 รอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จาก ภาพที่ 15 (ข, ง, จ, ช และ ฉ) จะเห็นได้ว่าการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 ขนาดของรูพรุนที่เกิด จากผลึกน้ำแข็ง (pore) ของเจลสตาร์ชที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวจะมี ขนาดของรูพรุนเล็กกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวอย่าง ชัดเจน และรูพรุนจะมีขนาดเล็กลงตามระดับความเข้มข้นของสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าว เหนียวที่เพิ่มขึ้นในระบบ โดยที่การเติมแป้งข้าวเหนียวระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 เจลสตาร์ชผสม ที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงเจลสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนการแช่เยือกแข็งมากที่สุด (ดังภาพที่ 15ก) และจาก ภาพที่ 15 (ค, จ, ช, ฉ และ ญ) เมื่อจำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งเพิ่มขึ้น รูพรุนของเจล สตาร์ชจะมีขนาดใหญ่ขึ้น จากกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้โครงสร้างของเจลสตาร์ชเกิด โครงสร้างแบบฟองน้ำ (spongy structure) โดยที่ในการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 ขนาดของรู พรุนของเจลสตาร์ชของทุกตัวอย่างจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้คาดว่าอาจเป็นผลมาจากการทำลายซ้ำ ของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการนำเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็ง แล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งโดยทำเช่นนี้ซ้ำไปมาเป็นจำนวนรอบ (freeze-thaw cycle process) จากความสัมพันธ์ของค่าร้อยละการแยกออกของน้ำและโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชหลัง การคืนรูปจากเยือกแข็ง พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวสามารถนำไปใช้เป็นสารลด การเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำและการแยกออกของน้ำของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งได้ แต่เจล สตาร์ชที่ได้มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและทำละลายต่ำ



ภาพที่ 15 โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนแช่เยือกแข็ง และเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า และคินรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 และ 5 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (250x, Bar = 250 μ m)

4. ผลของการเติมของสตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว อัตราการแช่เยือกแข็ง ของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง ระยะเวลาการเก็บรักษาของต่อคุณภาพของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

4.1. ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำของเจลสตาร์ช ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษา

การศึกษาผลของการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวและอัตราการแช่เยือกแข็งต่อค่าร้อยละการแยกออกของน้ำของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นานเป็นเวลา 0-60 วัน ทำโดยวัดปริมาณน้ำที่แยกตัวออกจากเจลหลังการแช่เยือกแข็งและทำลาย ที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า จากตารางที่ 4 เจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) จะมีค่าร้อยละการแยกออกของน้ำสูงประมาณร้อยละ 38 แต่เมื่อมีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวลงในระบบพบว่าเจลสตาร์ชข้าวที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1, 1.5 และ 2 จะมีค่าร้อยละการแยกออกของน้ำน้อยกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่มีการเติมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษานาน 0-60 วัน ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาเจลสตาร์ชอยู่ที่ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลสตาร์ชข้าวที่มีค่าอยู่ในช่วง -2.5 ถึง -3.0 องศาเซลเซียส (Charoenrein *et al.*, 2004) โดยค่าร้อยละการแยกออกของน้ำจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนตามระดับความเข้มข้นของสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่เพิ่มขึ้นในระบบ แสดงว่าการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าได้ จึงทำให้ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำมีค่าลดลง

สำหรับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วพบว่าการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวสามารถลดค่าร้อยละการแยกออกของน้ำได้ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วพบว่าค่าร้อยละการแยกออกของน้ำของเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) จะมีค่าลดลงเหลือประมาณร้อยละ 15 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 และการเติมแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า จากตารางที่ 5 และ 6 พบว่าการเติมแป้งข้าวเหนียวมีประสิทธิภาพในการลดการแยกออกของน้ำในเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าการเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง

ตารางที่ 5 ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำหลังการคั้นรูปจากการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ข้าวเจ้า (RS) ที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง (TS) หรือแป้งข้าวเหนียว (WF) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0, 10, 20, 40 และ 60 วัน

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ				
	ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)				
	0	10	20	40	60
8% RS	36.39aA ± 0.76	37.77aAB ± 1.63	37.09aAB ± 0.38	38.36aB ± 1.52	37.43aAB ± 0.82
8% RS +1% TS	26.61bA ± 1.07	27.02bA ± 1.61	26.28bA ± 1.72	27.65bA ± 2.26	26.82bA ± 1.51
8% RS +1.5% TS	21.38cA ± 1.95	23.97cB ± 1.33	25.35bB ± 1.53	24.91cB ± 1.06	23.97cB ± 2.51
8% RS +2% TS	19.33dA ± 1.33	22.05dB ± 1.27	21.52cB ± 1.68	22.65dB ± 1.93	21.10dAB ± 1.57
8% RS +1% WF	25.59bA ± 1.19	26.36bA ± 1.20	25.86bA ± 0.74	26.79bcA ± 1.46	26.18 bA ± 0.94
8% RS +1.5% WF	19.88cdA ± 0.54	21.77dB ± 0.80	21.99cB ± 1.28	21.10dAB ± 0.84	21.12dAB ± 1.06
8% RS +2% WF	10.24fA ± 0.94	11.66fB ± 0.79	11.49dAB ± 0.75	11.49eAB ± 1.33	10.68eAB ± 0.34

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

ตารางที่ 6 ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำหลังการคั้นรูปจากการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ข้าวเจ้า (RS) ที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง (TS) หรือแป้งข้าวเหนียว (WF) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0, 10, 20, 40 และ 60 วัน

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ				
	ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)				
	0	10	20	40	60
8% RS	14.82aA ± 1.28	15.78aA ± 0.68	14.61aA ± 0.83	14.62aA ± 1.20	15.78aA ± 0.65
8% RS +1% TS	11.53bA ± 0.58	12.29bAB ± 1.05	11.28bA ± 0.81	13.08bB ± 0.77	12.71bB ± 0.78
8% RS +1.5% TS	5.32dA ± 0.82	6.23dAB ± 0.4	6.45dB ± 0.56	5.91dAB ± 0.34	6.35dB ± 0.94
8% RS +2% TS	3.26eA ± 0.54	3.14eA ± 0.54	4.22eBC ± 0.38	3.67eAB ± 0.35	4.78eC ± 0.90
8% RS +1% WF	8.62cA ± 1.04	7.54cA ± 0.86	7.65cA ± 1.01	8.29cA ± 0.92	7.80cA ± 0.87
8% RS +1.5% WF	2.63eA ± 0.80	3.18eAB ± 0.77	3.94eAB ± 0.65	3.34eAB ± 0.85	4.15eB ± 1.48
8% RS +2% WF	0.73fA ± 0.06	0.71fA ± 0.12	0.88fA ± 0.29	0.81fA ± 0.10	0.83fA ± 0.18

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

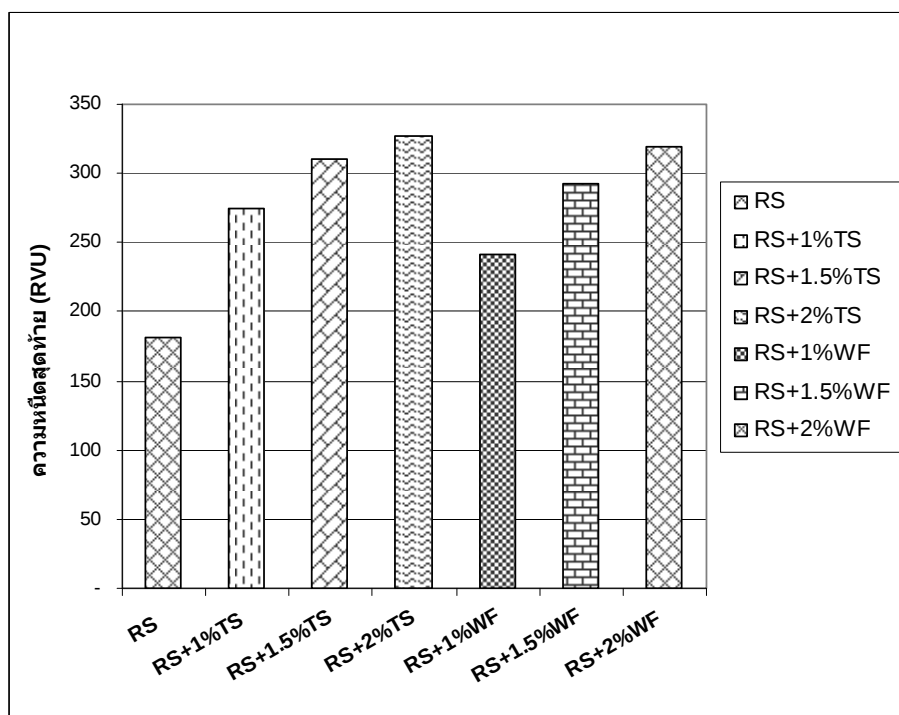
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้มีอัตราการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ (1) อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ($0.49^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) และ (2) อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ($3.7^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) โดยอัตราการแช่เยือกแข็งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกกำหนดขึ้น เพื่อเป็นตัวแทนของอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว เพื่อเปรียบเทียบผลของอัตราการแช่เยือกแข็งในการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งได้ ซึ่งจากตารางที่ 4 และ 5 พบว่าตลอดระยะเวลาการเก็บรักษานาน 0-60 วัน เจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะมีค่าร้อยละการแยกออกของน้ำน้อยกว่าเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งมีผลช่วยลดค่าร้อยละการแยกออกของน้ำได้ดีกว่าการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว ทั้งนี้เกิดจากอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว นั้นมีการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ผ่านสภาวะรีบเบอร์รี่ (rubbery state) หรือช่วงที่มีการเกิดผลึกนิวเคลียสของโมเลกุลสตาร์ชไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้จำนวนนิวเคลียสผลึกของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทินมีน้อยลง (Ferrero *et al.*, 1994) ดังนั้นเจลสตาร์ชจึงเกิดรีโทรเกรเดชันลดลง

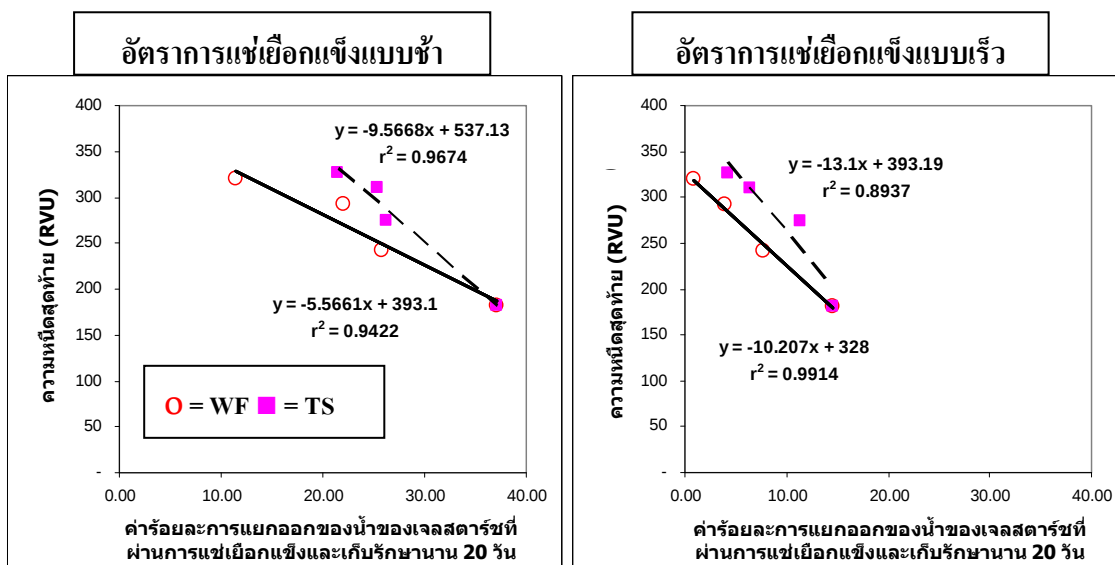
สรุปแล้วทั้งการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวและใช้การเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งล้วนมีผลลดการแยกออกของน้ำของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งได้ โดยการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งจะมีประสิทธิภาพในการลดการแยกออกของน้ำได้ดีกว่าการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว ในส่วนของระยะเวลาการเก็บรักษานาน 0-60 วัน พบว่าไม่มีผลต่อค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ

เพื่อให้เข้าใจสาเหตุที่การเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวสามารถช่วยลดการแยกออกของน้ำได้ จึงได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของระบบสตาร์ชข้าวที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1, 1.5 และ 2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) พบว่าการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวทำให้สมบัติด้านความหนืดของระบบเปลี่ยนแปลง (ดังตารางผนวกที่ ค2 และภาพผนวกที่ ค2) ซึ่งพบว่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของระบบที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวจะมีค่าสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่เติมลงไปในระบบ และมีค่าสูงกว่าระบบของสตาร์ชข้าวที่ไม่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 16 จากค่าความหนืดสุดท้ายที่เพิ่มขึ้นนี้พบว่าคล้ายกับการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์หลายชนิด เช่นคอนยัคกลูโคแมนแนน (อรรณณ, 2549)



ภาพที่ 16 แผนภาพค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของระบบซัสเพนชันสตาร์ชข้าว (rice starch suspension) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) และเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง)

เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการแยกออกของน้ำกับค่าความหนืดสุดท้ายของระบบ จะเห็นว่าเมื่อค่าความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำมีค่าลดลง ดังภาพที่ 17 จึงอาจสันนิษฐานได้ว่าการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว ซึ่งมีผลทำให้ความหนืดสุดท้ายของระบบเพิ่มขึ้นนี้ อาจเป็นผลทำให้การเคลื่อนตัวมาจับกันเองระหว่างโมเลกุลเอมิโลสและเอมิโลเพกทินเป็นไปได้ยากขึ้น อีกทั้งยังอาจเกิดจากโมเลกุลของเอมิโลเพกทิน ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงกิ่งและรวมตัวกันเองได้ยาก (Taub and Singh, 1998) อาจเข้าขัดขวางหรือแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลเอมิโลสที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ทำให้โมเลกุลเอมิโลสรวมตัวกันได้ยากขึ้น จึงทำให้ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาจากสมการของเส้นกราฟ (ภาพที่ 17) พบว่าตัวอย่างที่มีความหนืดเท่ากัน อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีประสิทธิภาพในการลดค่าร้อยละการแยกออกของน้ำได้ดีกว่าอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

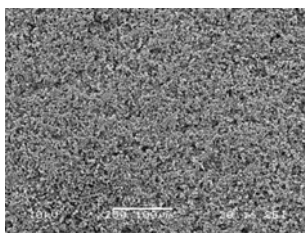


ภาพที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) กับค่าร้อยละการแยกออกของน้ำของเจลสตาร์ชที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งความเหนียวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเร็วและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C นาน 20 วัน

4.2. โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษา

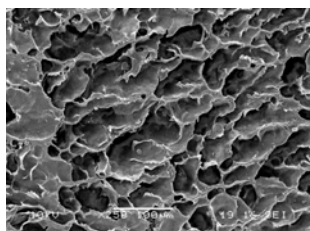
การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งมีความสัมพันธ์กับการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำของเจล (spongy gel) (Ferrero *et al.*, 1994) ถ้าเกิดรีโทรเกรเดชันมากการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ (spongy structure) ก็จะสูงตามไปด้วย จากภาพที่ 18 ที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเร็วพบว่าเจลสตาร์ชที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวจะมีขนาดของรูพรุน (pore size) เล็กกว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) อย่างชัดเจน โดยรูพรุนจะมีขนาดเล็กลงตามระดับความเข้มข้นของสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่เพิ่มขึ้นในระบบ เมื่อพิจารณาที่อัตราการแช่เยือกแข็งพบว่าเจลสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าจะมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าเจลสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วอย่างชัดเจน ซึ่งขนาดของรูพรุนที่เกิดจากขนาดของผลึกน้ำแข็ง โดยอัตราการแช่เยือกแข็งมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งคือ ขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ได้จะขึ้นอยู่กับอัตราการแช่เยือกแข็ง โดยการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะช่วยเร่งการก่อตัวของผลึก และช่วยในการลดการโตของผลึกน้ำแข็ง ดังนั้นผลึกของน้ำแข็งที่ได้จึงมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (MacDonald and Lanier, 1997) ดังแสดงในภาพที่ 19 ซึ่งโครงสร้างระดับ

จุลภาคนี้มีความสอดคล้องกับคำร้อยละการแยกออกของน้ำ โดยเจลสตาร์ชข้าวที่เติมแป้งข้าวเหนียว ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 และใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วร่วมด้วย จะมีลักษณะนิ่มหยุ่น ใกล้เคียงกับเจลสตาร์ชข้าวก่อนแช่เยือกแข็งมากที่สุด (ภาพที่ 18ก และ 18ข) ดังนั้นจึงเป็นสถานะ การปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพที่สุด

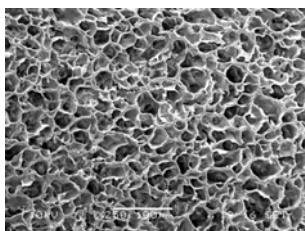


ก) สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 8, ก่อนแช่เยือกแข็ง

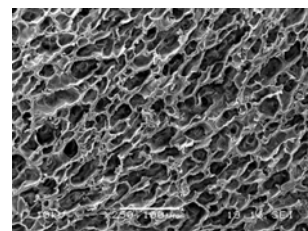
อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า



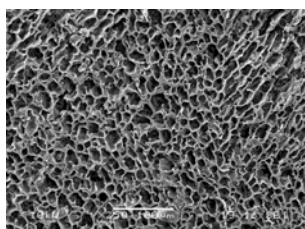
ข) สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 8



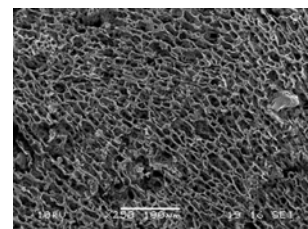
ค) สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 8 + สตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้นร้อยละ 1



ง) สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 8 + สตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้นร้อยละ 2

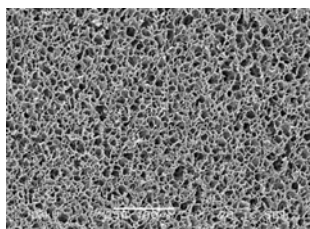


จ) สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 8 + แป้งข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 1

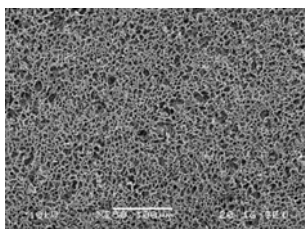


ฉ) สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 8 + แป้งข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 2

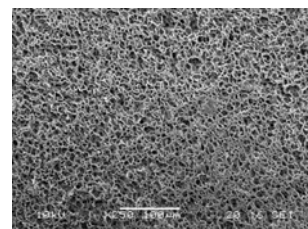
อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว



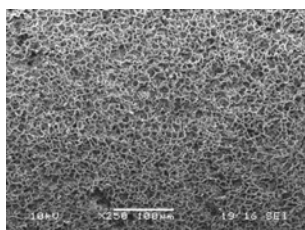
ช) สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 8



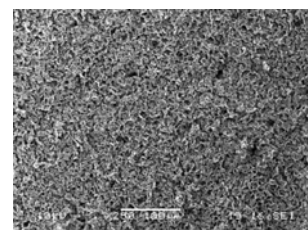
ซ) สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 8 + สตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้นร้อยละ 1



ฌ) สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 8 + สตาร์ชมันสำปะหลังความเข้มข้นร้อยละ 2

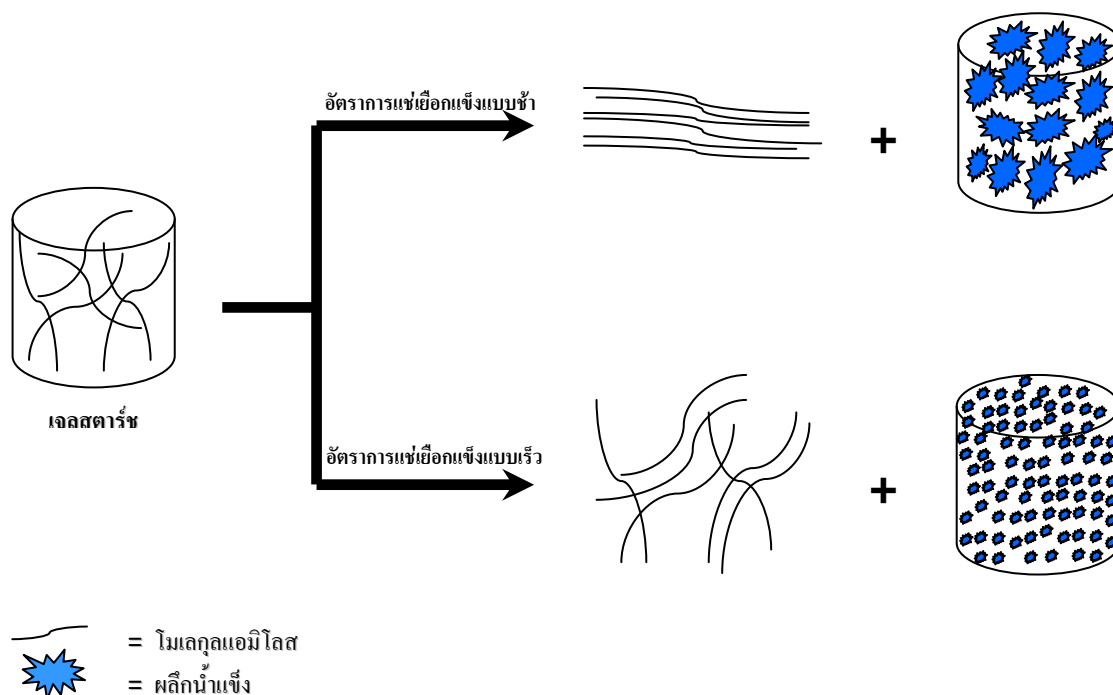


ญ) สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 8 + แป้งข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 1



ฎ) สตาร์ชข้าวเจ้าความเข้มข้นร้อยละ 8 + แป้งข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 2

ภาพที่ 18 โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนแช่เยือกแข็ง และเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเร็ว และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C นาน 20 วัน จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (250x, Bar = 250 μm)



ภาพที่ 19 ลักษณะการเกิดผลึกน้ำแข็งและการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชที่ผ่านการเฉยเยือกแข็งด้วยอัตราการเฉยเยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว

4.3. การตรวจสอบเนื้อสัมผัส ของเจลสตาร์ชที่ผ่านการเฉยเยือกแข็งและเก็บรักษา

การวัดเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) ด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) และรายงานผลเป็นค่าความแข็งของเจล (hardness) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ช สำหรับค่าความแข็งของตัวอย่างเจลสตาร์ชก่อนการเฉยเยือกแข็ง (ดังตารางที่ 7) จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าเจลสตาร์ชที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังจะมีค่าความแข็งสูงสุด ($p \leq 0.05$) รองลงมาคือ เจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) และจะมีค่าต่ำลงเรื่อยๆ สำหรับตัวอย่างที่มีการเติมแป้งข้าวเหนียวลงในระบบ โดยการเติมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 2 จะทำให้เจลสตาร์ชที่ได้มีค่าความแข็งก่อนการเฉยเยือกแข็งต่ำที่สุด ซึ่งค่าความแข็งที่สูงขึ้นหรือต่ำลงนี้อาจเป็นผลมาจากรูปแบบการเกิดโครงสร้างของเจลที่แตกต่างกัน และปริมาณของแอมิโลสจากสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังนี้ นอกจากทำให้ระบบมีปริมาณแอมิโลสเพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้ปริมาณแอมิโลสในระบบเพิ่มขึ้นอีกด้วย ในขณะที่การเติมแป้งข้าวเหนียวทำให้ปริมาณแอมิโลสในระบบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งปริมาณแอมิโลสที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นตัวส่งเสริมการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ช ทำให้เจลสตาร์ชมีเนื้อสัมผัสที่แข็งขึ้น

ตารางที่ 7 ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าว (RS) ที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลัง (TS) หรือแป้งข้าวเหนียว (WF) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ก่อนการแช่เยือกแข็ง

ตัวอย่าง	ค่าความแข็ง (นิวตัน)
8%RS	1.65b $\pm$ 0.06
8%RS+1%TS	2.05a $\pm$ 0.02
8%RS+1.5%TS	2.02a $\pm$ 0.03
8%RS+2%TS	2.04a $\pm$ 0.02
8%RS+1%WF	1.48c $\pm$ 0.06
8%RS+1.5%WF	1.34d $\pm$ 0.04
8%RS+2%WF	1.25e $\pm$ 0.09

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชในระหว่างการเก็บรักษาหลังการแช่เยือกแข็งส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเจลมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ชจึงเป็นค่าที่อาจสะท้อนได้ถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชที่ใช้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาค่าความแข็งของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งพบว่าเจลสตาร์ชทุกตัวอย่างจะมีค่าความแข็งสูงมากกว่าเจลสตาร์ชก่อนการแช่เยือกแข็ง (เปรียบเทียบตารางที่ 7, 8 และ 9)

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่ระยะเวลาเก็บรักษา 0 วัน พบว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) จะมีค่าความแข็งเท่ากับ 5.99 นิวตัน ซึ่งเจลสตาร์ชที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังจะทำให้เนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชที่ได้มีค่าความแข็งสูงมากกว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และค่าความแข็งนี้จะมีค่าสูงมากขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติมลงไป โดยการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 จะทำให้เนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชมีค่าความแข็งสูงสุด แต่ในทางตรงกันข้ามเจลสตาร์ชที่เติมแป้งข้าวเหนียวจะทำให้เนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชที่ได้ค่าความแข็งต่ำกว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และค่าความแข็งนี้จะมี

ค่าต่ำลงตามระดับความเข้มข้นของแป้งข้าวเหนียวที่เติมลงไป (ผลการทดลองดังกล่าวนี้มีความสม่าเสมอตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา) โดยการเติมแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 จะทำให้เจลสตาร์ชมีค่าความแข็งต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีเนื้อสัมผัสที่นิ่มที่สุด (ดังตารางที่ 7)

สำหรับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วพบว่า การเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวจะทำให้เจลสตาร์ชมีเนื้อสัมผัสในทำนองเดียวกันกับตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แต่เมื่อเปรียบเทียบที่ตัวอย่างเดียวกันแต่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเร็ว (ดังตารางที่ 8 และ 9) พบว่าอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะทำให้เนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งมีค่าความแข็งต่ำกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยเจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ที่ระยะการเก็บรักษา 0 วัน จะมีค่าความแข็งเท่ากับ 3.80 นิวตัน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเจลสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ในทำนองเดียวกันเจลสตาร์ชที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวและผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะมีค่าความแข็งต่ำกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าอัตราการแช่เยือกแข็งมีผลต่อการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ช โดยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

ตารางที่ 8 ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วย อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นระยะเวลา 0-60 วัน

ตัวอย่าง	ค่าความแข็ง (นิวตัน)				
	ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)				
	0	10	20	40	60
8%RS	5.99cA ± 0.05	5.95cA ± 0.14	6.09bA ± 0.38	6.00bA ± 0.26	5.78cA ± 1.13
8%RS+1%TS	6.78bcA ± 0.93	7.08bA ± 0.19	6.71bA ± 0.57	7.21aA ± 0.15	6.80bA ± 0.32
8%RS+1.5%TS	6.89abA ± 1.23	6.88bA ± 0.47	6.84bA ± 1.30	7.04aA ± 0.31	6.90abA ± 0.52
8%RS+2%TS	7.64aA ± 0.54	7.82aA ± 0.37	7.66aA ± 0.22	7.55aA ± 0.65	7.62aA ± 0.48
8%RS+1%WF	3.20dB ± 0.15	3.24dB ± 0.71	3.96cA ± 0.45	4.14cA ± 0.12	3.19dB ± 0.09
8%RS+1.5%WF	2.66deA ± 0.19	2.65edA ± 0.26	2.82dA ± 0.44	2.88dA ± 0.84	2.53eA ± 0.27
8%RS+2%WF	2.14eAB ± 0.15	2.00fB ± 0.07	2.24dA ± 0.13	2.16eAB ± 0.09	2.19eAB ± 0.21

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

ตารางที่ 9 ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วย อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นระยะเวลา 0-60 วัน

ตัวอย่าง	ค่าความแข็ง (นิวตัน)				
	ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)				
	0	10	20	40	60
8%RS	3.80cA ± 0.19	3.92dA ± 0.17	3.86dA ± 0.30	3.81dA ± 0.29	3.43dB ± 0.23
8%RS+1%TS	5.45bA ± 0.30	5.23cA ± 0.23	5.44cA ± 0.44	5.21cA ± 0.26	5.59cA ± 0.30
8%RS+1.5%TS	6.41aA ± 0.25	6.70bA ± 0.48	6.59bA ± 0.24	6.54bA ± 0.25	6.62bA ± 0.62
8%RS+2%TS	6.73aA ± 0.23	7.32aA ± 0.29	7.26aA ± 0.27	7.22aA ± 0.82	7.12aA ± 0.40
8%RS+1%WF	2.94dA ± 0.24	2.87eA ± 0.06	2.91eA ± 0.10	2.90eA ± 0.10	2.90eA ± 0.42
8%RS+1.5%WF	2.54eB ± 0.21	2.37fB ± 0.08	2.95eA ± 0.19	2.94eA ± 0.13	2.41fB ± 0.18
8%RS+2%WF	1.66fA ± 0.36	1.74gA ± 0.11	1.78fA ± 0.52	1.81fA ± 0.06	1.78gA ± 0.09

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

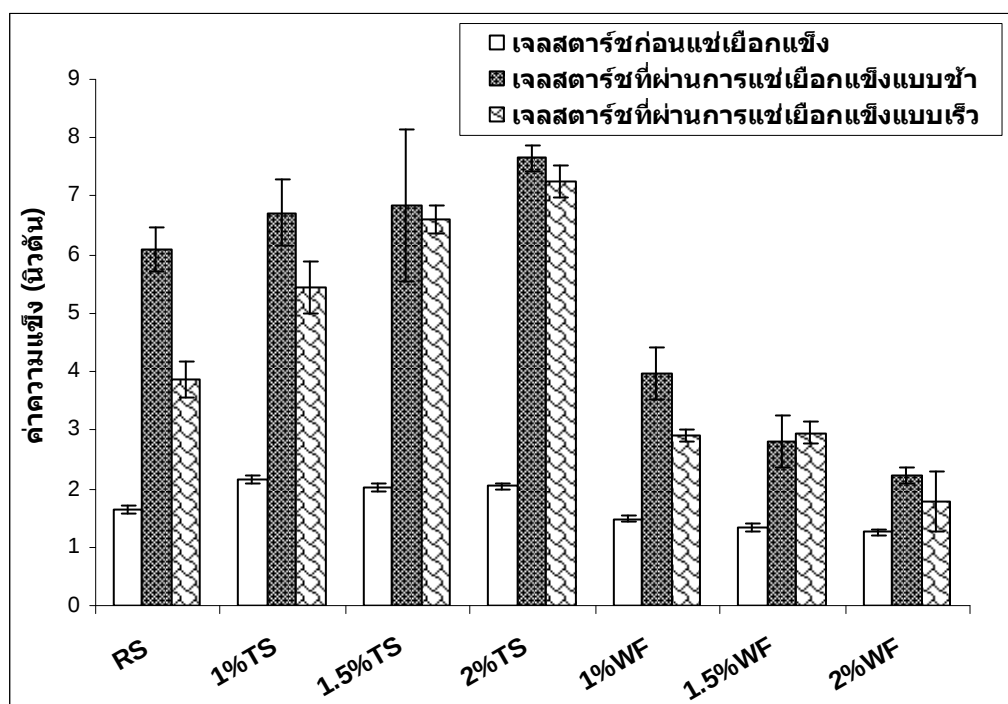
- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีผลให้เจลสตาร์ชที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่าความแข็งหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งสูงมากขึ้นนั้น นอกเหนือจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชระหว่างการแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษาแล้ว อาจสันนิษฐานได้ว่าอาจเกิดจากปริมาณแอมิโลส-แอมิโลเพกทินในระบบที่ไม่เท่ากัน โดยสามารถคำนวณหาปริมาณแอมิโลเพกทินโดยประมาณของสตาร์ชหรือแป้งที่ใช้ในการทดลองได้จากการหักลบองค์ประกอบอื่นออกไป ได้แก่ปริมาณแอมิโลส โปรตีน ไขมัน และเถ้า ซึ่งแป้งข้าวเหนียวจะมีปริมาณแอมิโลเพกทินสูงที่สุด คือประมาณร้อยละ 88.41 รองลงมาเป็นสตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณแอมิโลเพกทินประมาณร้อยละ 82.72 ส่วนสตาร์ชข้าวเจ้ามีปริมาณแอมิโลเพกทินน้อยที่สุดคือประมาณร้อยละ 61.64 เมื่อนำปริมาณแอมิโลเพกทินโดยประมาณมาคำนวณหาปริมาณแอมิโลส-แอมิโลเพกทินในระบบ (ดังแสดงในตารางที่ 10) พบว่าการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวจะทำให้ปริมาณแอมิโลเพกทินในระบบเพิ่มสูงขึ้น แต่การเติมสตาร์ชมันสำปะหลังพบว่านอกจากปริมาณแอมิโลเพกทินในระบบจะเพิ่มสูงขึ้นแล้ว ปริมาณแอมิโลสในระบบยังสูงขึ้นอีกด้วย จึงอาจเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้เจลสตาร์ชที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่าความแข็งสูงขึ้นตามระดับการเติม

ตารางที่ 10 ปริมาณแอมิโลส-แอมิโลเพกทินในระบบของเจลสตาร์ช ซึ่งได้จากการคำนวณ

ตัวอย่าง	ปริมาณ (กรัมน้ำหนักแห้ง/100 กรัมระบบ)	
	แอมิโลส	แอมิโลเพกทิน
8%RS	3.00	4.93
8%RS + 1%TS	3.17	5.70
8% RS + 1.5%TS	3.25	6.08
8%RS + 2%TS	3.34	6.46
8%RS + 1%WF	3.04	5.76
8%RS + 1.5%WF	3.06	6.17
8% RS + 2%WF	3.08	6.57



ภาพที่ 20 ค่าความแข็งแรงของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนการแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับเจลสตาร์ชที่เดิมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C นาน 20 วัน

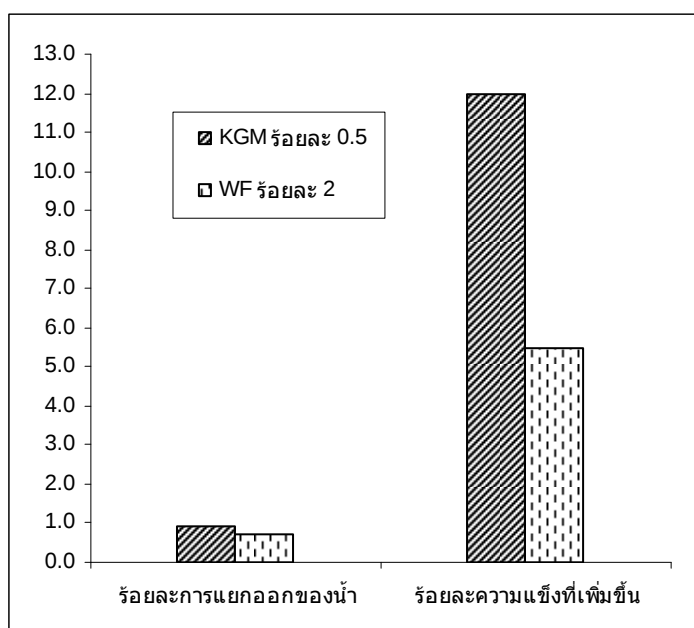
เจลสตาร์ชข้าวเจ้า (control) ก่อนการแช่เยือกแข็งจะมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1.65 นิวตัน โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนการแช่เยือกแข็งกับกับเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งในกลุ่มอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเร็วที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งแล้ว พบว่าเจลสตาร์ชข้าวที่เดิมแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 และใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วร่วมด้วยจะมีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงเจลสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนการแช่เยือกแข็งมากที่สุด (ภาพที่ 20)

5. การเปรียบเทียบสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งของงานวิจัยนี้กับการใช้คอนยัคกลูโคแมนแนน (Konjac glucomannan) ต่อสมบัติด้านต่างๆของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็ง

ในระบบที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบพบว่าปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นภายหลังการแช่เยือกแข็ง คือ การเกิดริ้วรอยแตกของโมเลกุลสตาร์ช ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ในปัจจุบันได้มี

การนำไฮโดรคอลลอยด์หลายชนิดมาช่วยลดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น แต่โดยส่วนใหญ่แล้วสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้งั้มีราคาแพง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำสารขั้มน้ำสำหรับล้างหรือแป้งข้าวเหนียวซึ่งเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ที่ผลิตได้ในประเทศมาทดแทนการใช้ไฮโดรคอลลอยด์

การลดการเปลี่ยนแปลงของเจลสตาร์ข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งได้มีผู้วิจัยได้สำเร็จแล้ว โดย อรรพรรณ และ สงวนศรี (2549) พบว่าการเติมคอนยัคกลูโคแมนแนน (KGM) ในระบบเจลสตาร์ข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งสามารถลดการเกิดการแยกออกของน้ำ โครงสร้างฟองน้ำ และเนื้อสัมผัสที่แข็งขึ้นระหว่างการเก็บรักษาลงได้ โดยสภาวะที่ดีที่สุด คือ การผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 ร่วมกับการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิผลของงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของการเติมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 2 ร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้) เปรียบเทียบกับผลของการใช้คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 ร่วมกับการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว จากผลการศึกษาของอรรพรรณ และ สงวนศรี (2549) (ดังภาพที่ 20)



ภาพที่ 21 เปรียบเทียบค่าร้อยละการแยกออกของน้ำและค่าความแข็งของเจลสตาร์ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนน (KGM) ร้อยละ 0.5 กับเจลสตาร์ที่เติมแป้งข้าวเหนียว (WF) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยทั้งสองตัวอย่างผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C นาน 10 วัน

จากการเปรียบเทียบเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วที่ระยะการเก็บรักษา 10 วัน (ดังภาพที่ 21) จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการแยกออกของน้ำหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลสตาร์ชผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 และเจลสตาร์ชที่เติมแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.92 และ 0.71 ตามลำดับ ในส่วนของค่าความแข็งของเจลสตาร์ชพบว่าค่อนข้างมีความแตกต่างกัน โดยเจลสตาร์ชผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 และผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว มีค่าความแข็งเท่ากับ 3.72 นิวตัน เมื่อนำมาเทียบกับเจลสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนการแช่เยือกแข็งที่มีค่าความแข็งเท่ากับ 3.32 นิวตัน พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 11.98 และเจลสตาร์ชที่เติมแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 และผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว มีค่าความแข็งเท่ากับ 1.74 นิวตัน เมื่อนำมาเทียบกับเจลสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนการแช่เยือกแข็งที่มีค่าความแข็งเท่ากับ 1.65 นิวตัน พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 5.45 ซึ่งเจลสตาร์ชที่เติมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 2 มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นต่ำกว่าเจลสตาร์ชผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 ค่อนข้างชัดเจน ดังนั้นการเติมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 2 มีประสิทธิภาพในการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าได้เทียบเท่ากับการใช้คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 แต่มีราคาถูกกว่าคอนยัคกลูโคแมนแนน

อนึ่งผลการเปรียบเทียบดังกล่าวอาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากใช้สตาร์ชข้าวเจ้าจากคนละแหล่ง กล่าวคือในการทดลองของอรรณและสงวนศรี (2549) ใช้สตาร์ชข้าวเจ้าจากบริษัทโรงเส้นหมี่ชองเฮง จำกัด ส่วนในการทดลองนี้ใช้สตาร์ชข้าวเจ้าจากบริษัทอุตสาหกรรมแป้งไทยจำกัด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ผลของการเติมสารไขมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว

การเติมสารไขมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวลงในระบบของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งสามารถลดค่าการแยกออกของน้ำได้ในช่วงการเก็บรักษาและทำละลายเพียง 1 ครั้งได้ดี ซึ่งค่าร้อยละการแยกออกของน้ำมีความสอดคล้องกับโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง โดยสามารถลดโครงสร้างฟองน้ำของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งได้ แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งที่จำนวนรอบที่ 2-5 ต่ำ ดังนั้นเมื่อนำไปใช้ในระบบจริงของอาหารแช่เยือกแข็ง อาจแก้ปัญหาตรงส่วนนี้โดยการให้ความสำคัญกับการขนส่งและการเก็บรักษาให้มากขึ้นโดยไม่ให้เกิดการแช่เยือกแข็งและทำละลายซ้ำ ในด้านเนื้อสัมผัสพบว่า การเติมสารไขมันสำปะหลังลงในระบบของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งกลับทำให้เจลสตาร์ชหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งมีค่าความแข็งสูงขึ้นตามปริมาณการเติม แต่ในทางตรงกันข้ามการเติมแป้งข้าวเหนียวลงในระบบของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งจะทำให้เนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งมีค่าความแข็งน้อยกว่าเจลสตาร์ชที่ไม่มีการเติมแป้งข้าวเหนียว และน้อยลงตามปริมาณการเติม จากลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอาหารที่ต้องการเนื้อสัมผัสแตกต่างกันได้

2. ผลของอัตราการแช่เยือกแข็ง

การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่ได้มีคุณภาพดีกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถลดค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ โครงสร้างฟองน้ำ และค่าความแข็งของเจลสตาร์ช ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ถึงการเกิดรี-โทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชระหว่างการแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แต่ไม่สามารถเพิ่มความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลสตาร์ชได้

3. เปรียบเทียบผลของการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวและอัตราการแช่เยือกแข็ง

การเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว

4. สภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็ง

เมื่อพิจารณาจากค่าร้อยละการแยกออกของน้ำ โครงสร้างระดับจุลภาค และค่าความแข็งของเจลสตาร์ชพบว่าสภาวะเจลสตาร์ชข้าวที่เติมแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 และใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วร่วมกับ เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่ได้มีลักษณะนุ่มยุ่ยใกล้เคียงเจลสตาร์ชข้าวเจ้าก่อนการแช่เยือกแข็งมากที่สุด ดังนั้นจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง

5. เปรียบเทียบการใช้คอนยัคกลูโคแมนแนกับการใช้แป้งข้าวเหนียว

ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งและค่าร้อยละของความแข็งที่เพิ่มขึ้นของเจลสตาร์ชผสมคอนยัคกลูโคแมนแนร้อยละ 0.5 และเจลสตาร์ชที่เติมแป้งข้าวเหนียวที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว และเก็บรักษานาน 10 วัน ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นการใช้แป้งข้าวเหนียวจึงมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าได้เทียบเท่ากับการใช้คอนยัคกลูโคแมนแน นอกจากนี้ยังมีราคาถูกกว่าคอนยัคกลูโคแมนแนอีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. สตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวสามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพ และลดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งได้ ดังนั้นสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งพร้อมบริโภคที่ทำจากแป้งข้าวเจ้าหรือสตาร์ชข้าวเจ้า เช่น เส้นก๋วยเตี๋ยว เส้นก๋วยจั๊บน้ำเย็น เส้นก๋วยจั๊บน้ำร้อน
2. สตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวสามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งได้ แต่อย่างไรก็ตามเจลสตาร์ชที่ได้ยังคงมีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งต่ำ ดังนั้นควรมีการศึกษาผลของการใช้น้ำตาลชนิดต่างๆ ร่วมกับการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวเพิ่มเติม เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ปรับปรุงความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลสตาร์ชข้าวเจ้าแช่เยือกแข็งให้ดีขึ้น และยังสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งพร้อมบริโภคจำพวกของหวาน (frozen dessert) เช่น ลอดช่อง น้ำกะทิ ขนมหิ้วยกปูน ครอบแครงกะทิ ขนมหลิ้ว

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ธงชัย สุวรรณสิขณัน. 2549. การประเมินคุณภาพทางกายภาพด้านเนื้อสัมผัส. น. 275-296. ใน คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, ผู้รวบรวม. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเกษตร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิธิยา รัตนานนท์. 2545. เคมีอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ปาริฉัตร หงสประภาส. 2545. เคมีกายภาพของอาหาร คอลลอยด์ อิมัลชัน และเจล. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาลิก. 2532. กรรมวิธีแปรรูปอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

มรกต ตันติเจริญ. 2537. การใช้ประโยชน์น้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง. เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “การวิจัยและพัฒนาการใช้ประโยชน์มันสำปะหลัง”. 28-29 พฤษภาคม 2537. โรงแรมหัวหิน.

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2549. การทดลองทางวิศวกรรมกระบวนการสำหรับการผลิตอุตสาหกรรมเกษตร. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วิไล รัตนาทอง. 2546. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร. คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2546. กระบวนการแช่เยือกแข็งอาหาร. ใน คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, ผู้รวบรวม. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรพิน ภูมิภมร. 2533. เทคโนโลยีของแป้ง: เคมีของแป้งและเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์จากแป้งบางชนิดที่ผลิตในประเทศไทย. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรรวรรณ ตติรัตน์. 2549. ผลของการแช่เยือกแข็งและคอนยัคกลูโคแมนแนนต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

_____ และ สงวนศรี เจริญเหรียญ. 2549. ผลของคอนยัคกลูโคแมนแนนต่อเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง, น. 81-89. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44 (สาขาอุตสาหกรรมเกษตร เศรษฐศาสตร์ และบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

A.A.C.C. 2000. **Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists.** 10th ed., American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN.

Alexander, R.J. 1995. Fat replacers based on starch. **Cereal Foods World**. 40: 366-370.

Appelqvist, A.M. and M.R.M. Debet. 1997. Starch-biopolymer interaction-a review. **Food Rev. Int.** 13: 163-224.

Arunyanart, T. and S. Charoenrein. 2008 a. Effect of sucrose on the freeze-thaw stability of rice starch gels: Correlation with microstructure and freezable water. **Carbohydr. Polym.** 74:514-518.

_____ and _____. 2008 b. Effect of sucrose, xylitol and konjac glucomannan on stability of frozen rice starch gels, H_H0010. **The 34th Congress on Science and Technology of Thailand**, Bangkok, Thailand.

- Balagopalan, C., G. Padmaja, S.K. Nanda and S.N. Moorthy. 1998. **Cassava in Food, Feed and Industry**. CRC Press, Inc., Florida
- Bello – Perez, L.A. and O. Paredes-Lopez. 1995. Effect of solutes on retrogradation of stored starches and amylopectins: A calorimetric study. **Starch/Starke**. 47: 83-86.
- Biliaderis, C.G. 1998. Structure and phase transitions of starch polymers, pp. 57-168. *In* R.H. Walter, ed. **Polysaccharide Association Structure in Food**. Marcel Dekker, INC., New York.
- Blanshard and J.R. Mitchell. 1998. **Food Structure-Its Creation and Evaluation**. Butler and Tanner, Great Britain.
- Brownsey, G.J. and V.J. Morris. 1998. Mixed and filled gels-Models for foods, pp. 7-23. *In* Blanshard, J.M.V. and J.R. Mitchell, eds. **Food Structure-Its Creation and Evaluation**. Butler and Tanner, Great Britain.
- Buleon, A., P. Colonna. V. Planchot and S. Bell. 1998 Starch granule: structure and biosynthesis. **Int. J. Biol. Macromolecules** 23: 85-112.
- Champagne, E.T. 1996. Rice starch composition and characteristics. **Cereal Foods World** 41: 833-838.
- Chanes, J.W., D. Bermudez, A.V. Fragoso, H.M. Paz and S.M. Alzamora. 2004. Principles of Freeze-Drying, pp. 13-24. *In* Y.H. Hui, P. Cornillon, I. Guerrero, M.H. Lim, K.D. Murrell and W.K. Nip, eds. **Handbook of Frozen Food**. Marcel Dekker, INC., New York.

- Charoenrein S., D. Thirathumthavorn and S. Udomrati. 2004. Retrogradation of waxy rice starch gel below and above glass transition temperature. **The 2004 IFT Annual Meeting, Las Vegas, USA. July 14-16 Abstract** no 93-6.
- _____, O. Tatirat, and J. Muadklay. 2008. Use of centrifugation-filtration for determination of syneresis in freeze-thaw starch gels. **Carbohydr. Polym.** 73: 143–147.
- Chaisawong, M. and M. Supphantharika. 2006. Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum. **Food Hydrocoll.** 20:641-649.
- Chrastil, J. 1990. Chemical and physicochemical changes of rice during storage at different temperatures. **J. Cereal Sci.** 11: 71:85.
- Christel, J.A., M. Keetels, T.V. Vliet and H. Luyten. 1995. Effect of retrogradation on the structure and mechanics of concentrated starch Gels, pp.472-553. *In* E. Dickinson and D. Lorient, eds. **Food Macromolecules and Colloids**. The royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Christianson, D.D, J.E. Hodge, D. Osborne and R.W. Detroy. 1981. Gelatinization of wheat starch as modified by xanthan gum, guar gum, and cellulose gum. **Cereal Chem.** 58: 513-517.
- Deman, J.M. 1999. **Principles of Food Chemistry**. 3rd. Aspen Publishers, Inc. Maryland. 520 p.
- Ding, X., Hagenimana A. and P. Pu. 2005. Study on thermal and rheological properties of native rice starches and their corresponding mixtures. **Food Res Int.** 38: 257–266.

- Fannon, J.E. and J.N. BeMiller. 1992. Structure of starch paste and granule remnants revealed by low-temperature scanning electron microscopy after cryopreparation. **Cereal Chem.** 69: 456-460.
- Ferrero, C., M.N. Martino and N.E. Zaritzky. 1994. Corn starch-xanthan gum interaction and its effect on the stability during storage of frozen gelatinization suspensions. **Starch/starke.** 46: 300-308.
- _____ and N.E. Zaritzky. 2000. Effect of freezing rate and frozen storage on starch-sucrose-hydrocolloid systems. **J. Sci. Food Agric.** 80: 2149-2158.
- Funami, T., Y. Kataoka, T. Omoto, Y. Goto and I. Asai. 2005. Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior wheat starch. **Food Hydrocolloid.** 19: 1-13.
- Gallant, D.J., B. Bouchet, P.M. Baldwin. 1997. Microscopy of starch: evidence of a new level of granule organization. **Carbohydr. Polym.** 32: 177-191.
- _____, _____, A. Buleon and S. Perez. 1992. Physical characteristics of starch granules and susceptibility to enzyme degradation. **Eur. J. Clin. Nutri.** 46: S3-S16.
- Godet, M.C., V. Tran and M.M. Delagw. 1993. Molecular modelling of the specific interactions in amylose complexation by fatty acids. **Int. J. Biol. Macromolecules.** 15: 11-16. Cited Z. Zhou, K. Robards, S. Helliwell and C. Blanchard. 2002. Review composition and functional properties of rice. **Int. J. Food Sci. Tech.** 37:849-868.
- Goff, H.D. 1997. Measurement and Interpretation of the Glass Transition in Frozen Food, pp. 29-50. In M.C. Erickson and Y.C. Hung, eds. **Quality in Frozen Food.** Chapman & Hall, New York.

- Gonera, A., P. Cornillon. 2002. Gelatinization of Starch/gum/Sugar Systems studied by using DSC, NMR, and CSIM. **Starch/Starke**. 54: 508-516.
- Gunaratne, A., Hoover, R. 2002. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. **Carbohydr. Polym.** 49: 425-437
- Hamaker, B.R. and V.K. Griffin. 1993. Effect of disulfide bond-containing protein on rice starch gelatinization and pasting. **Cereal Chem.** 70: 377-380.
- Heldman, D.R. and T.A. Taylor. 1997. Modeling of Food Freezing, pp. 51-64. *In* M.C. Erickson and Y.C. Hung, eds. **Quality in Frozen Food**. Chapman & Hall, New York.
- Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectin and its significance. **Carbohydrate Res.** 147: 342-347. Cited E.T. Champagne. 1996. Rice starch composition and characteristics. **Cereal Foods World**. 41: 833-838.
- _____. 1988. Recent advances in molecular structure of starch. **J. Jpn. Soc. Starch Sci.** 31:185.
- _____, Y. Takeda, N. Maruta and B.O. Juliano. 1989. Molecular structures of rice starch. **Carbohydrate Res.** 189: 227-235. Cited E.T. Champagne. 1996. Rice starch composition and characteristics. **Cereal Foods World**. 41: 833-838.
- Hood, L.F. 1982. Current concept of starch structure, pp. 217-236. *In* D.R. Lineback and G.E. Inglett (eds.). **Food Carbohydrates**. AVI Publishing Company, Inc., Connecticut.
- Hoover, R., R.M.W.S., Ratnayake. 2001. **Determination of Total Amylose Content of Starch**. *In* R.E. Wrolstad, T.E. Acree, H. An, E. A. Decker, M.A. Penner, D.S. Reid, S.J. Schwartz, C.F. Shoemaker, P. Sporns. Current protocols in food analytical chemistry, , eds. Wiley. New York.

- Jacobson, M.R. and J.N. BeMiller. 1998. Method for determining the rate and extent of accelerated starch retrogradation. **Cereal Chem.** 75(1): 22-29. Cited M.R. Jacobson. 1994. **Starch Retrogradation: Acceleration, Inhibition and Microstructure**. Ph.D. Thesis, Purdue University.
- Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. **Cereal Sci. Today** 16: 334-360.
- _____. 1992. Structure, chemistry, and function of the rice grain and its fraction. **Cereal Foods World** 37: 772-779.
- Kaletunc, G. and K.J. Breslauer. 2003. **Characterization of Cereals and Flour**. Marcel Dekker. Inc., New York.
- 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.
- Lang, V. 2004. Development of a range of industrialised cereal based foodstuffs, high in slowly digestible starch. pp.483. In A.C. Eliasson, ed. **Starch in Food**. Woodhead Publishing, New York.
- Lee, M.H., M.H. Baek, D.S. Cha, H.J. Park and S.T. Lim. 2002. Freeze-thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums. **Food Hydrocolloid.** 16: 345-352.
- Lii, C-Y., M.-F., Lai and K.-F., Liu. 1998. Factors influencing the retrogradation of two rice starches in low-molecular-weight saccharide solutions. **J. Cereal Sci.** 28: 175-185.
- Lu, S., L.N. Chen and C. Y. Lii. 1997. Correlations between the fine structure, physicochemical properties, and retrogradation of amylopectins from Taiwan rice varieties. **Cereal Chem.** 74: 34-39.

Luh, S. B. and Y-K., Liu. 1991. Rice Flours in Baking, pp. 9-33. pp. 197-231. *In* S. B., Luh, ed.

Rice: Utilization. Springer.

Lumdubwong, N. and P.A. Seib. 2000. Rice starch isolation by alkaline protease digestion of wt-milled rice flour. **J. Cereal Sci.** 31:63-74. Cited T.J. Scorch. 1967. **Starch Chemistry and Technology' Vol. 2.** Academic Press INC., New York.

MacDonald, G.A. and T.C. Lanier. 1997. Cryoprotectants for Improving Frozen Food Quality, pp. 197-231. *In* M.C. Erickson and Y.C. Hung, eds. **Quality in Frozen Food.** Chapman & Hall, New York.

Mandala, I.G. and E. Bayas. 2004. Xanthan effect on swelling, solubility and viscosity of wheat starch dispersions. **Food Hydrocoll.** 18: 191-201.

_____, E.D. Palogou and A.E. Kostaropoulos. 2002. Influence of prepatraion and storage condition on texture of xanthan-starch mixtures. **J. Food Eng.** 53: 27-38.

Matsuo, T., Y. Futsuhara, F. Kikuchi and H. Yamaguchi. 1997. Science of the Rice Plant, Vol III. Nosan Gyoson Banka Kyokai(Nobunkyo), Tokyo. 469 p.

Miles, M. J., V. J. Morris, P. D. Orford, S. G. Ring. 1985. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. **Carbohydr. Res.** 135: 271-28.

Moorthy, S.N. 2002. Physicochemical and functional properties of tropiocal tuber Starches: A review. **Starch/Starke.** 54: 559-592.

Morris, V.J. 1986. Multicomponent gels, pp. 87-99. *In* G.O. Phillips, D.J. Wedlock and P.A. Williams, eds. **Gum and Stabilizers for the Food Industry 3.** Elsevier Applied Science, New York. Cited J.M.V.

- Morris, V.J. 1990. Starch gelation and retrogradation. **Trends in Food Sci. & Technol.** 2-6.
- Muadklay, J. and S. Charoenrein. 2008. Effects of hydrocolloids and freezing rates on freeze-thaw stability of tapioca starch gels. **Food Hydrocoll.** 22: 1268-1272.
- Murphy, P. 2000. Starch, pp. 41-45. *In* G.O. Phillips, and P.A. Williams, eds. **Handbook of Hydrocolloids**. Woodhead Publishing, New York.
- Newport Scientific. 1995. **Operation Manual for The Series 4 Rapid Visco Analyser**. Warriewood, New South Wales. 93 p.
- Persson, P.O. and G. Londahl. 1993. Freezing Technology, pp. 20-58. *In* C.P. Mallett, ed. **Frozen Food Technology**. Chapman & Hall, Great Britain.
- Putaux, L.J., A. Bulon and H. Chanzy. 2000. Network formation in dilute amylose and amylopectin studied by TEM. **Macromolecule**. 30: 6416-6422.
- Qi, X., R.F. Tester, C.E. Snape and R. Ansell. 2003. Molecular basis of the gelatinization and swelling characteristics of waxy rice starches grown in the same location during the same season. **J. Cereal Sci.** 37: 363-376.
- Rahman, M.S. 1999. **Food preservation by freezing**. *In* M. S. Rahman, Handbook of food preservation. New York: Marcel Dekker. 259-284 p.
- Robin, J.P., C. Mercier, R. Charbonnier, and J.A. Guilbot. 1974. Lintnerized starches, gel filtration and enzymatic studies of in soluble residues from prolonged acid treatment of potato starch. **Cereal Chem.** 51: 389-406.
- Roos, Y. H. 1995. Glass transition-related physicochemical changes in foods. **Food Technol.** 1: 97-102.

Roos, Y. H. and M. Karel. 1991. Applying state diagrams to food processing and development.

Food Technol. 66-71, 107.

Schoch, T.J. 1964. Swelling power and solubility of granular starches, pp. 106-108. In R.L.

Whistler, R.J. Smith and J.N. BeMiller (eds.). **Methods in Carbohydrates Chemistry**, Vol. IV, Academic Press, New York.

Shi, X. and J.N. BeMiller. 2002. Effects of food gums on viscosities of starch suspension during pasting. **Carbohydr. Polym.** 50: 7-18.

Singh, N., J. Singh, L. Kaur, N.S. Sodhi and B.S. Gill. 2003. Morphological, Thermal and

rheological properties of starches from different botanical source. **Food Chem.** 81: 219-231.

Soest, V.J.J.G., D. de Wit, H. Tournois and J.F.G. Vliegenthart. 1994. Retrogradation of potato starch as studied by Fourier transform infrared spectroscopy. **Starch/Starke.** 46: 453-457.

Sriroth, K., V. Santisopasri, C. Petchalanuwat, K. Kurotjanawong, K. Piyachomkwan and C.G.

Oates. 1999. Cassava starch granule structure-function properties: influence of time and Conditions at harvest on four cultivars of cassava starch. **Carbohydr. Polym.** 38: 161-170.

Sudhakar, V., R.S. Singhal and P.R. Kulkarni. 1992. Starch-gum interactions: formulation and functionality using amaranth/corn starch and cmc. **Starch/starke** 44: 369-374.

Taggart, P. 2004. Starch as an ingredient: manufacture and applications. pp.367. In A.C. Eliasson, ed. **Starch in Food.** Woodhead Publishing, New York.

Taub, I.A. and Singh, R.P., eds. 1998. **Food storage stability.** CRC press, USA.

- Teo, C.H., A. Abd. Karim, P.B. Cheah, M.H. Norziah and C.C. Seow. 2000. On the roles of protein and starch in the aging of non-waxy rice flour. **Food Chem.** 69: 229-236.
- Tester, F.R. and W.R. Morrison. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches I Effects of amylopectin, amylase, and lipids. **Cereal Chem.** 67: 551-557.
- Varavinit, S., S. Shobsngob, W. Varanganond, P. Chinachoti and O. Naivikul. 2002. Freezing and thawing conditions affect the gel stability of different varieties of flour. **Starch/starke** 54: 31-36.
- Whistler, R.L. and J.N. Bemiller. 1999. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists.** American Association of Cereal Chemists, Inc., U.S.A.
- _____ and J.R. Deniel. 1984. Molecular structure of starch. Pp. 153-178. In R.L. Whistler, J.N. BeMiller, and E.F. Paschall (eds.). **Starch : Chemistry and Technology.** 2nd Ed. Academic Press, Inc., Florida.
- Winton, A.L. and K.B. Winton. 1906. **The Structure and Composition of Foods.** John Wiley and Sons, Inc., New York. 673 p.
- Yoshimura, M., T. Takaya and K. Nishimari. 1996. Effects of konjac-glucomannan on the gelatinization and retrogradation of corn starch as determined by rheology and differential scanning calorimetry. **J. Agric. Food Chem.** 44: 2970-2976.
- _____, _____ and _____. 1998. Rheological studies on mixtures of corn starch and konjac-glucomannan. **Carbohydr. Polym.** 35: 71-79.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบและสมบัติของวัสดุดิบ

การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบ

ก1. การหาปริมาณความชื้น (AACC, 2000) Method44-15A

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1.1 ตู้อบลมร้อน (hot air oven)

1.1.2 ภาชนะใส่ตัวอย่าง (moisture can) ทำด้วยอลูมิเนียม

1.1.3 เดซิเคเตอร์ (desiccator)

1.2 วิธีการวิเคราะห์

ทำแห้งภาชนะใส่ตัวอย่างพร้อมฝาด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 °ซ เป็นเวลา 1 ชม. นำมาใส่ทิ้งไว้ในเดซิเคเตอร์จนภาชนะเย็นตัวลง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักภาชนะที่แน่นอนพร้อมทั้งจดบันทึกน้ำหนัก หลังจากนั้นชั่งตัวอย่างสารที่ต้องการหาความชื้นประมาณ 2-3 กรัม พร้อมทั้งจดบันทึกน้ำหนัก แล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 °ซ เป็นเวลา 1 ชม. โดยเปิดฝาภาชนะทิ้งไว้ เมื่อครบเวลานำออกจากตู้อบลมร้อน ปิดฝาภาชนะ แล้วนำมาใส่ทิ้งไว้ในเดซิเคเตอร์ทันที ทิ้งไว้จนภาชนะเย็นตัวลงเท่าอุณหภูมิห้องแล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักพร้อมทั้งจดบันทึกน้ำหนัก นำไปคำนวณปริมาณความชื้นดังนี้

$$\text{ร้อยละความชื้น (\%moisture)} = \frac{\text{น้ำหนักที่หายไป}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

ก2. การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (ดัดแปลงจากวิธีของ Hoover *et al.*, 2001)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1.1 ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

2.1.2 สเปนโตรโฟโตมิเตอร์

2.1.3 เครื่องชั่งละเอียด

2.1.4 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

2.2 สารเคมี

2.2.1 เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) 95 เปอร์เซ็นต์

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

2.2.3 กรดแอซิดิกกลูว (glacial acetic acid) ความเข้มข้น 1 นอร์แมล เตรียมโดยตวง กรดแอซิดิกกลูวเข้มข้นปริมาตร 60 มิลลิลิตร ใส่ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1 ลิตร

2.2.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (pure potato amylose) ยี่ห้อ sigma, USA

2.2.5 แอมิโลเพกทินบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (pure potato amylopectin) ยี่ห้อ sigma, USA

2.2.6 สารละลายไอโอดีน เตรียมโดยชั่งไอโอดีน (I_2) 0.2 กรัม และ โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.0 กรัม ผสมสารทั้งสองให้เข้ากันแล้วละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ควรเก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา

2.3 วิธีการวิเคราะห์

2.3.1 ชั่งตัวอย่างแป้ง 0.1000 กรัม ใส่ในขวด (flask) ขนาด 50 มิลลิลิตร ที่แห้งสนิท

2.3.2 เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 1 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ เพื่อเกลี่ยแป้งให้กระจายออก ระวังอย่าให้แป้งขึ้นมาเกาะตามผนังขวด

2.3.3 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์แมล จำนวน 9 มิลลิลิตร พร้อมทั้งล้างแป้งที่เกาะอยู่ตามผนังขวด

2.3.4 นำแป้งไปให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

2.3.5 ถ่ายแป้งลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยใช้ น้ำล้าง 2-3 ครั้งเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร และผสมให้เข้ากัน

2.3.6 ควบน้ำแป้งปริมาณ 5 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

2.3.7 เติมกรดแอซิดิกกลูวความเข้มข้น 1 นอร์แมล จำนวน 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน จำนวน 2 มิลลิลิตร

2.3.8 เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร แล้วเขย่าและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

2.3.9 ทำแบลงค์(blank)โดยนำขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร มาเติมกรดแอสซิติกล้วน ความเข้มข้น 1 นอร์แมล 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

2.3.10 วัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร (nm) โดยปรับค่าของแบลงค์เป็น 0

2.3.11 นำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าปริมาณแอมิโลสโดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน

2.4 การเขียนกราฟมาตรฐาน (standard curve)

2.4.1 ชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่งจำนวน 0.0400 กรัมใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (เป็นขวดที่ 1) และทำตามขั้นตอนที่ 2-5 ในข้อ 1.1.1 เพื่อใช้เป็นสารละลายมาตรฐาน และชั่งแอมิโลสเพกทินบริสุทธิ์จากมันฝรั่งจำนวน 0.0400 กรัมใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น (เป็นขวดที่ 2)

2.4.2 ทำแบลงค์ (blank) โดยการเปิดสารละลายมาตรฐานจากขวดที่ 2 ปริมาตร 5 มิลลิลิตรใส่ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร นำมาเติมกรดแอสซิติกล้วน ความเข้มข้น 1 นอร์แมล จำนวน 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไอโอดีน จำนวน 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร (nm) โดยใช้แบลงค์ปรับค่าให้เป็นศูนย์

2.4.3 เปิดสารละลายมาตรฐานจากขวดที่ 1 ปริมาตร 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดกำหนดปริมาตร 100 มิลลิลิตร และเปิดสารละลายมาตรฐานจากขวดที่ 2 ปริมาตร 4, 3, 2, 1 และ 0 มิลลิลิตร เติมลงไปตามลำดับ เติมกรดแอสซิติกล้วนความเข้มข้น 1 นอร์แมลปริมาณ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้วที่มีสารละลายมาตรฐานตามลำดับ เติมสารละลายไอโอดีน จำนวน 2.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้นาน 20 นาที

2.4.4 วัดค่าการดูดแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร (nm)

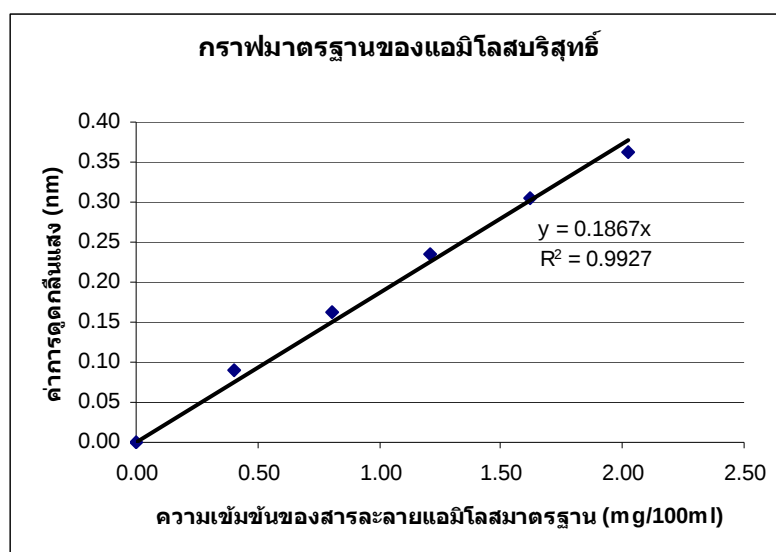
2.4.5 เขียนกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายแอมิโลสมาตรฐาน (แกน x) และค่าการดูดกลืนแสง (แกน y)

ตารางผนวกที่ ก1 สรุปการใช้สัดส่วนแอมิโลส-แอมิโลเพกทิน (100-0,0-100) สำหรับวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

Type	สารละลาย แอมิโลส มาตรฐาน (ml.)	สารละลาย แอมิโลเพกทิน มาตรฐาน(ml.)	กรดแอซีติก ล้วน (ml.)	สารละลาย ไอโอดีน (ml.)	ปริมาณ แอมิโลส (g)
Blank	0	5	2.0	2.0	0.0
ขุดกำหนด ปริมาตรที่ 1	1	4	0.2	2.0	4.0×10^{-4}
ขุดกำหนด ปริมาตรที่ 2	2	3	0.4	2.0	8.0×10^{-4}
ขุดกำหนด ปริมาตรที่ 3	3	2	0.6	2.0	12.0×10^{-4}
ขุดกำหนด ปริมาตรที่ 4	4	1	0.8	2.0	16.0×10^{-4}
ขุดกำหนด ปริมาตรที่ 5	5	0	1.0	2.0	20.0×10^{-4}

2.4.6 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของปริมาณแอมิโลส} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่อ่านได้จากกราฟแอมิโลสมาตรฐาน (mg/100ml)} \times 10}{5 \times \text{น้ำหนักแป้งแห้ง (g)}}$$



ภาพผนวกที่ ก1 ปริมาณแอมิโลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน

ก3. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (ดัดแปลงจากวิธีการของ AACC, 2000 Method 46-12

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องย่อยสลาย Buchi

3.1.2 หลอด Kjeldahl สำหรับย่อย

3.1.3 เครื่องกลั่นอัตโนมัติ Buchi

3.2 สารเคมี

3.2.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น

3.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 35

3.2.3 สารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4

3.2.4 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์แมล

3.2.5 คอปเปอร์ซัลเฟต

3.2.6 โพแทสเซียมซัลเฟต

3.2.7 อินดิเคเตอร์ผสมระหว่างเมทิลเรดและโบรโมครีซอลกรีน

3.3 วิธีการวิเคราะห์

3.3.1 ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนใส่ลงในหลอดย่อย ระวังอย่าให้ติดข้างหลอด

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

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

3.3.4 นำหลอดย่อยต่อเข้ากับชุดเครื่องกลั่น แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 35 จนสารละลายในหลอดย่อยเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

3.3.5 รองรับสิ่งกลั่นด้วยขวด (flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายกรดบอริก ความเข้มข้นร้อยละ 4 เปอร์เซนต์ จำนวน 25 มิลลิลิตร โดยกลั่นประมาณ 5 นาที

3.3.6 นำไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์แมล จนกระทั่งได้สารละลายสีเทา (จุดยุติ) บันทึกปริมาณกรดที่ใช้ แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละของไนโตรเจน

หมายเหตุ ให้ทำแบลнкควบคู่ไปด้วย โดยไม่มีตัวอย่างในหลอดย่อย

3.4 วิธีการคำนวณ

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

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

เมื่อ S = ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง

B = ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลнк

N = ความเข้มข้นเป็นนอร์แมลของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน

W = น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม

ก4. การหาปริมาณไขมันในแป้ง (ดัดแปลงจากวิธีการของ AACC, 2000 Method 30-25)

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

4.1.1 เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (Soxtec System HT2; 1045 Extraction unit)

4.1.2 เครื่องทำความเย็น

4.1.3 extraction cup

4.1.4 thimble

4.1.5 เดสิคเคเตอร์ (desiccator)

4.2 สารเคมี

4.2.1 ไพโตรเลียมอีเทอร์ที่มีจุดเดือดในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส

4.3 วิธีการวิเคราะห์

4.3.1 อบ extraction cup และทิ้งให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักไว้ (W_1)

4.3.2 ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัมลงบนกระดาษกรองและห่อให้มิดชิด บันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่แน่นอน (W_2) แล้วนำมาใส่ลงใน thimble

4.3.3 นำ thimble ใส่ใน extraction unit แล้วเติมไพโตรเลียมอีเทอร์ จำนวน 45 มิลลิลิตร ลงใน extraction cup

4.3.4 นำ extraction cup เข้าไปในเครื่องวิเคราะห์ไขมัน ทำการสกัดเป็นเวลา 20 นาที และทำการชะล้างเป็นเวลา 45 นาที นำ extraction cup ไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อระเหยตัวทำละลายออกไป ทิ้ง extraction cup ให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ และนำชั่งน้ำหนัก (W_3)

4.4 วิธีการคำนวณ

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

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

ก5. การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า(AACC, 2000)

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 5.1.1 เตา muffle furnace
- 5.1.2 เตาไฟฟ้าให้ความร้อนแบบแผ่นราบ
- 5.1.3 เป้า (crucible)
- 5.1.4 เซซิกเคเตอร์

5.2 วิธีการวิเคราะห์

- 5.2.1 เผาเป้าในเตา muffle furnace ทิ้งไว้ให้เย็นในเซซิกเคเตอร์ และชั่งน้ำหนักเป้า
- 5.2.2 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5 กรัมใส่ลงในเป้า แล้วนำไปเผาด้วยไฟอ่อน ๆ จน

หมดควัน

- 5.2.3 นำไปเผาในเตา muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนกว่าได้เถ้าเป็นสีขาวหรือสีเทา
- 5.2.4 นำเป้าออกมาใส่ในเซซิกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องแล้ว นำไปชั่งน้ำหนักแน่นอน

5.3 วิธีการคำนวณ

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

- เมื่อ W_0 = น้ำหนักของเป้าหมายหน่วยเป็นกรัม
 W_1 = น้ำหนักของเป้าและตัวอย่างก่อนเผาหน่วยเป็นกรัม
 W_2 = น้ำหนักของเป้าและตัวอย่างหลังจากเผาจนได้น้ำหนักคงที่ หน่วยเป็นกรัม

ก6. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด (AACC, 2000)

6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyzer, RVA3D, Newport Scientific Instruments & Engineering, Austraria)

6.2 วิธีการวิเคราะห์

6.2.1 ตัวอย่างสตาร์ช/แป้งที่ใช้วิเคราะห์ต้องผ่านการบดจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าหรือเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร แล้วจึงนำไปหาความชื้นตามวิธี AACC (2000) ก่อนการวิเคราะห์

6.2.2 ชั่งตัวอย่างสตาร์ช/แป้งจำนวน 3 กรัมใส่ลงในอุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก และตวงน้ำปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร ใส่ในถ้วยทรงกระบอก (คำนวณที่ความชื้น 12 เปอร์เซ็นต์) แต่ถ้าตัวอย่างแป้งมีความชื้นไม่เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณปริมาณน้ำและสตาร์ช/แป้งที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามสูตร

$$\text{สำหรับปริมาณสตาร์ช/แป้ง} \quad S = \frac{88 \times 3.0}{100 - M}$$

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

เมื่อ S = น้ำหนักตัวอย่างที่ปรับค่าแล้ว

W = น้ำหนักน้ำที่ปรับค่าแล้ว

M = ปริมาณความชื้นที่แท้จริงของตัวอย่าง (เปอร์เซ็นต์)

6.2.3 ใส่ตัวอย่างลงบนผิวหน้าของน้ำในถ้วยทรงกระบอก ใช้ใบพายเขย่าตัวอย่างในถ้วยทรงกระบอกขึ้นลง 10 ครั้ง แต่ถ้าตัวอย่างยังคงอยู่บนผิวหน้าหรือติดบนใบพาย ให้เขย่าตัวอย่างซ้ำอีกครั้ง

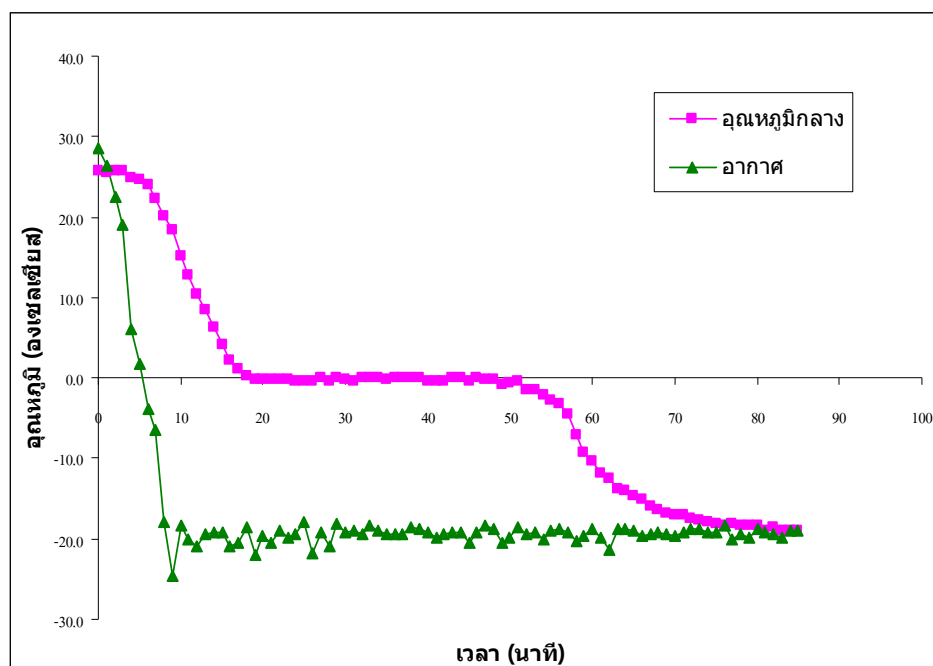
6.2.4 ใส่ใบพายในถ้วยทรงกระบอกและสวมใบพายเข้ากับที่ยึดโดยให้ใบพายอยู่กึ่งกลางถ้วย แล้วเริ่มต้นการวิเคราะห์โดยกดมอเตอร์ของเครื่องมือลง ไม่ควรผสมแป้งกับน้ำนานกว่า 1 นาทีก่อนการวิเคราะห์ โดยสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับสตาร์ช/แป้ง มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาดังนี้

ระยะเวลา (นาที:วินาที)	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
50.0 (อุณหภูมิเริ่มต้น)	
50.0	1:00
95.0	4:45
95.0	7:15
50.0	11:00
สิ้นสุดการทดสอบ	12:30

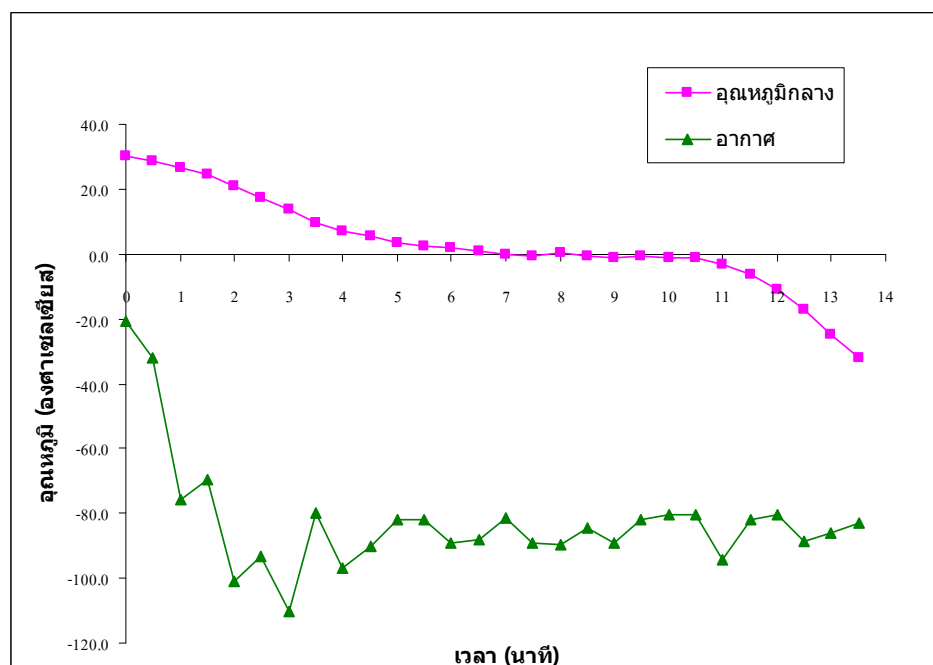
หมายเหตุ ความเร็วรอบเริ่มต้นที่ใช้คือ 960 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 160 รอบต่อนาทีจนที่ตลอดการทดสอบ

6.2.5 บันทึกอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความร้อน (pasting temperature) ความหนืดสูงสุดขณะให้ความร้อน (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) เป็นความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและต่ำสุด และค่าเซตแบค (setback) เป็นความแตกต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด

ภาคผนวก ข
แผนภาพการเช่าเหมาเครื่อง

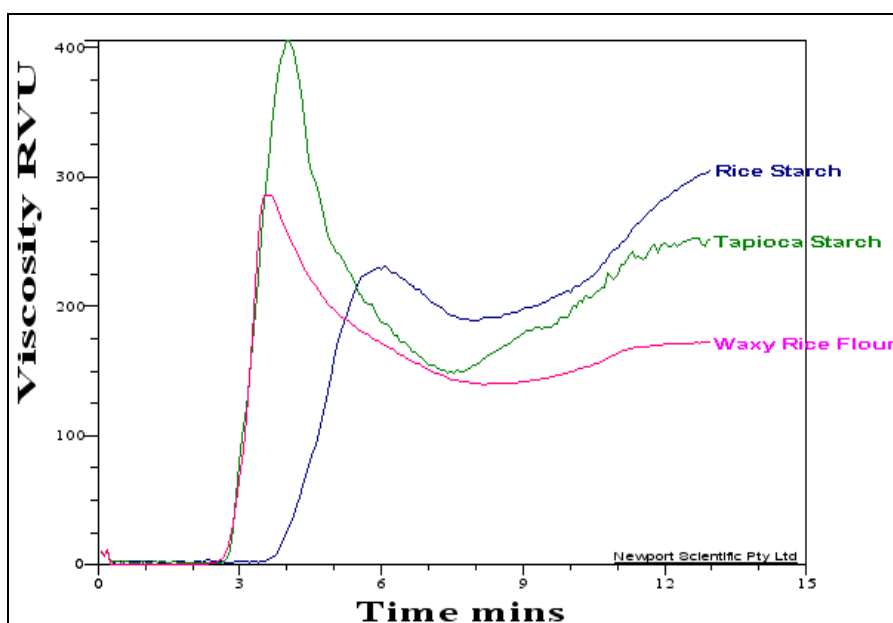


ภาพผนวกที่ ข1 แผนภาพการแซ่เยือกแข็งของสตา์รซ์ข้าวเจ้าที่เดิมสตา์รซ์มันสำปะหลังหรือแป้ง
ข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ด้วยอัตราการแซ่เยือกแข็งแบบช้า (0.49°ซ/นาท)

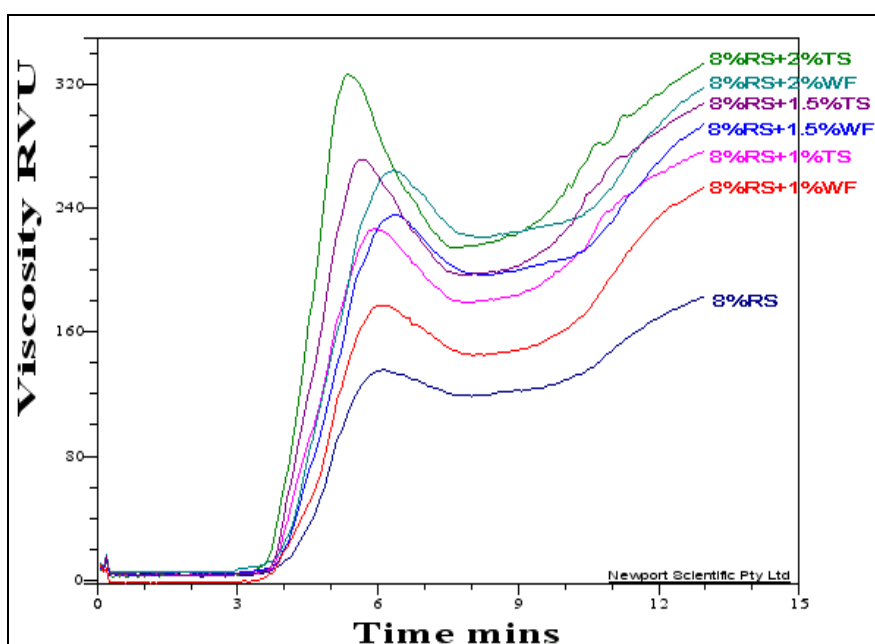


ภาพผนวกที่ ข2 แผนภาพการแซ่เยือกแข็งของสตา์รซ์ข้าวเจ้าที่เดิมสตา์รซ์มันสำปะหลังหรือแป้ง
ข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ด้วยอัตราการแซ่เยือกแข็งแบบเร็ว (3.7°ซ/นาท)

ภาคผนวก ค
กราฟและผลการทดลอง



ภาพผนวกที่ ค1 กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดจากการวิเคราะห์สัตุคิตด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว



ภาพผนวกที่ ค2 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็วของสตาร์ชข้าวเจ้าที่เติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2

ตารางผนวกที่ ค1 ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย เซตแบคและอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด ของระบบซัสเพนชัน
สตาร์ชข้าว (rice starch suspension) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) และเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้ง
ข้าวเหนียวร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่ม เกิดความหนืด (°C)	ความหนืด (RVU)				เซตแบค
		ความหนืด สูงสุด	ความหนืด ต่ำสุด	ความหนืด ลดลง	ความหนืด สุดท้าย	
RS	88.10 ± 1.20a	133.79 ± 2.65g	120.29 ± 2.06d	13.50 ± 4.71d	181.83 ± 0.82g	61.54 ± 2.89e
RS+1%TS	83.18 ± 0.04cd	222.33 ± 5.66e	171.63 ± 11.02c	50.71 ± 5.36c	274.08 ± 3.06e	102.46 ± 7.95bc
RS+1.5%TS	81.98 ± 1.73d	274.71 ± 4.54b	192.63 ± 7.01b	82.08 ± 11.55b	310.75 ± 4.95c	118.13 ± 11.96a
RS+2%TS	81.58 ± 0.04d	317.21 ± 5.36a	212.33 ± 2.24a	104.88 ± 3.12a	327.13 ± 2.53a	114.79 ± 4.77ab
RS+1%WF	85.30 ± 0.64b	189.08 ± 0.94f	163.08 ± 1.77c	26.00 ± 0.82d	241.88 ± 2.77f	78.79 ± 4.54d
RS+1.5%WF	84.85 ± 0.00bc	234.42 ± 1.77d	195.33 ± 2.24b	39.08 ± 0.47c	292.38 ± 2.30d	97.04 ± 0.06c
RS+2%WF	84.08 ± 0.04bc	265.17 ± 1.53b	219.13 ± 2.42a	46.04 ± 3.95c	319.54 ± 2.06b	100.42 ± 4.48bc

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยคิดจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวณัฐสุดา ปรีชาธรรมวงศ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	27 มิถุนายน 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ชีววิทยา) สาขาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2548)
ผลงานทางวิชาการ	- นำเสนอผลงานวิจัยภาคโปสเตอร์เรื่อง “Effect of pH and Sucrose on Morphology, Swelling and Pasting Properties of Rice Starch Suspension” ใน The 4th International Conference on Starch Technology (Starch Update 2007), Bangkok, Thailand, 6-7 November, 2007. - นำเสนอผลงานวิจัยภาคโปสเตอร์เรื่อง “Effect of Waxy Rice Flour and freezing Rate on Freeze-Thaw Stability of Rice Starch Gel” ใน The 34th Congress on Science and Technology of Thailand, Bangkok, Thailand, 31 October - 2 November, 2008.
ประสบการณ์งานวิจัย	- ผู้ช่วยวิจัยโครงการ “การลดความเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชจากการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ช” ทุนอุดหนุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (สวพ. มก.) (พ.ศ. 2549) - ผู้ช่วยวิจัยโครงการ “การพัฒนาโครงสร้างในเจลสตาร์ชข้าวให้ทนต่อการแช่เยือกแข็งและทำละลายโดยการเติมสารพอลิแซ็กคาไรด์ของไทย” ทุนอุดหนุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (พ.ศ. 2550-2552)