



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)
ปริญญา

วิทยาศาสตรการอาหาร

วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งด้วยคอนยัคกลูโคแมนแนนและน้ำตาลชนิดต่าง ๆ

Improving Quality of Frozen Rice Starch Gels with Konjac Glucomannan and Sugars

นามผู้วิจัย นายธันยบุรณ อรัญนารณ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์อรอนงค์ นัยวิกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะบุญย์ สัจจอนันตกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง
ด้วยคอนยัคกลูโคแมนแนนและน้ำตาลชนิดต่าง ๆ

Improving Quality of Frozen Rice Starch Gels
with Konjac Glucomannan and Sugars

โดย

นายรัชนบุรณ์ อรัญนารถ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

พ.ศ. 2551

ชั้นขบูนอร์ธ อธิษฐานนรธ 2551: การปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาตาร์ช้าวแซ่เยือกแข็งด้วยคอนยัก-
กลูโคแมนแนนและน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ปริญญูวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)
สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D. 129 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของเจลสตาตาร์ช้าวแซ่เยือกแข็งใน
ระหว่างการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษาด้วยคอนยักกลูโคแมนแนน น้ำตาลซูโครส และไซลิทอลโดยงานวิจัยนี้
ประกอบด้วย 2 การทดลอง ในการทดลองที่ 1 นำเจลสตาตาร์ช้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลที่ความ
เข้มข้นร้อยละ 0 ถึง 20 มาแช่เยือกแข็งและทำการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 ถึง 5 รอบ ผลการทดลองพบว่า
ทั้งน้ำตาลซูโครสและไซลิทอลสามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลวได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
($p \leq 0.05$) โดยค่าร้อยละการแยกของของเหลวลดลงตามความเข้มข้นของน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม
น้ำตาลซูโครสมีประสิทธิภาพในการลดการแยกของของเหลวได้มากกว่าไซลิทอล โครงสร้างระดับจุลภาค
ของเจลสตาตาร์ช้าวที่ผสมน้ำตาลหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งแสดงให้เห็นว่ามีขนาดของรูพรุนที่เกิดจาก
ผลึกน้ำแข็งเล็กกว่าเจลสตาตาร์ช้าวที่ไม่ได้ผสมน้ำตาลและส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุนของเจลสตาตาร์ช้าวที่ผสม
น้ำตาลมีความหนาแน่นมากกว่าเจลสตาตาร์ช้าวที่ไม่ได้ผสมน้ำตาล โดยที่ความหนาแน่นของส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุน
มากขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาตาร์ชวลลดลง
เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งของเจลสตาตาร์ชวลหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งพบว่า
น้ำตาลซูโครส ทำให้ค่าความแข็งของเจลสตาตาร์ชวลลดลง ส่วนไซลิทอลทำให้ค่าความแข็งของเจลสตาตาร์ชวลเพิ่มขึ้น
สำหรับการทดลองที่สองนำเจลสตาตาร์ช้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 10
กับผสมคอนยักกลูโคแมนแนนความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 0.5 ไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง
แบบช้าและเร็ว นำตัวอย่างเจลสตาตาร์ช้าวที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 0, 7, 21 และ 45 วัน มาคืนรูป
จากเยือกแข็งแล้วนำมาตรวจสอบค่าการแยกของของเหลว โครงสร้างระดับจุลภาค และลักษณะเนื้อสัมผัส
พบว่าคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลวได้ทั้งในเจลสตาตาร์ช้าวที่ผสมกับ
ไม่ผสมน้ำตาล ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับโครงสร้างระดับจุลภาค นอกจากนี้เจลสตาตาร์ช้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง
แบบเร็วมีค่าร้อยละการแยกของของเหลว และค่าความแข็งของเจลลดลง โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาตาร์ชวล
ที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งแสดงให้เห็นว่า คอนยักกลูโคแมนแนน และคอนยักกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาล
สามารถลดการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำได้ เจลสตาตาร์ช้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครส, คอนยักกลูโคแมนแนน และ
คอนยักกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครสที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งมีค่าความแข็งของเจลลดลง
นอกจากนี้เจลสตาตาร์ช้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถลดค่าร้อยละการแยกของ
ของเหลว โครงสร้างแบบฟองน้ำ และค่าความแข็งของเจลได้ดีกว่าเจลสตาตาร์ช้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการ
แช่เยือกแข็งแบบช้า

Thunyaboon Arunyanart 2008: Improving Quality of Frozen Rice Starch Gels with Konjac Glucomannan and Sugars. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Associate Professor Sanguansri Charoenrein, Ph.D. 129 pages.

The objective of this research was to minimize the freezing damage of frozen rice starch gels using and konjac glucomannan (KGM), sucrose and xylitol. This research has two experiments. In the first experiment, rice starch gels containing sugars (0-20%) were frozen and thawed up to 5 cycles. Results showed that sucrose and xylitol were effective in reducing the liquid separation (syneresis) and this effect significantly increased with increasing concentrations ($p \leq 0.05$). However, sucrose was more effective than xylitol. Scanning electron micrographs of freeze-thaw gels showed that smaller pore size and a thicker surrounding matrix corresponded with increasing sugars concentration. Furthermore, the amount of freezable water in starch systems decreased with increasing sugars concentration. For texture values, hardness of freeze-thaw gels containing sucrose was lower than that of the control (rice starch gel). In contrast, xylitol increased the hardness of freeze-thaw gels. In the second experiment, rice starch gel with 0%, 10% and 20% sucrose or xylitol and 0% and 0.5% KGM were frozen at two freezing rates: slow freezing and fast freezing. After storage for 0, 7, 21 and 45 days, samples were thawed and measured syneresis, microstructure and texture. The addition of KGM also decreased %syneresis for both gels with and without added sugars, which also corresponded with gel microstructure. The microstructure of starch gel after freezing and thawing revealed that KGM and combined of KGM with sugars addition changed gel matrix and caused less spongy structure. For texture values, hardness of freeze-thaw gels containing sucrose, KGM and KGM with sucrose were lower than the control (rice starch gel). Moreover, gels frozen at fast freezing rate had lower %syneresis, the smaller ice crystal formation and lower hardness values than those frozen at slow freezing rate.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สงวนศรี เจริญเหรียญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาในการเรียนและการค้นคว้าวิจัย รวมถึงข้อคิดเห็น แนวทางในการแก้ปัญหา ความเอาใจใส่และความเมตตา ตลอดจนการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. อรอนงค์ นัยวิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ข้อคิดเห็นในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีเสมอมา และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรณิ จิรภาคย์กุล ประธานควบคุมการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รณนิ สงวนดิกุล ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอนมาตั้งแต่เด็ก

ขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2549 และโครงการ RSA5080014 และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ บริษัท บางกอกอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด ที่สนับสนุนในโครงการสำหรับการแช่เยือกแข็ง ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร และเจ้าหน้าที่ในคณะอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่านที่ให้คำแนะนำและการช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ เพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องนิสิตปริญญาโทและเอกสาขาวิทยาศาสตร์การอาหารทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือเป็นอย่างมากตลอดช่วงระยะเวลาของการศึกษาและทำวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องโรงเรียนเซนต์ดอมินิก และวิทยาศาสตร์สาขาเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องสาวที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน ส่งเสริม ตลอดจนเป็นกำลังใจในการศึกษาและในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา

ธัญญ์ ธีระกานต์

มกราคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	41
อุปกรณ์	41
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	54
สรุปและข้อเสนอแนะ	86
สรุป	86
ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	88
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบ	104
ภาคผนวก ข ข้อมูลประกอบผลการทดลอง	117
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	128

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างของอาหารไทยที่ทำจากแป้งข้าว เป็นอาหารหลัก อาหารว่าง และอาหารหวาน	5
2	ไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากแหล่งต่าง ๆ	26
3	คุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และความหวานของไซลิทอลกับน้ำตาลซูโครส	37
4	องค์ประกอบของวัตถุดิบ	54
5	อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด ความหนืดสูงสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และเซตแบคของสตาร์ชข้าว	57
6	ปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ช	67

ตารางผนวกที่

ข1	สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมระบบเจลสตาร์ชผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครส หรือไซลิทอล)	118
ข2	สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมระบบเจลสตาร์ช, เจลสตาร์ชผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครสหรือไซลิทอล) เจลสตาร์ชผสมคอนยัคกลูโคแมนแนน และ เจลสตาร์ชผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนกับน้ำตาลชนิดต่าง ๆ	119
ข3	สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมระบบเจลสตาร์ชผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครสหรือไซลิทอล) เพื่อศึกษาผลของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของระบบสตาร์ชข้าว	120
ข4	ค่าร้อยละการแยกของของเหลวจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครสหรือไซลิทอล)	121
ข5	ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครสหรือไซลิทอล)	122

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข6	ค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วย อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว	123
ข7	ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง แบบช้าและแบบเร็ว	125

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า	6
2 โครงสร้างของแอมิโลส	8
3 โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน	8
4 โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช	10
5 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว	12
6 การเกิดเจลลาติในเซชันของสตาร์ช	13
7 โครงสร้างของเจลสตาร์ช	15
8 โครงสร้างของเจลสตาร์ชในระบบที่มีความเข้มข้นของสตาร์ชต่างกัน	15
9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกับเวลาของตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบด้วย Texture Profile Analysis	18
10 แผนภาพกระบวนการแช่เยือกแข็ง	20
11 แผนภาพสภาวะการเปลี่ยนแปลงในระบบแช่เยือกแข็ง	21
12 ลักษณะการเกิดผลึกน้ำแข็งในเนื้อเยื่อเมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งต่างกัน	22
13 โครงสร้างแบบฟองน้ำของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างการแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษา	23
14 โครงสร้างทางเคมีของคอนยัคกลูโคแมนแนน	29
15 โครงสร้างการเกิดเจลผสมแบบที่ 1	30
16 โครงสร้างการเกิดเจลผสมแบบที่ 2	31
17 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลซูโครส	34
18 โครงสร้างทางเคมีของไซลิทอล	35
19 รูปร่างและลักษณะของเม็ดสตาร์ชข้าวที่กำลังขยาย 100 เท่า	55
20 ค่าแฟกเตอร์การพองตัวของสตาร์ชข้าวที่อุณหภูมิต่าง ๆ	56
21 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ค่าร้อยละการแยกของของเหลวในการคั่นรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ ของ เจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครสหรือไซลิทอล)	60
23	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ ผสมซูโครสหรือไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 หลังการคั่นรูปจาก เยือกแข็งในรอบที่ 1, 3 และ 5 (250x, Bar = 100 μm)	63
24	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ ผสมซูโครสหรือไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10 หลังการคั่นรูปจากเยือกแข็งใน รอบที่ 3 (5000x, Bar = 5 μm)	65
25	ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์เทอร์โมแกรมของระบบเจลสตาร์ช	66
26	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ชกับค่าร้อยละ การแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมซูโครสหรือ ไซลิทอลหลังการคั่นรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 1	68
27	กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของระบบสตาร์ชข้าวกับระบบสตาร์ชข้าวที่ผสม ซูโครสหรือไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20	69
28	ค่าเขตแดนของระบบสตาร์ชข้าวกับระบบสตาร์ชข้าวที่ผสมซูโครสหรือไซลิทอล ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20	70
29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเขตแดนของระบบสตาร์ชกับค่าร้อยละการแยกของ ของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมซูโครสหรือไซลิทอลหลัง การคั่นรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 1	71
30	ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครสหรือไซลิทอล)	73
31	ค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วย อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว	77
32	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเจลสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 21 วัน (250x, Bar = 100 μm)	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
33 ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว	84
ภาพผนวกที่	
ก1 ปริมาณแอมิโลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน	108
ข1 แผนภาพการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วของเจลสตาร์ช	127

การปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง ด้วยคอนยัคกลูโคแมนแนนและน้ำตาลชนิดต่าง ๆ

Improving Quality of Frozen Rice Starch Gels with Konjac Glucomannan and Sugars

คำนำ

การแช่เยือกแข็งอาหารเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้นาน หากมีการดำเนินการแช่เยือกแข็งอย่างถูกต้องเหมาะสม จะช่วยรักษาคุณภาพทั้งในรูป กลิ่น สีและคุณภาพทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์อาหารไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะสิ่งสำคัญ คือ การใช้อุณหภูมิต่ำกับการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ปริมาณวอเตอร์แอคทิวิตี (water activity) จึงลดลง ทำให้ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหารลดลงด้วย แต่จะสามารถรักษาลักษณะเนื้อสัมผัส (texture) ไว้ได้ในระดับปานกลางเท่านั้น ในปัจจุบันสินค้าอาหารแช่เยือกแข็งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ทำให้อุตสาหกรรมอาหารแช่เยือกแข็งมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอาหารพร้อมบริโภค (ready-to-eat food) จะมีสัดส่วนการตลาดในตลาดอาหารแช่เยือกแข็งสูง (ไพบุลย์, 2532; รุ่งนภา, 2535; วิไล, 2546 และสายสนม, 2546) ในระบบของอาหารแช่เยือกแข็งหลายชนิดได้นำสตาร์ชมาใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหาร ทำให้มีความข้นหนืดและเนื้อสัมผัสตามที่ต้องการ (Holmes and Solender, 1981) แต่ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับอาหารแช่เยือกแข็งเหล่านี้ คือ ในระหว่างการแช่เยือกแข็ง การเก็บรักษาและเมื่อนำมาคืนรูปจากเยือกแข็ง (thawing) จะเกิดการแยกตัวของของเหลว (syneresis) และเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช โดยจะมีความสัมพันธ์กับสมบัติความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw stability) ซึ่งทำให้เกิดเนื้อสัมผัสที่ไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค และเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของอาหาร โดยเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ (spongy structure) ขึ้น เป็นเหตุให้อาหารแช่เยือกแข็งเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพ (Lee *et al.*, 2002; Ferrero *et al.*, 2000; Rahman, 1999)

ในระบบของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งพร้อมบริโภคจำพวกของหวาน (frozen desserts) เช่น ขนมหไทย นอกจากส่วนประกอบหลักที่เป็นแป้งหรือสตาร์ชแล้วยังมีส่วนประกอบอื่นผสมอยู่ด้วย ได้แก่ สารอาหารที่ให้รสหวาน โดยส่วนใหญ่จะใช้น้ำตาลซูโครส (sucrose) ซึ่งรู้จักกันดีในชื่อของ “น้ำตาลทราย” โดยน้ำตาลซูโครสเป็นสารให้ความหวานตามธรรมชาติ จัดเป็น

ไดแซ็กคาไรด์ สมบัติเด่นของน้ำตาลซูโครส คือให้รสหวาน ละลายน้ำได้ดี ราคาถูก บริสุทธิ์ และจัดได้ว่าเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร ส่วนในด้านคุณค่าทางโภชนาการ มีรายงานผลการพิสูจน์ว่าระดับของน้ำตาลซูโครสที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย แต่มีผลต่อสุขภาพฟัน เพราะการหมักของแป้งและน้ำตาลก่อให้เกิดความเสี่ยง ต่อโรคฟันผุเนื่องจากแบคทีเรียย่อยสลายและน้ำตาลให้เป็นกรดที่ทำลายสารเคลือบฟัน น้ำตาลทรายใช้ในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น ขนมหวาน เครื่องดื่ม ขนมอบ เป็นต้น (กล้าณรงค์, 2542; บังอร, 2547)

ในปัจจุบันสารให้ความหวานแทนน้ำตาลประเภทน้ำตาลแอลกอฮอล์ (sugar alcohol) ได้เข้ามามีบทบาทเพื่อใช้ทดแทนน้ำตาลซูโครสมากขึ้น โดยผลิตได้จากกระบวนการเติมไฮโดรเจนให้กับน้ำตาลธรรมชาติจะได้น้ำตาลแอลกอฮอล์ หรือพอลิออล (polyol) ตัวอย่างของน้ำตาลแอลกอฮอล์ ได้แก่ ไซลิตอล (xylitol) ซึ่งเป็นน้ำตาลตัวหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจทำให้ในปัจจุบันมีการนำไซลิตอลมาใช้ในอาหารมากขึ้น โดยเป็นสารให้ความหวานที่ลดแคลอรีเพราะให้ค่าพลังงานน้อยกว่าน้ำตาลซูโครส และไซลิตอลยังมีความหวานใกล้เคียงกับน้ำตาลซูโครส โดยน้ำตาลซูโครสกับไซลิตอลมีค่าความหวานสัมพัทธ์เท่ากัน คือมีค่าเท่ากับ 1.0 ข้อดีของน้ำตาลแอลกอฮอล์ คือไม่เกิดการหมักในปาก ลดความเสี่ยงต่อโรคฟันผุ น้ำตาลประเภทนี้ไม่ถูกดูดซึมที่ลำไส้เล็ก มีการย่อยเล็กน้อยที่ลำไส้ใหญ่และให้พลังงานต่ำกว่าน้ำตาลซูโครส ทำหน้าที่คล้ายกับใยอาหาร ซึ่งช่วยป้องกันมะเร็งและโรคที่เกิดจากระบบการย่อยของร่างกาย น้ำตาลแอลกอฮอล์สามารถใช้ร่วมกับสารให้ความหวานอื่นเพื่อเพิ่มปริมาณในผลิตภัณฑ์ (บังอร, 2547; สาโรจน์, 2547)

แม้ว่าในอุตสาหกรรมอาหารแช่เยือกแข็งได้มีการผลิตผลิตภัณฑ์ของหวานแช่เยือกแข็งพร้อมบริโภคจำพวกขนมไทย ที่ใช้แป้งข้าวหรือสตาร์ชข้าวและน้ำตาลเป็นวัตถุดิบในการผลิตออกสู่ตลาดมากขึ้น ในระบบของอาหารหวานเหล่านี้จะเป็นเจลสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณเอมิโลสในระดับปานกลางถึงสูง เมื่อนำไปแช่เยือกแข็งมักประสบปัญหาการแยกตัวของของเหลว (syneresis) และการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ (spongy structure) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสอันเกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช

งานวิจัยจากหลายกลุ่มพบว่าการอัตราการแช่เยือกแข็ง (freezing rate) และการเติมไฮโดรคอลลอยด์ลงในเจลสตาร์ชส่งผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันและการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ในระบบเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง (Ferrero and Zaritzky, 2000; Lee *et al.*, 2002) โดยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีประสิทธิภาพไปลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช การแยกตัวของของเหลวและการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำได้ดีกว่าการเติมไฮโดรคอลลอยด์ (Ferrero *et al.*, 1994;

Ferrero and Zaritzky, 2000) โดยงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้ (Khanna and Tester, 2005) อีกทั้งยังช่วยลดการแยกของของเหลวในระบบเจลสตาร์ชที่เก็บรักษาไว้ ณ อุณหภูมิแช่เย็นได้ดี (Yoshimura *et al.*, 1988, 1996) และคอนยัคกลูโคแมนแนนยังสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้ (อรรณ , 2549) นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมอาหารการใช้น้ำตาลเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารไม่เพียงแต่ใช้เพื่อให้รสหวานเท่านั้น แต่น้ำตาลยังมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของอาหารที่มีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบ (Pongsawatmanit *et al.*, 2007) อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาผลของสมบัติทางกายภาพของระบบสตาร์ชผสมไฮโดรคอลลอยด์และน้ำตาลนั้นยังมีการศึกษาไม่มากนัก จึงทำให้ขาดองค์ความรู้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารหวานแช่เยือกแข็งที่มีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบ

ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือการปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งด้วยคอนยัคกลูโคแมนแนนและน้ำตาลชนิดต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งพร้อมบริโภคจำพวกของหวาน (frozen desserts) ที่ทำจากแป้งข้าวหรือสตาร์ชข้าวที่มีลักษณะเป็นเจล โดยเฉพาะขนมไทย เช่น ขนมชั้น ขนมถ้วยฟู ลอดช่องน้ำกะทิ ขนมปลากิมไข่เต่า ครอบแครงกะทิ เป็นต้น ให้มีคุณภาพและความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งมากขึ้น ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาและรักษาความสดใหม่ของขนมไทยได้ เพื่อเป็นการส่งเสริมการถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้สู่ชุมชนท้องถิ่น จนได้เป็นสินค้าสู่ตลาดการค้าสากล

วัตถุประสงค์

1. เปรียบเทียบผลของคอนยัคกลูโคแมนแนน น้ำตาลชนิดต่าง ๆ และอัตราการแช่เยือกแข็งต่อการแยกของของเหลว การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส และการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง
2. หาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพ และลดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งด้วยคอนยัคกลูโคแมนแนนและน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ในระหว่างการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษา

การตรวจเอกสาร

1. แป้งข้าว

แป้งข้าว (rice flour) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากการนำข้าวหักหรือปลายข้าวมาขัดสีมาบดหรือโม่ ดังนั้นส่วนประกอบของแป้งข้าวจึงประกอบไปด้วยสารอาหารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในวัตถุดิบเดิมทั้งหมด คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใย และแร่ธาตุต่าง ๆ เป็นต้น (อรอนงค์, 2547; Winton, 1906) นอกจากนี้ในประเทศไทยยังถือว่าแป้งข้าวเป็นหนึ่งในสามแห่งรัตนตรีของขนมไทย ที่ประกอบด้วย แป้ง น้ำตาล และมะพร้าว (อรอนงค์, 2547) ตัวอย่างของอาหารไทยที่ทำจากแป้งข้าว เป็นอาหารหลัก อาหารว่าง และอาหารหวาน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างของอาหารไทยที่ทำจากแป้งข้าว เป็นอาหารหลัก อาหารว่าง และอาหารหวาน

ตัวอย่างอาหาร	ลักษณะของอาหาร
อาหารหลัก (อาหารคาว)	
ก๋วยเตี๋ยว	ทำด้วยแป้งข้าวเจ้า เป็นเส้น ๆ
กวยจั๊บ	ทำด้วยแป้งที่ทำเส้นก๋วยเตี๋ยว แต่หั่นเป็นชิ้นใหญ่ ๆ
เกี๊ยมอี	ทำด้วยแป้งข้าวเจ้า เป็นตัว ๆ คล้ายลอดช่อง
อาหารว่าง (ของว่าง)	
ข้าวเกรียบ	ทำด้วยแป้งข้าวเจ้า เป็นแผ่น ตากให้แห้งแล้วปิ้งหรือทอด มีหลายชนิด เช่น ข้าวเกรียบวาว ข้าวเกรียบงา ข้าวเกรียบกุ้ง
ข้าวเกรียบปากหม้อ	ทำด้วยแป้งข้าวเจ้า ละเลงบนผ้าที่จึงปากหม้อ มีไส้ ทำด้วยกุ้ง หรือหมู เป็นต้น
อาหารหวาน (ของหวาน)	
ขนมชั้น	ทำด้วยแป้งข้าวเจ้าปนด้วยแป้งท้าวยายม่อม ผสมกะทิ น้ำตาลทราย ทำเป็นชั้น ๆ มีสีสลับกัน
ขนมถ้วยฟู	ทำโดยตีไข่ขาวกับน้ำตาลผสมแป้งข้าวเจ้ากับน้ำดอกไม้แล้วตีให้เข้ากัน ใส่เชื้อผงฟู หยอดใส่ถ้วย แล้วนั่งจนสุก
ลอดช่องน้ำกะทิ	ตัวลอดช่องทำด้วยแป้งข้าวเจ้าที่ผสมกับน้ำปูนใสและน้ำใบเตย โดยน้ำกะทิจึงการผสมกับน้ำตาลและเกลือ

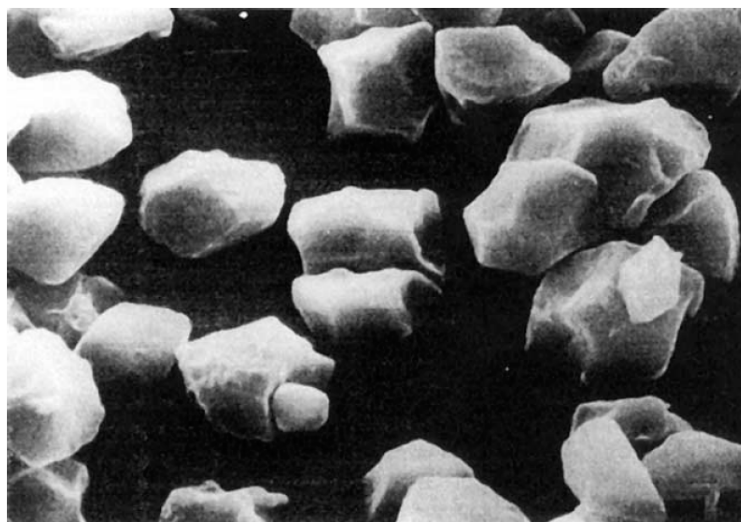
ที่มา: นิรนาม (2548) และอรอนงค์ (2547)

2. สตาร์ช

2.1 สตาร์ชข้าว

สตาร์ชข้าว (rice starch) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้งมาผ่านกระบวนการสกัดสตาร์ช (starch isolation) เพื่อที่จะกำจัดส่วนของโปรตีนที่อยู่ร่วมกับสตาร์ชออกไป (พนอจิต, 2531) จนมีความบริสุทธิ์สูงมาก การแยกโปรตีนมักใช้การแยกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์หลาย ๆ ครั้ง และล้างออกด้วยน้ำแล้วแยกน้ำ จากนั้นนำมาอบแห้ง (สยามล, 2544)

สตาร์ชข้าวเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 90 ในเนื้อเมล็ดของข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้ว ส่วนองค์ประกอบอื่นที่สำคัญในข้าว ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งในบรรดาเมล็ดพืชจากธัญชาติ สตาร์ชข้าวจัดว่ามีขนาดเม็ดสตาร์ชเล็กที่สุด โดยขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 3-8 ไมครอน มีลักษณะเป็นรูปร่างหลายเหลี่ยม (polygonal) และมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ดังภาพที่ 1 เม็ดสตาร์ชข้าวสามารถอยู่รวมกลุ่มกันตั้งแต่ 20 ถึง 60 เม็ดสตาร์ชจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ถึง 150 ไมครอน (Zhou *et al.*, 2002)



ภาพที่ 1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่กำลังขยาย 500 เท่า

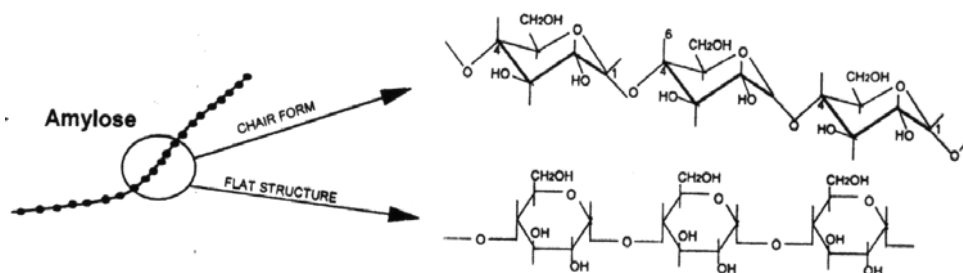
ที่มา: Zhou *et al.* (2002)

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารได้นำสตาร์ชข้าวมาใช้เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารเนื่องจากมีคุณสมบัติคือ ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ภัย (hypoallergenic) ไม่ทำให้เกิดรสชาติที่แปลกปลอม (bland taste) รวมถึงให้ผลิตภัณฑ์อาหารประเภทเจลที่มีเนื้อสัมผัสเรียบมีสีขาวและมีลักษณะเป็นมันเงา (gloss) (Zhou *et al.*, 2002; Bao and Bergman, 2004; Jacques *et al.*, 2006)

2.2 องค์ประกอบของสตาร์ช

สตาร์ชเป็นแหล่งอาหารหลักที่ให้พลังงานแก่มนุษย์ (Fennema, 1983) และเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สำคัญในพืชที่อยู่ภายในเมล็ดสตาร์ช (Singh and Gill, 2003) สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 โดยมีสูตรทางเคมี คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ และสตาร์ชยังจัดเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคสิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) อยู่ เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) สตาร์ชประกอบด้วยโมเลกุลพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (แอมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (แอมิโลเพกทิน)

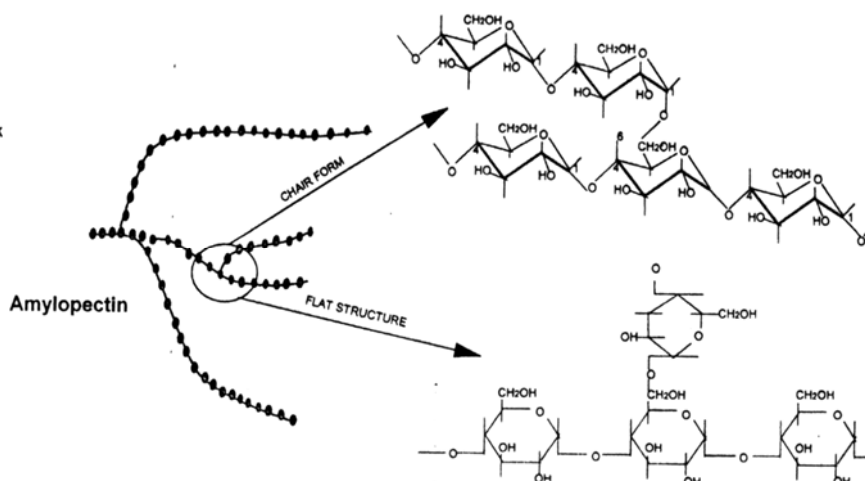
แอมิโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคสิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) ดังภาพที่ 2 และอาจมีกิ่งแขนงบ้างเล็กน้อย จำนวนกิ่งแขนงมีกลูโคสประมาณ 2-11 หน่วยกลูโคส แตกต่างกันไปตามชนิดและแหล่งที่มาของสตาร์ช (Donovan, 1979) มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ $10^5 - 10^6$ ดาลตัน ซึ่งแอมิโลสของสตาร์ชข้าวมีลักษณะเป็นกึ่งเส้นกัน โดยสตาร์ชข้าวมีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization; DP) อยู่ในช่วง 1,000-1,100 หน่วยของน้ำตาลกลูโคส (anhydrous glucose unit; AGU) และความยาวเฉลี่ยของสายโมเลกุลเท่ากับ 250-320 หน่วยของน้ำตาลกลูโคส (Hizukuri *et al.*, 1989) โดยในปี 1992 Juliano ได้แบ่งสตาร์ชข้าวออกเป็น 4 กลุ่มตามปริมาณแอมิโลส ได้แก่ กลุ่มสตาร์ชข้าวเหนียวมีปริมาณแอมิโลส ร้อยละ 0-2 กลุ่มสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำมาก ร้อยละ 5-12 กลุ่มสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางร้อยละ 20-25 และกลุ่มสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงร้อยละ 25-33



ภาพที่ 2 โครงสร้างของเอมิโลส

ที่มา: Murphy (2000)

เอมิโลเพกทิน (amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคสิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคสิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,6 (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) ดังภาพที่ 3 โมเลกุลมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ $10^7 - 10^9$ ดาลตัน (Biliaderis, 1998) ส่วนความยาวเฉลี่ยของสายโมเลกุลในสตาร์ชข้าวเท่ากับ 15-22 หน่วยของน้ำตาลกลูโคส (Lu *et al.*, 1997)



ภาพที่ 3 โครงสร้างของเอมิโลเพกทิน

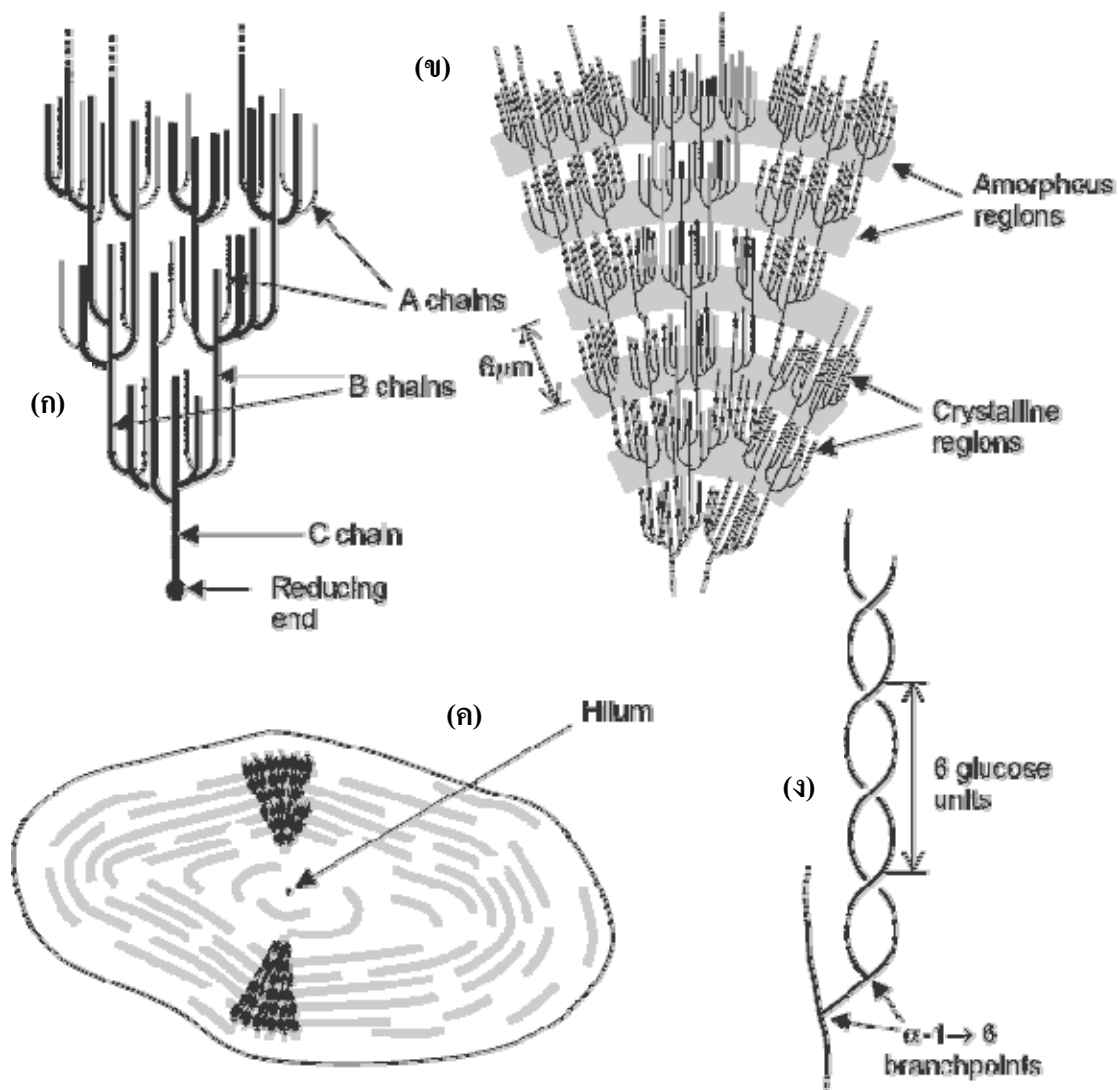
ที่มา: Murphy (2000)

กิ่งสาขาของโมเลกุลแอมิโลเพกทินสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ สาย A (A-chains) เป็นสายที่ไม่มีกิ่งก้านและเกาะกับโมเลกุลอื่นผ่านทางปลายหมู่รีดิวซ์ สาย B (B-chains) เป็นสายที่เชื่อมต่อกับโมเลกุลอื่นด้วยวิธีการเดียวกับสาย A และมีสาย A มาเชื่อมเกาะด้วย 1 จุดหรือมากกว่า ส่วนสาย C (C-chain) เป็นสายที่มีหมู่รีดิวซ์ที่ปลายของโมเลกุล (reducing end) (Tester, 1997) ดังภาพที่ 4 ก ลักษณะรูปแบบโมเลกุลของแอมิโลเพกทินเป็นคลัสเตอร์ (cluster) โดยสาย A และสาย B จะเป็นสายที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มเรียกว่า คลัสเตอร์ แต่ละคลัสเตอร์ประกอบด้วยสายหลัก (สาย C) ที่มีหมู่รีดิวซ์ตรงปลายของโมเลกุลแอมิโลเพกทินอยู่ที่จุดกึ่งกลาง (hilum) ดังภาพที่ 4 ค (วรรณ, 2549)

ภายในเม็ดสตาร์ชจะมีการสร้างทั้งแอมิโลสและแอมิโลเพกทินออกไปตามแนวของรัศมีของเม็ดสตาร์ชจากจุดกึ่งกลางไปสู่ขอบเม็ดสตาร์ช ภายในจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (crystalline regions) และอสัณฐาน (amorphous regions) สลับกันไป ดังภาพที่ 4 ข โดยในส่วนของอสัณฐานจะเป็นส่วนที่ไม่มีความเป็นผลึกซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่อย่างอิสระและส่วนที่เป็นจุดเชื่อมกิ่งของโมเลกุลแอมิโลเพกทินและในส่วนของโครงสร้างผลึกจะประกอบด้วยส่วนของสายโมเลกุลสตาร์ชที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างกันได้โดยจะเกิดเป็นเกลียวคู่ (double helices) ขึ้นภายในโครงสร้าง ดังภาพที่ 4 ง (วรรณ, 2549; Appelqvist and Debet, 1997)

2.3 การพองตัวและการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ช

สตาร์ชในสภาพธรรมชาติ (native starch) ไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าการเกิดเจลลาทีนในเซชันแต่สามารถพองตัวได้ประมาณร้อยละ 10-20 ในน้ำเย็นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำสามารถแพร่และถูกดูดซึมเข้าไปในส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชได้ (Appelqvist and Debet, 1997) โดยเมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนในสภาวะที่มีน้ำอย่างเพียงพอและกวนตลอดเวลาจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นให้แก่เม็ดสตาร์ช (Lii *et al.*, 1996) ทำให้ส่วนที่เป็นผลึกในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย โมเลกุลน้ำเข้าไปเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแอมิโลเพกทินและแอมิโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน เป็นสาเหตุให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและโมเลกุลสตาร์ชบางส่วนที่ละลายได้จะละลายออกมาอยู่นอกเม็ดสตาร์ช (Balagopalan *et al.*, 1988)



ภาพที่ 4 โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช

ก คือ โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน

ข คือ ลักษณะโครงสร้างของแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐาน

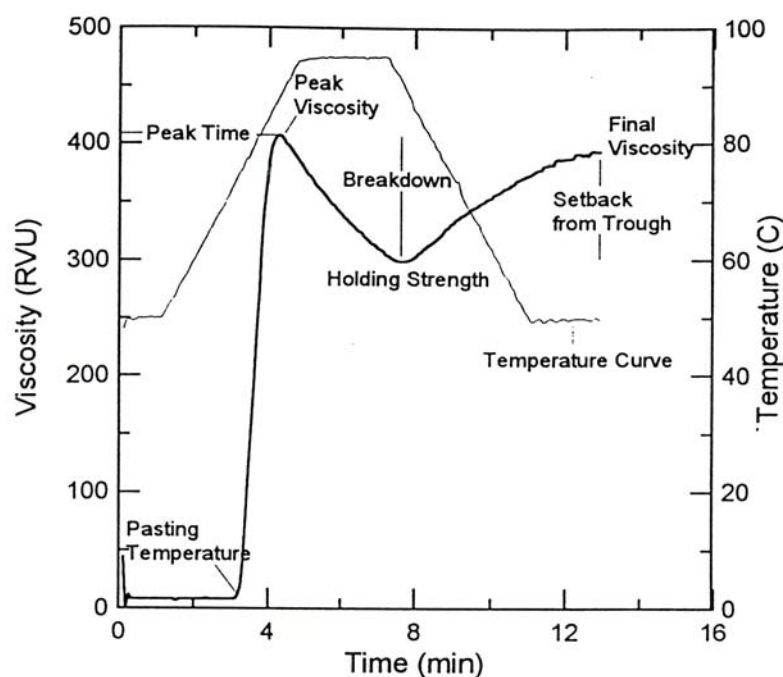
ค คือ ภาพตัดขวางของเม็ดสตาร์ชแสดงการจัดโมเลกุลแอมิโลเพกทิน

ง คือ การเกิดเกลียวคู่ของสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชใกล้เคียง

ที่มา: Oates (1997)

การพองตัวของเมล็ดstarfishสามารถตรวจสอบได้หลายวิธีเช่น วิธีของ Schoch (1964) โดยหาการพองตัวของเมล็ดstarfishในรูปของค่ากำลังการพองตัว (swelling power; SP) ซึ่งได้จาก ปริมาตร หรือน้ำหนักของเมล็ดstarfishที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเมล็ดstarfishพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ และค่าความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของstarfishทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ ส่วนวิธีของ Tester and Morrison (1990) แสดงในรูปของค่าแฟกเตอร์การพองตัว (swelling factor; SF) โดย Gunaratne and Hoover (2002) ได้เปรียบเทียบทั้งสองวิธีและให้ความเห็นว่าวิธีของ Tester and Morrison (1990) จะให้ค่าที่ถูกต้องมากกว่าเนื่องจากเป็นวิธีที่วัดเฉพาะปริมาณน้ำที่เมล็ดstarfishดูดซับไว้ในระหว่างการพองตัวเท่านั้น ส่วนการหาในรูปค่ากำลังการพองตัวนั้นจะวัดรวมปริมาณน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างเมล็ดstarfishภายหลังการพองตัวเข้าไปด้วย

การตรวจสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของstarfishนั้นสามารถทำได้โดย เครื่อง Brabender Viscoamylograph และเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyser; RVA) ซึ่งเครื่องทั้งสองมีหลักการทำงานคือติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของstarfishในระหว่างการทำให้ร้อนจนถึงขั้นการทำให้เย็นและแสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (pasting profile) (Thiewes and Groningen, 1997) ในปัจจุบันการตรวจสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดนิยมทำโดยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็วมากกว่าเนื่องจากใช้ปริมาณตัวอย่างและเวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างน้อยและมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับเครื่อง Brabender Viscoamylograph (Thiewes and Groningen, 1997) โดยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็วเป็นเครื่องมือที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือสามารถให้ความร้อนและดึงความร้อนออกจากระบบได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีความคงที่ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 5 โดยผลที่ได้นี้สามารถนำไปใช้คาดคะเนถึงสมบัติการเจลาทิไนเซชัน และรีโทรเกรเดชันของstarfishแต่ละชนิดได้ (Newport Scientific Ltd., 1995)



ภาพที่ 5 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว

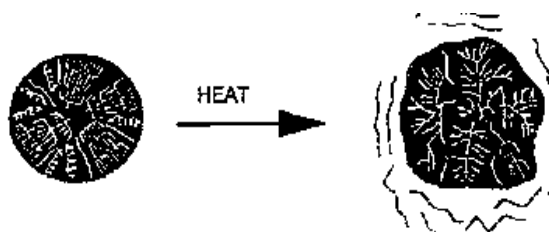
ที่มา: Newport Scientific Ltd. (1995)

จากภาพที่ 5 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว โดยแกน x เป็นเวลา ส่วนแกน y จะมีสองข้างโดยแกนข้างซ้ายเป็นค่าความหนืด มีหน่วยเป็น RVU ส่วนแกนด้านขวาเป็นอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส จะเห็นว่าเมื่อให้ความร้อนแก่สตาร์ชซัสเพนชัน (starch suspension) ในสถานะที่มีการกวนภายใต้แรงเฉือน (shear force) ค่าความหนืดของสตาร์ชจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยเมื่อสตาร์ชซัสเพนชันได้รับความร้อนเม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำเข้าไปในโครงสร้าง ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัว และขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบ ๆ จึงเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดสตาร์ชเคลื่อนที่ได้ยาก เป็นเหตุให้เกิดความหนืดขึ้น ซึ่งเรียกอุณหภูมิที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดนี้ว่า pasting temperature และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นและกวนต่อไปเรื่อย ๆ จนได้ค่าความหนืดสูงสุด ซึ่งจะเรียกจุดนี้ว่า peak viscosity เมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่แล้ว พอเพิ่มอุณหภูมิต่อไปพร้อมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่อง จะทำให้โครงสร้างภายนอกแตกออกหรือเม็ดสตาร์ชเกิดการแตกหัก โมเลกุลของเอมิโลสและเอมิโลเพกทินจะหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช ความหนืดจึงลดลง โดยเมื่อนำค่าความหนืดสูงสุดลบกับค่าความหนืดต่ำสุด (trough) จะได้เป็นค่าความหนืดลดลง (breakdown) และเมื่อถึงความร้อนออกจากระบบ ทำให้อุณหภูมิลดลงก็จะเกิดการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลเอมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช ทำให้

ความหนืดกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งความหนืดที่จุดสุดท้ายนี้เรียกว่า ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ส่วนค่าเซตแบค (setback) ได้จากผลต่างของค่าความหนืดสุดท้ายกับค่าความหนืดต่ำสุด (Newport Scientific Ltd., 1995) ซึ่งค่าเซตแบคนี้สามารถใช้ในการคาดคะเนถึงแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้ (Karim *et al.*, 2000)

2.4 การเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ช

การเกิดเจลลิตินในเซชัน (gelatinization) เป็นการทำลายโครงสร้างผลึก (molecule order) ภายในเม็ดสตาร์ชโดยให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชในสถานะที่มีน้ำเพียงพอ โมเลกุลน้ำสามารถแพร่เข้าไปในส่วนของอสัณฐาน (amorphous) ของเม็ดสตาร์ชได้ก่อน ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลสตาร์ชในส่วนอสัณฐานอ่อนแอลง (Kaletunc and Breslauer, 2003) เม็ดสตาร์ชเริ่มเกิดการพองตัว การพองตัวของส่วนอสัณฐานนี้ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดความเครียด (stress) (Tester and Morrison, 1990) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโมเลกุลในโครงสร้างผลึกอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลสตาร์ชถูกทำลาย น้ำจึงสามารถเข้าไปในส่วนโครงสร้างผลึกทำให้เม็ดสตาร์ชดูดน้ำได้มากขึ้นพร้อมกับพองตัวขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชสลายไป เกิดเป็นการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ พร้อมกับสายโมเลกุลเอมิโลสแพร่ออกมานอกเม็ดสตาร์ช (Whistler and Bemiller, 1999) แสดงดังภาพที่ 6 เม็ดสตาร์ชเริ่มเกิดเจลลิตินในเซชันที่บริเวณจุดกึ่งกลาง (hilum) ในบริเวณส่วนของอสัณฐานเนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีพันธะไฮโดรเจนอ่อนแอ ส่วนที่เป็นผลึกหรือโครงสร้างผลึกเป็นตัวขัดขวางการเกิดเจลลิตินในเซชันของเม็ดสตาร์ช (Kim *et al.*, 1995) ปรากฏการณ์ทั้งหมดนี้เรียกว่า เจลลิตินในเซชัน (gelatinization) หรือการสุกของเม็ดสตาร์ชและเรียกช่วงอุณหภูมินี้ว่า ช่วงอุณหภูมิเจลลิตินในเซชัน (gelatinization temperature range) โดยอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชข้าวอยู่ในช่วง 58-74 องศาเซลเซียส (Matz, 1991)



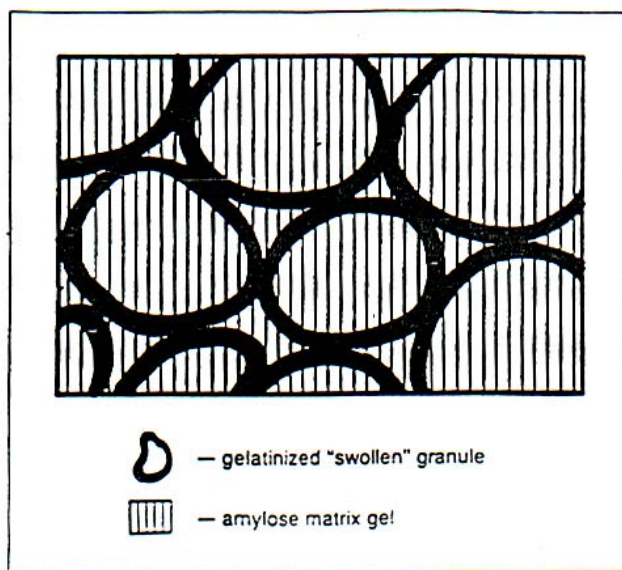
ภาพที่ 6 การเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ช

ที่มา: Murphy (2000)

2.5 การเกิดเจลของสตาร์ช

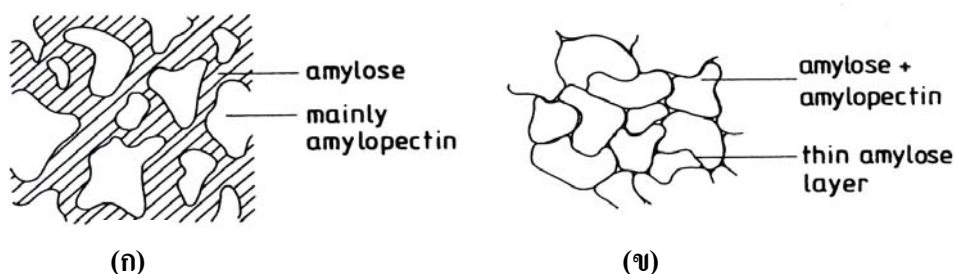
เมื่อสตาร์ชเกิดการเจลาที่ในข้ออย่างสมบูรณ์ ในระบบจะประกอบไปด้วยส่วนของโมเลกุลแอมิโลส และแอมิโลเพกทินบางส่วนที่หลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชกับส่วนของเม็ดสตาร์ชที่เกิดการเจลาที่ในซ้แล้ว ซึ่งโครงสร้างที่ยังหลงเหลืออยู่ส่วนใหญ่ของเม็ดสตาร์ชเป็นโครงสร้างของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน (Balagopalan *et al.*, 1988; Fannon and James, 1992; Mandala *et al.*, 2004; Morris, 1990) โดยเมื่อนำมาทำให้เย็นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในระบบ ซึ่งทำให้เกิดลักษณะของโครงสร้างที่แบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบเป็นเฟสค์และแบบเป็นเจลซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นรวมทั้งหมดของระบบ ถ้าความเข้มข้นรวมของสตาร์ชในระบบมากกว่าความเข้มข้นที่จุดวิกฤต (critical concentration) ซึ่งโดยปกติมีค่าประมาณร้อยละ 6 (น้ำหนักเปียก) จะเกิดโครงสร้างแบบเป็นเจลที่มีความยืดหยุ่น (elastic gel) (Biliaderis, 1998) แต่ถ้าต่ำกว่าจะเกิดเป็นโครงสร้างแบบเฟสค์ที่มีสมบัติก้ำกึ่งระหว่างของแข็งกับของไหล (viscoelastic properties) (Appelqvist and Debet, 1997; Morris, 1990)

ภาพที่ 7 แสดงโครงสร้างของเจลสตาร์ชซึ่งมีส่วนของเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) เป็นส่วนของโมเลกุลแอมิโลสเกิดเป็นเจลกระจายอยู่ในระบบ (amylose matrix gel) และส่วนของเฟสกระจายตัว (dispersed phase) ซึ่งเป็นส่วนของเม็ดสตาร์ชที่เกิดการเจลาที่ในซ้แล้วกระจายตัวอยู่ในส่วนเจลของแอมิโลส (Balagopalan *et al.*, 1988; Fannon and James, 1992; Mandala *et al.*, 2004; Morris, 1990) และภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของเจลสตาร์ชที่มีความเข้มข้นของสตาร์ชแตกต่างกัน โดยภาพ 8 ก แสดงโครงสร้างเจลที่มีความเข้มข้นของสตาร์ชในระบบน้อยกว่าร้อยละ 30 โครงสร้างจะมีลักษณะของเม็ดสตาร์ชกระจายอยู่ในเจลแอมิโลส ส่วนภาพ 8 ข แสดงโครงสร้างเจลที่มีความเข้มข้นของสตาร์ชในระบบมากกว่าร้อยละ 30 ซึ่งส่วนเจลของแอมิโลสจะมีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ แทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ช (Keetels *et al.*, 1995)



ภาพที่ 7 โครงสร้างของเจลสตาร์ช

ที่มา: Morris (1990)



ภาพที่ 8 โครงสร้างของเจลสตาร์ชในระบบที่มีความเข้มข้นของสตาร์ชต่างกัน

(ก) น้อยกว่าร้อยละ 30 (ข) มากกว่าร้อยละ 30

ที่มา: Keetels *et al.* (1995)

สมบัติของเจลสตาร์ชขึ้นกับหลายปัจจัยได้แก่ อันตรกิริยาระหว่างเฟสต่อเนื่องและเฟสกระจายตัว สัดส่วนและความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชที่เกิดการเจลาที่ไนซ์แล้ว และลักษณะของส่วนของเฟสต่อเนื่องที่เป็นส่วนของโมเลกุลแอมิโลส (Biliaderis, 1998) โดยโมเลกุลแอมิโลสสามารถเกิดอันตรกิริยาได้สองรูปแบบคือ แบบที่เกิดเป็นเกลียวคู่แล้วมาต่อสายระหว่างโมเลกุลเข้าด้วยกันกับแบบที่เกิดเป็นเกลียวคู่แล้วเกิดการซ้อนทับกัน (Morris, 1990)

2.6 การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช

เจลสตาร์ชที่เกิดขึ้นหลังการเจลาทิไนซ์จะอยู่ในสภาวะที่ยังไม่สมดุล (non equilibrium state) ระบบจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างโมเลกุลและเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ในระหว่างการเก็บรักษาเรียกการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัย เช่น ชนิดและความเข้มข้นของสตาร์ช อัตราส่วน และโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน ระบบในการให้ความร้อนและการทำให้เย็น ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) และชนิดขององค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ไขมันและน้ำตาล (Biliaderis, 1998; Jacobson and BeMiller, 1998) การเกิดรีโทรเกรเดชันแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลแอมิโลสโดยการเกิดเป็นเกลียวคู่ และซ้อนทับจับกันมากขึ้นซึ่งจะใช้เวลาไม่กี่ชั่วโมงหลังการเก็บรักษา และช่วงที่ 2 คือ การเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินโดยเกิดการจับกันระหว่างสายกิ่งภายในโมเลกุลเกิดเป็นเกลียวคู่และซ้อนทับกันภายในโครงสร้างซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิการเก็บรักษาเท่ากับอุณหภูมิห้อง (Miles *et al.*, 1985; Soest *et al.*, 1994) และส่งผลต่อเจลสตาร์ชคือ ทำให้เจลมีความแข็งมากขึ้นรวมทั้งเกิดการแยกเฟสของเจลทำให้โมเลกุลของของเหลวแยกออกจากโครงสร้างเรียกว่า การเกิดการแยกของของเหลว (syneresis) (Biliaderis, 1992; Miles *et al.*, 1985; Morris, 1990)

การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นกระบวนการตกผลึกของสายโพลิเมอร์ (crystallization) ซึ่งเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและระยะเวลาโดยแบ่งกลไกในการเกิดได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. ขั้นการก่อนิวเคลียสผลึก (nucleation) เป็นขั้นตอนเริ่มการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโมเลกุลของสตาร์ชซึ่งเรียกว่า การเกิดนิวเคลียสผลึก (nuclei) โดยจะเกิดได้ที่อุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature; T_m) และอุณหภูมิกลาตทรานซิชัน (glass transition temperature; T_g) ซึ่งมีค่าประมาณ -5 ถึง 60 องศาเซลเซียสสำหรับโมเลกุลแอมิโลเพกทิน และ -5 ถึง 150 องศาเซลเซียสสำหรับโมเลกุลแอมิโลส (Biliaderis, 1998; Eerlingen *et al.*, 1993; Jacobson and BeMiller, 1998; Siliverio *et al.*, 2000; Wunderlich, 1976)

2. ขั้นการเพิ่มขนาดผลึก (propagation) เป็นขั้นตอนที่นิวเคลียสผลึกเติบโต และมีการเพิ่มขนาดซึ่งเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายของโมเลกุลสตาร์ชโดยการเกิดเป็นเกลียวคู่มากขึ้น รวมทั้งเกิดจากการซ้อนทับกันระหว่างสายของโมเลกุลสตาร์ชที่เกิดเกลียวคู่ด้วย (helix-helix aggregation) โดยช่วงอุณหภูมิการเกิดการเพิ่มขนาดผลึกเป็นช่วงอุณหภูมิเดียวกับการเกิดนิวเคลียสผลึก ($T_g < T < T_m$) (Biliaderis, 1992; Biliaderis, 1998; Eerlingen *et al.*, 1993; Jacobson and BeMiller, 1998; Siliverio *et al.*, 2000; Wunderlich, 1976)

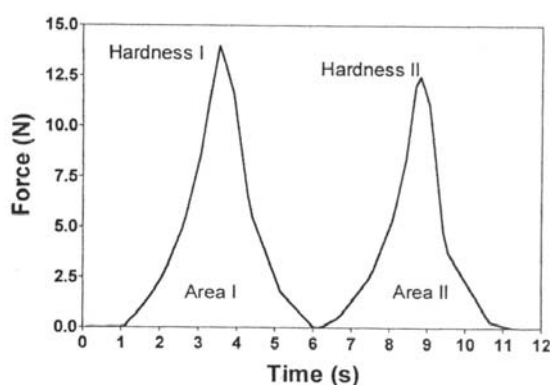
3. ขั้นการเกิดผลึกเต็มที่ (maturation) เป็นขั้นตอนที่ผลึกที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์ (perfection) โดยอาจมีการเปลี่ยนแปลงเติบโตได้อีกแต่เป็นไปด้วยอัตราแบบช้า (Wunderlich, 1976)

การตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชแต่ละชนิดในปัจจุบันมักทำโดยการเก็บรักษาเจลสตาร์ชที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (isothermal treatment) เช่น ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสหรือโดยการเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการหาสมบัติความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw cycle process; FTC process) ซึ่งทำโดยการแช่เยือกแข็งและทำละลายเจลสตาร์ชที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซ้ำไปมาหลาย ๆ รอบ (Biliaderis, 1998; Jacobson and BeMiller, 1998) จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาอัตราและปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

1. การหาร้อยละการแยกของของเหลว (% syneresis) โดยวิธีการหมุนเหวี่ยง (centrifugation method) เมื่อเกิดรีโทรเกรเดชันสายโมเลกุลสตาร์ชจับกันได้มากขึ้นทำให้ของเหลวถูกบีบออกจากเจล ดังนั้นเมื่อเกิดรีโทรเกรเดชันมากปริมาณของของเหลวที่ถูกขับแยกออกมาจึงมากตามไปด้วย (Baker and Duarte, 1998; Yuan and Thompson, 1998)

2. การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันทำให้เนื้อสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปจึงสามารถวัดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ โดยการเกิดรีโทรเกรเดชันมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับความแข็ง (hardness) (Karim *et al.*, 2000) สำหรับเนื้อสัมผัสเจลนิยมตรวจสอบโดยการวัดค่าเลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ ซึ่งให้ค่าการวัดที่มีความหมายเหมือนหรือคล้ายคลึงกับค่าที่ประเมินได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส เรียกวิธีการวัดค่าแบบนี้ว่า Imitative test หรือเรียกอีกอย่างว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) โดยวัดแรงกดตัวอย่างสองครั้งติดต่อกัน แล้วรายงานเป็นค่าแรงที่

ใช้ในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามตามที่กำหนดครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง (Hardness I และ Hardness II) แสดงดังภาพที่ 9 ซึ่งกราฟที่ได้จากการวัดตัวอย่างด้วยวิธี Texture Profile Analysis เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่เกิดขึ้นกับเวลาทั้งหมดในการวัดค่า โดยความแข็ง (hardness I) หมายถึง ค่าแรงสูงสุดที่อ่านได้จากกราฟ TPA ที่เกิดขึ้นในการกด ตัวอย่างลงครั้งที่หนึ่ง (ชงชัย, 2550; ปาริฉัตร, 2545)



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกับเวลาของตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบด้วย

Texture Profile Analysis

ที่มา: ปาริฉัตร (2545)

3. การตรวจสอบโครงสร้างแบบผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction; XRD) เพื่อหา XRD-pattern ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดรีโทเกรเดชัน (Karim *et al.*, 2000)

4. การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (DSC) ใช้ในการวิเคราะห์การเกิดรีโทเกรเดชัน โดยเมื่อเกิดรีโทเกรเดชันมากค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายผลึกจะมีค่ามากตามไปด้วย ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้เมื่อเจลสตาร์ชมีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 20 (Jacobson and BeMiller, 1998; Karim *et al.*, 2000)

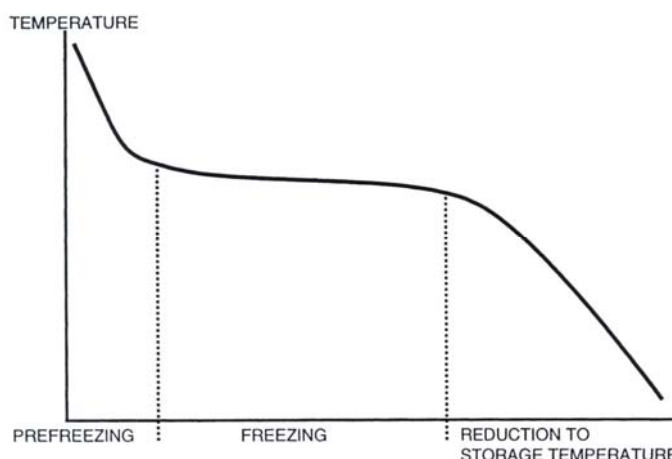
3. การแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งอาหารเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้นานหากมีการดำเนินการแช่เยือกแข็งอย่างถูกต้องเหมาะสมจะช่วยรักษาคุณภาพทั้งในรูป กลิ่น สีและคุณภาพทางโภชนาการไว้ได้สูง (สายสนม, 2546)

3.1 กระบวนการแช่เยือกแข็ง

หลักพื้นฐานในการแช่เยือกแข็ง คือ การลดอุณหภูมิของอาหารหรือผลิตภัณฑ์นั้นให้ต่ำลงจนถึงระดับที่สิ่งมีชีวิตนั้นไม่สามารถจะดำเนินปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่อไปได้ โดยทั่วไปมักจะเป็นที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า ซึ่งหลักสำคัญคือ การเปลี่ยนสถานะของน้ำในอาหารที่เป็นของเหลวให้เป็นน้ำแข็ง เพื่อมิให้น้ำนั้นสามารถทำหน้าที่ต่าง ๆ ในปฏิกิริยาเคมี (สายสนม, 2546)

International institute of refrigeration (IIR) ได้แบ่งกระบวนการแช่เยือกแข็งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังภาพที่ 10 ดังนี้ ขั้นที่ 1 คือ ขั้นก่อนการแช่เยือกแข็ง (prefreezing stage) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิเกิดผลึกน้ำแข็ง (freezing point) โดยน้ำในระบบจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลึกน้ำแข็ง ขั้นที่ 2 คือ ขั้นการแช่เยือกแข็ง (freezing stage) เป็นขั้นที่ความร้อนถูกดึงออกจากระบบ ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะไปเป็นผลึกน้ำแข็ง และขั้นที่ 3 คือ ขั้นการลดอุณหภูมิไปจนถึงอุณหภูมิในการเก็บรักษา (reduction to storage temperature) ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิที่เกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุดไปจนถึงอุณหภูมิที่ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานความร้อน (Persson and Londahl, 1993)



ภาพที่ 10 แผนภาพกระบวนการแช่เยือกแข็ง

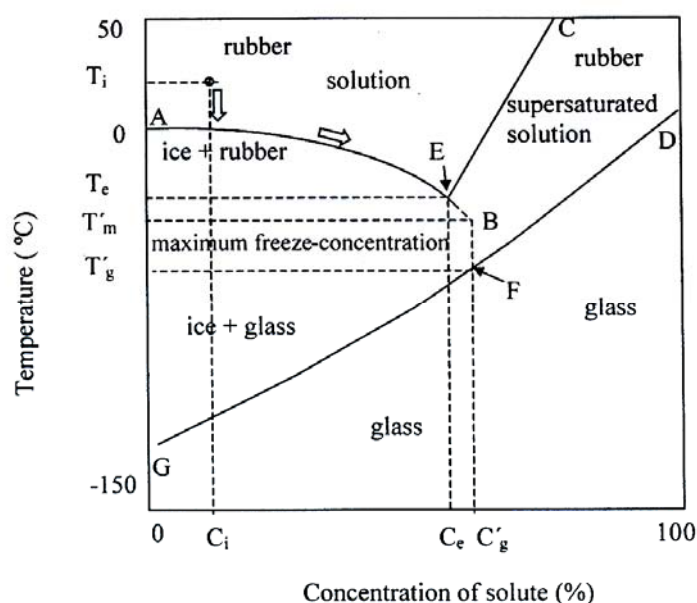
ที่มา: Heldman and Taylor (1997)

กระบวนการแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการตกผลึกน้ำแข็งซึ่งมีขั้นตอนการเกิดที่สำคัญ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการก่อผลึกนิวเคลียส (nucleation) และการเติบโตของผลึก (propagation or crystal growth) (Goff, 1997) โดยการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการแช่เยือกแข็งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างสภาพอสัณฐาน (amorphous state) ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่สมดุล (non equilibrium state) ระบบยังเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในโครงสร้างตลอดเวลากับสถานะกลาส (glassy state) ซึ่งเป็นสถานะที่ระบบมีความหนืดสูง โมเลกุลต่าง ๆ ภายในระบบจึงเคลื่อนที่และเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้น้อยลง (Goff, 1997; Roos and Karel, 1991)

แผนภาพสภาวะการเปลี่ยนแปลงในระบบแช่เยือกแข็งจะเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิในระหว่างการแช่เยือกแข็ง และความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในภาพที่ 11 โดยเส้น AB คือเส้นกราฟการแช่เยือกแข็ง (freezing curve) เส้น CE คือ เส้นกราฟการละลาย จุด E คือ จุดยูเทกติก (eutectic point) และเส้น DFG คือ เส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงสู่สถานะกลาส (glass transition) (Chanes *et al.*, 2004)

ในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิของระบบจะถูกทำให้ลดลง และน้ำในผลิตภัณฑ์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นผลึกน้ำแข็งซึ่งเกิดจากกระบวนการ 2 ขั้นตอนคือ การก่อนิวเคลียส ผลึกและการเติบโตของผลึก โดยเมื่อส่วนของน้ำในระบบลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของผลึกน้ำแข็ง ตัวถูกละลายในส่วนของเฟสที่ไม่ได้ถูกแช่เยือกแข็ง (unfrozen phase; UFP) ก็จะมี

ค่าเพิ่มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้แสดงตามแนวเส้น AE ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงในสภาวะสมดุล (equilibrium process) โดยมีจุดเริ่มต้นตั้งแต่ที่อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการหลอมเหลวของน้ำที่ 0 องศาเซลเซียสไปจนถึงอุณหภูมิเยือกแข็งของตัวถูกละลาย (T_c) ที่จุด E ซึ่งเป็นจุดที่ตัวถูกละลายมีความเข้มข้นอยู่ในสภาพอิ่มตัว เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า T_c ก็จะส่งผลให้ตัวถูกละลายเกิดการตกผลึกซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงในระบบที่ไม่สมดุล (Chanes *et al.*, 2004; Goff *et al.*, 1997)



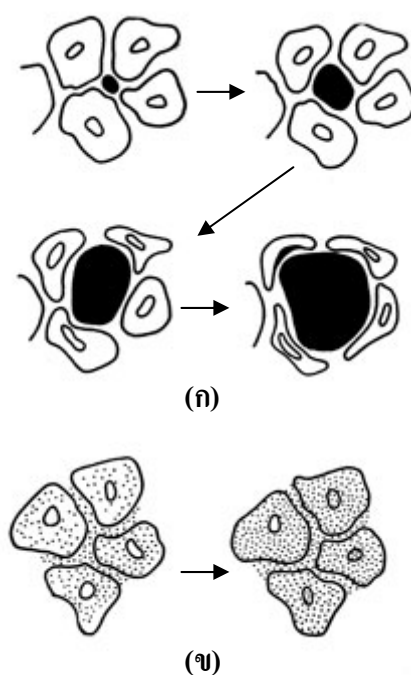
ภาพที่ 11 แผนภาพสภาวะการเปลี่ยนแปลงในระบบแช่เยือกแข็ง

ที่มา: Chanes *et al.* (2004)

ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของระบบ เมื่อความเข้มข้นของส่วน UFP ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่า T_g ในระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่า T_g ก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วยตามแนวเส้น DFG โดยเมื่อความเข้มข้นของส่วนนี้มีค่าสูงที่สุด (C'_g) ค่า T_g ที่จุดนี้จะเรียกว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชันในระบบแช่เยือกแข็ง (glass transition of the freeze-concentrated solute matrix; T'_g) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ระบบเกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุดและทำให้ส่วนที่ไม่เป็นน้ำแข็งมีความหนืดมากที่สุด โดยสภาวะที่จะเกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุดนั้นจะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า T'_g แต่ต่ำกว่า T'_m (onset temperature of ice melting in maximally freeze-concentrated solute matrix) ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการละลายของน้ำแข็งในสภาวะที่เกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุด (Chanes *et al.*, 2004; Roos, 1995; Roos and Karel, 1991) นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า เหนือเส้นกราฟ DFG ระบบจะอยู่ในสภาวะรับเบอรี่หรือสภาวะอสัณฐาน และจะเปลี่ยนสู่สภาวะกลาสเมื่อระบบอยู่ใต้เส้นกราฟ DFG (Chanes *et al.*, 2004)

3.2 อัตราการแช่เยือกแข็ง

อัตราการแช่เยือกแข็ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหน่วยเวลา หรือหมายถึง เวลาที่ผ่านไปในช่วงอุณหภูมิกำหนดหนึ่ง (ไพบูลย์, 2532) อัตราการแช่เยือกแข็งมีความสัมพันธ์กับ อัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งโดยขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง โดยการแช่เยือกแข็งแบบช้า (อัตราเร็วน้อยกว่า 1 องศาเซลเซียสต่อนาที) ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ภายนอกเซลล์ ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กสม่ำเสมอ กระจายอยู่ทั่วทั้งภายในและภายนอกเซลล์ (สายสนม, 2546; วิไล, 2546; Fellows, 1988; Fennema, 1976) ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ลักษณะการเกิดผลึกน้ำแข็งในเนื้อเยื่อเมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งต่างกัน

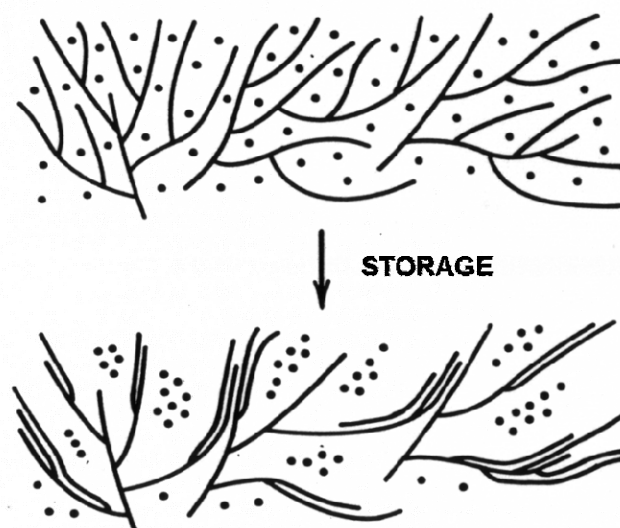
(ก) การแช่เยือกแข็งแบบช้า (ข) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

ที่มา: คัดแปลงจาก Fellows (1988)

3.3 เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

3.3.1 การเปลี่ยนแปลงของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

ในระบบของสตาร์ชในระหว่างการแช่เยือกแข็งจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ประกอบด้วย การเพิ่มความชุ่มของผลิตภัณฑ์ การเกิดโครงสร้างที่แข็งกระด้าง รวมทั้งการสูญเสียน้ำ โดยสิ่งที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสายตรง และการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลสายกิ่งในสตาร์ชจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวเจ้า โดยระดับการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสายตรงสูง ดังนั้นอาหารที่ประกอบไปด้วยสตาร์ชเหล่านี้จึงมีแนวโน้มของการเกิดเจล ความชุ่มเพิ่มขึ้น และความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง ดังภาพที่ 13 ที่แสดงให้เห็นถึง การแช่เยือกแข็งทำให้โครงสร้างของเจลสตาร์ชสูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) ผลที่ตามมาคือ เกิดการแยกตัวของของเหลวออกจากเจล (syneresis) ทำให้เกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ (spongy structure) ขึ้น โดยระบบของเจลสตาร์ชจะมีเสถียรภาพไม่แน่นอน และเป็นระบบที่ไม่สมดุล ดังนั้น โครงสร้างของเจลสตาร์ชจึงมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษา (Schoch, 1968)



ภาพที่ 13 โครงสร้างแบบฟองน้ำของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างการแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษา

ที่มา: Schoch (1968)

3.3.2 ความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง (freeze-thaw stability) ของสตาร์ช

ความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง หมายถึง การที่ผลิตภัณฑ์ยังคงมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ไม่มีลักษณะเป็นก้อน (lumpy) หรือเป็นเม็ด (grainy) ไม่เกิดลักษณะโครงสร้างแบบฟองน้ำ (spongy structure) และไม่เกิดการแยกตัวของของเหลวออกมา (syneresis) หลังจากที่ผ่านมาการแช่เยือกแข็งแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็ง (Richardson, 1988) โดยความคงตัวต่อการคืนรูปจากแช่เยือกแข็งนั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ตรวจสอบความคงทนของสตาร์ช หรือผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบเมื่อผ่านการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (Jacobson and BeMiller, 1998) ดังนั้นการวัดความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของสตาร์ชจึงสามารถใช้ประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้ (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

3.3.3 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็ง (freezing rate) ต่อเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

Ferrero *et al.* (1994) ได้ทดสอบความคงตัวหลังผ่านการแช่เยือกแข็งและคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลสตาร์ชข้าวโพดผสมแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ที่ความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับร้อยละ 10 โดยใช้อัตราการแช่เยือกแข็งเท่ากับ 0.3, 0.6 และ 270 เซนติเมตรต่อชั่วโมงพบว่า การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (270 เซนติเมตรต่อชั่วโมง) ช่วยเพิ่มความคงตัวโดยป้องกันการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลเอมิโลสซึ่งส่งผลให้ไม่ปรากฏลักษณะโครงสร้างแบบฟองน้ำ และมีร้อยละการแยกของของเหลวน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

Jacobson and BeMiller (1998) ตรวจสอบผลของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการวัดความขุ่นพบว่า อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันขึ้นอยู่กับอัตราการแช่เยือกแข็ง ถ้าใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันจะมากกว่า โดยเมื่อนำเจลไปเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธี freeze-thaw cycles (FTC) จากนั้นหมุนเหวี่ยงแล้วแยกส่วนใสด้านบนไปวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่หลงเหลืออยู่เพื่อประเมินปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันพบว่า การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่หลงเหลืออยู่ในส่วนใสที่แยกได้จากส่วนเจลมากกว่าแบบช้าซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าจะทำให้โมเลกุลเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน หรือเกิดรีโทรเกรเดชันมากกว่า

ในปี 2002 Varavinit *et al.* ได้แช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าว (มีปริมาณแอมิโลส ร้อยละ 28) ด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง 2 ระดับ คือ อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว โดยนำเจลสตาร์ช ข้าวจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 3.5 นาที ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง และอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ได้จากนำเจลสตาร์ชไป แช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำ ตัวอย่างไปคืนรูปเยือกจากแข็งในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลที่ได้พบว่าเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ให้ค่าร้อยละ การแยกของของเหลวต่ำกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

ในปี 2008 Muadklay and Charoenrein ได้ทดสอบความคงตัวต่อการคืนรูปจาก เยือกแข็ง (freeze-thaw stability) ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.25 และ 0.50 ที่ความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับร้อยละ 5 โดยใช้อัตราการแช่เยือกแข็งเท่ากับ 0.06, 0.90 และ 2.30 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า เจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการ แช่เยือกแข็งแบบเร็ว (2.30 องศาเซลเซียสต่อนาที) สามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลว ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้มากกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตรา การแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (0.90 องศาเซลเซียสต่อนาที) และเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วย อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (0.06 องศาเซลเซียสต่อนาที)

4. การใช้ไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนประกอบในระบบของสตาร์ช

ไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) คือ กัมที่ละลายในน้ำ (water-soluble gum) เป็นคำศัพท์ ที่มาจากคำว่า hydro ซึ่งเป็นภาษากรีกที่แปลว่า น้ำ รวมกับภาษาฝรั่งเศส col แปลว่า กาว และ oid แปลว่า เหมือน ส่วน gum เป็นภาษาอิตาเลียนแปลว่า สารที่มีลักษณะเหนียว (sticky substance) (Peterson and Johnson, 1978) ดังนั้นในด้านของทางอาหาร คำว่า ไฮโดรคอลลอยด์ จึงเป็นคำที่ใช้ เรียกพวกพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีน โดยในปัจจุบันมีการนำเอาไฮโดรคอลลอยด์มาใช้กันอย่าง กว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งการนำไปใช้มีวัตถุประสงค์หลายประการ เช่น เป็นสารให้ ความข้นหนืด (thickening agent) เป็นสารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) ช่วยในการเกิดเจล (gelling agent) ทำให้เกิดการกระจายตัว (dispersion) และยับยั้งการเกิดผลึกของน้ำแข็ง (inhibiting ice crystal formation) เป็นต้น ซึ่งการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อปรับปรุงลักษณะ เนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏและสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์อาหารให้เป็นที่ยอมรับนั้น โดยทั่วไปในผลิตภัณฑ์อาหารจะนิยมเติมไฮโดรคอลลอยด์ในระดับความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 1

ส่วนสสารนั้นจัดเป็นไฮโดรคอลลอยด์ชนิดหนึ่งที่มีสัดส่วนการใช้มากที่สุดในตลาดโลก (นิธิยา, 2545; Phillips and Williams, 2000; Stephen, 1995)

4.1 การแบ่งชนิดของไฮโดรคอลลอยด์

ไฮโดรคอลลอยด์สามารถแบ่งตามแหล่งที่มาของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต โดยแบ่งเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่ผลิตได้จากพืช, สาหร่าย, จุลินทรีย์ และสัตว์ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากแหล่งต่าง ๆ

แหล่งที่มา	ไฮโดรคอลลอยด์
พืช	
ต้นไม้ (trees)	เซลลูโลส
ยางและสารสกัด (exudates and extracts)	กัมอารบิก กัมคารายา กัมแกดดี กัมทราคาแคนท์
พืช (plants)	สตาร์ช เพกทิน เซลลูโลส
เมล็ด (seeds)	กัวร์กัม โลคัสต์บินกัม ทารากัม กัมจากเมล็ดมะขาม
พืชหัว (tubers)	คอนยัคกลูโคแมนแนน
สาหร่าย	
สาหร่ายสีแดง (red seaweeds)	อะการ์หรือวุ้น คาร์ราจีแนน
สาหร่ายสีน้ำตาล (brown seaweeds)	แอลจิเนต
จุลินทรีย์	แซนแทนกัม เดกซ์แทรน เจลแลนกัม
สัตว์	เจลาติน เคซีน โปรตีนเวย์ โคลโทแซน

ที่มา: คัดแปลงจาก Phillips and Williams (2000)

4.2 สมบัติทั่วไปของไฮโดรคอลลอยด์

การใช้ไฮโดรคอลลอยด์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพอย่างสมบูรณ์จำเป็นต้องทราบถึงสมบัติของไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ การกระจายตัวในน้ำ ความหนืด และการเกิดเจล ซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องการของไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหาร (รุ่งนภา, 2550)

4.2.1 การกระจายตัวในน้ำ

ไฮโดรคอลลอยด์ส่วนใหญ่ละลายได้ดีในน้ำร้อน มีเพียงบางชนิดเท่านั้นที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น และบางชนิดละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ การที่ไฮโดรคอลลอยด์มีความสามารถในการละลาย หรือการกระจายตัวได้ในน้ำผันแปรแตกต่างกัน เรียกว่า degree of solubility ซึ่งปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้อง คือ อุณหภูมิและความเข้มข้น (นิธิยา, 2545)

ในการเตรียมสารละลายไฮโดรคอลลอยด์ ต้องทำให้ไฮโดรคอลลอยด์จับกับน้ำ (hydrated) อย่างเต็มที่เพื่อให้ไฮโดรคอลลอยด์ทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ การทำให้ไฮโดรคอลลอยด์จับกับน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ต้องให้อนุภาคของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละอนุภาคที่ประกอบกันเป็นพองนั้น แยกออกจากกันได้อย่างอิสระเมื่อเติมเข้าไปในเฟสส่วนที่เป็นน้ำ (aqueous phase) เพื่อป้องกันการเกิดลักษณะการจับเป็นกลุ่ม (agglomeration) ที่เรียกว่าตาปลา (fish eyes) ซึ่งเกิดจากอนุภาคของไฮโดรคอลลอยด์บางส่วนชุ่มไปด้วยน้ำ แล้วพองตัวที่ด้านนอก หุ้มส่วนของพองที่ไม่ถูกน้ำและเป็นพองแห้งอยู่ภายใน การทำให้เกิดการกระจายตัวในน้ำได้ดี สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง หรือผสมกัมกับส่วนประกอบแห่งอื่น ๆ ในสูตร เช่น น้ำตาลหรือเกลือ ก่อนนำไปละลายน้ำ เมื่ออนุภาคของพองไฮโดรคอลลอยด์มีการกระจายตัวที่ดี ไฮโดรคอลลอยด์จะเริ่มดูดซึมน้ำไว้ในโมเลกุล โดยอนุภาคนขนาดเล็กจะดูดซึมน้ำได้เร็วกว่าอนุภาคนขนาดใหญ่กว่า แต่อนุภาคนขนาดใหญ่กว่าจะกระจายตัวได้ง่ายกว่า (รุ่งนภา, 2550)

4.2.2 ความหนืด

เมื่อไฮโดรคอลลอยด์ละลายในน้ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น โดยไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดจะมีความหนืดแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืด ได้แก่ ธรรมชาติของพอลิแซ็กคาไรด์กัม อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ละลาย ความเข้มข้นของสารละลายกัม และระยะเวลาที่ใช้ในการละลาย (นิธิยา, 2545)

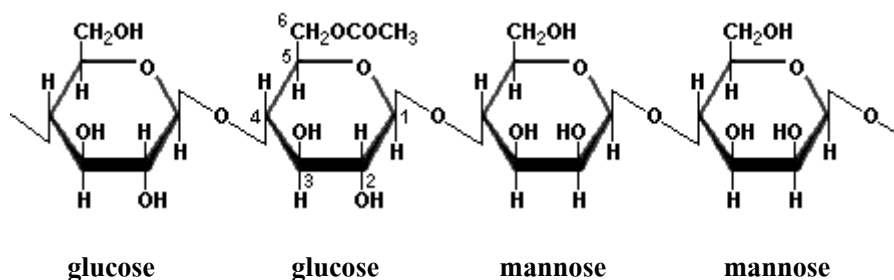
4.2.3 การเกิดเจล

การเกิดเจล เป็นการเปลี่ยนสถานะของเฟสจากของไหลไปเป็นสถานะที่คล้ายของแข็งหรือเป็นเจล (นิธิยา, 2545) ซึ่งเป็นผลจากความสามารถของไฮโดรคอลลอยด์ที่ทำให้เกิดเป็นเจล ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ที่เกิดจากสายโซ่ของโมเลกุลแต่ละสายมาเกี่ยวพันกันในลักษณะเฉพาะตัว โดยขั้นตอนการเกิดเจลของไฮโดรคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ และขั้นตอนการเตรียมที่ถูกต้อง เนื่องจากสารที่ทำให้เกิดเจลแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัว (รุ่งนภา, 2550)

4.3 คอนยัคกลูโคแมนแนน

คอนยัคกลูโคแมนแนน (konjac glucomannan; KGM) เป็นองค์ประกอบหลักที่พบในหัวบุก ซึ่งบุกเป็นพืชล้มลุกมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Amorphophallus spp.* ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการนำผงบุก (konjac flour) มาใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (food additive) มานานกว่า 1,000 ปี โดยผงบุกที่นำมาใช้นั้นส่วนใหญ่สกัดมาจากหัวบุกชนิด *Amorphophallus konjac C. koch* (Khanna and Tester, 2006; Ratcliffe *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2005) ซึ่งโดยทั่วไปผงบุกมีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้ กลูโคแมนแนนประมาณร้อยละ 49-60, สตาร์ชร้อยละ 10-30, ไฟเบอร์ร้อยละ 2-5, โปรตีนประมาณร้อยละ 14, น้ำตาลรีดิคัลซิงซ์ร้อยละ 3-5 และเถ้าร้อยละ 3.4-5.3 ทั้งนี้ปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของบุก (CyberColloids Ltd., 2006)

คอนยัคกลูโคแมนแนนเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยแมนโนสและกลูโคสในอัตราส่วน 1.6 : 1 เชื่อมต่อกันด้วยพันธะบีต้า-1,4-กลูโคสิดิก มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 200,000-2,000,000 ดาลตัน และมีหมู่แอซีทิล (acetyl groups) กระจายอยู่ทั่วไปบนสายโมเลกุลของคอนยัคกลูโคแมนแนนประมาณร้อยละ 5-10 ซึ่งหมู่แอซีทิลจะอยู่ทุกระยะ 9-19 หน่วยของแมนโนสหรือกลูโคส (Khanna and Tester, 2006; Nishinari and Takahashi, 2003; Tye, 1991; Zhang *et al.*, 2005) โดยหมู่แอซีทิลจะอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของแมนโนสหรือกลูโคส และระดับความสามารถในการละลาย (degree of water solubility) ของคอนยัคกลูโคแมนแนนขึ้นอยู่กับหมู่แอซีทิลที่กระจายอยู่ทั่วไปบนสายโมเลกุลของคอนยัคกลูโคแมนแนน (Dave *et al.*, 1998) โครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 โครงสร้างทางเคมีของคอนยัคกลูโคแมนแนน

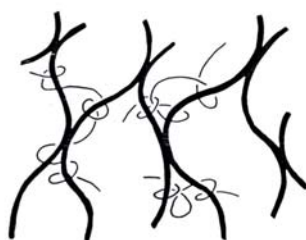
ที่มา: Zamora (2007)

คุณสมบัติของคอนยัคกลูโคแมนแนนในด้านสุขภาพของมนุษย์ คือ สามารถลดระดับคอเลสเตอรอล และระดับน้ำตาลในเลือด ช่วยควบคุมน้ำหนักตัว ช่วยในการทำงานของระบบลำไส้ และระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย จึงทำให้ในปัจจุบันมีการนำคอนยัคกลูโคแมนแนนมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและอาหารเสริมสุขภาพ ทางเภสัชกรรม ทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพ และทางอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ (Zhang *et al.*, 2005)

สมบัติของคอนยัคกลูโคแมนแนนมีอยู่หลายประการด้วยกัน เช่น เป็นสารให้ความข้นหนืด (thickener) ในอาหาร เช่น พวกซूपกับซอส สามารถเกิดเจลได้ หรือเป็นสารให้ความคงตัว หรือเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการเลือกใช้และลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยเมื่อนำมาละลายน้ำจะคือน้ำแล้วเกิดการพองตัว ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น และมีสมบัติเป็นซูโดพลาสติก (pseudoplastic) นอกจากนี้คอนยัคกลูโคแมนแนนยังสามารถเกิดเจลได้ในสภาวะที่เป็นเบสอ่อน ๆ เจลที่ได้ทนความร้อนได้ดี มีความแข็งแรงมาก และยังมีความคงตัวสูงอีกด้วย (Takigami, 2000) นอกจากสภาวะที่เป็นเบสอ่อน ๆ แล้ว คอนยัคกลูโคแมนแนนยังสามารถเกิดเจลได้เมื่ออยู่ร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์บางชนิด เช่น สามารถเกิดเจลได้เมื่อผสมกับแซนแทนกัมแล้วให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Morris, 1992) หรือใช้ร่วมกับแคลปคาร์ราจีแนนก็ทำให้เกิดเจลได้ดี (Takigami, 2000) และยังมีการนำไปใช้ทำฟิล์มที่ให้ลักษณะเหนียว มีเสถียรภาพทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น หรือในระบบที่มีความเป็นกรดและเบสได้ดี (Tye, 1991) นอกจากนี้แล้วคอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอาหาร และเป็นวัตถุเจือปนในผลิตภัณฑ์อาหารได้ โดยได้รับการจัดให้เป็น GRAS (generally recognized as safe) โดยองค์การอาหารและยา (Food and Drug Administration; FDA) และกระทรวงเกษตรของสหรัฐอเมริกา (US Department of Agriculture; USDA) อีกด้วย (Takigami, 2000)

4.4 การเกิดเจลผสมระหว่างไฮโดรคอลลอยด์กับสตาร์ช

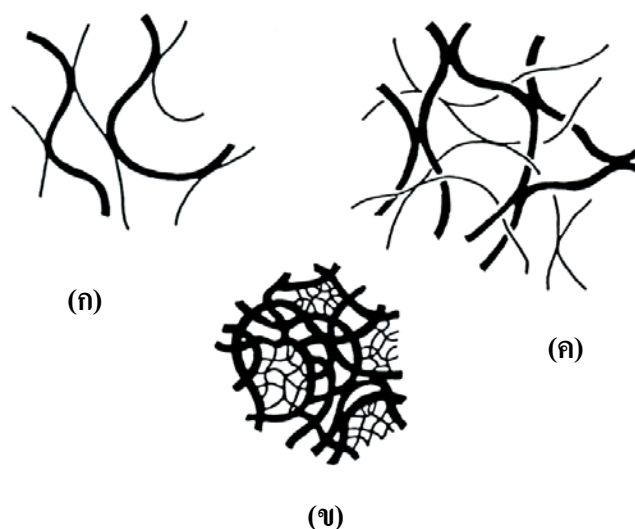
การเกิดเจลผสมในระบบที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ (Morris, 1986) ดังแสดงในภาพที่ 15 และ 16



ภาพที่ 15 โครงสร้างการเกิดเจลผสมแบบที่ 1

ที่มา: Brownsey and Morris (1998)

ภาพที่ 15 และ 16 แสดงการเกิดเจลแบบที่ 1 และ 2 โดย Morris (1986) แบ่งชนิดของเจลตามความแตกต่างที่เห็นได้ชัดคือ เจลแบบที่ 1 พอลิเมอร์ชนิดแรกไม่ได้เกิดโครงสร้างแบบเป็นเจลแต่อยู่ในรูป active form โดยจะแทรกอยู่ในโครงข่าย (network) ของเจลพอลิเมอร์ชนิดที่ 2 ส่วนการเกิดเจลแบบที่ 2 พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถเกิดโครงสร้างแบบเป็นเจลได้ โดยชนิดของเจลที่ได้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดในระบบ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ (ก) เจลแบบร่วมกันสานตัว (coupled networks) เกิดจากพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดในระบบสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันแล้วเกิดเป็นโครงสร้างแบบเจลขึ้น (ข) เจลแบบแยกกันสานตัว (phase-separated networks) เกิดจากพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน เจลที่ได้มีลักษณะเป็นเจลของพอลิเมอร์ชนิดที่ 1 แทรกอยู่ร่วมกับเจลของพอลิเมอร์ชนิดที่ 2 โดยไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน และ (ค) เจลแบบสอดแทรกสานตัว (interpenetrating networks) เจลที่ได้ประกอบด้วยโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดแทรกอยู่ด้วยกันโดยตลอดทั้งโครงสร้างของเจล (Brownsey and Morris, 1998)



ภาพที่ 16 โครงสร้างการเกิดเจลผสมแบบที่ 2

(ก) เจลแบบร่วมกันสานตัว (coupled networks)

(ข) เจลแบบแยกกันสานตัว (phase-separated networks)

(ค) เจลแบบสอดแทรกสานตัว (interpenetrating networks)

ที่มา: Brownsey and Morris (1998)

เนื่องจากการนำไฮโดรคอลลอยด์มาใช้ในระบบของสตาร์ช ทำให้สมบัติของสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไป เช่น สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชัน ลดการเกิดการแยกตัวของของเหลว (syneresis) ทำให้ระบบมีความคงตัว (stable) และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบได้ ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสมบัติทางกายภาพของสตาร์ช

Yoshimura *et al.* (1998) ได้ทดสอบสมบัติวิฤภาคการไหลหรือวิทยากระแส (rheological properties) ของสตาร์ชข้าวโพดผสมคอนยัคกลูโคแมนแนน พบว่าคอนยัคกลูโคแมนแนนสนับสนุนการเกิดเจลของแอมิโลสในสตาร์ชข้าวโพด จึงอาจเป็นการส่งเสริมการเกิดรีโทรเกรเดชันในช่วงต้น แต่ระหว่างการเก็บรักษาตัวอย่างที่มีการเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความเค้น (breaking stress) ช้ากว่าสตาร์ชข้าวโพดที่ไม่ได้เติมคอนยัคกลูโคแมนแนน โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของความเค้นเป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าเจลมีความแข็ง (hardness) และมีการแตกเปราะ (brittle) มากขึ้น ดังนั้นแสดงว่าคอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันในระยะยาวได้ โดยคาดว่าคอนยัคกลูโคแมนแนนนั้นแทรกอยู่ในส่วนวิฤภาคต่อเนื่องของสตาร์ชข้าวโพด และคอนยัคกลูโคแมนแนนยังช่วยลดการแยกตัวของของเหลวออกจาก

เจลสตาร์ชข้าวโพดในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสอีกด้วย นอกจากนี้ในปี 1996 Yoshimura *et al.* ได้ทดสอบนำเจลสตาร์ชข้าวโพดที่มีการเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนแล้วนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส พบว่าคอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้

Ferrero *et al.* (1994) พบว่าเมื่อเติมแซนแทนกัมในระบบของเจลสตาร์ชข้าวโพดแช่เยือกแข็ง การแยกตัวของของเหลว (syneresis) การเกิดรีโทรเกรเดชันของเอมิไลส และการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิทยาการไหล (rheological) ของเจลสตาร์ชลดลง

Lee *et al.* (2002) ตรวจสอบผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของสตาร์ชมันเทศ พบว่าแอลจินेट กัวร์กัม และแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 กับ 0.6 สามารถลดการเกิดการแยกของของเหลวได้ โดยที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 แซนแทนกัมสามารถลดการแยกตัวของของเหลวได้มากที่สุด ในขณะที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.6 กลับพบว่ากัวร์กัมให้ผลดีกว่าแซนแทนกัม แต่ทั้งแอลจินेट กัวร์กัม และแซนแทนกัมสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมันเทศได้ โดยแอลจินेटมีประสิทธิภาพดีกว่าแซนแทนกัม และกัวร์กัม ตามลำดับ

อรรณ (2549) ได้ทดสอบระบบเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนความเข้มข้นร้อยละ 0.0, 0.3 และ 0.5 ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และเร็ว โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 และ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0 ถึง 90 วัน แล้วตรวจวัดค่าร้อยละการแยกของของเหลว เนื้อสัมผัส และการเกิดรีโทรเกรเดชันของเอมิไลเพกทิน เพื่อดูความคงตัวของการคืนรูปจากเยือกแข็ง พบว่าทั้งอัตราการแช่เยือกแข็ง และคอนยัคกลูโคแมนแนนล้วนมีผลต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง โดยการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถลดการแยกของของเหลว การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส การเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ การเกิดรีโทรเกรเดชันของเอมิไลสและเอมิไลเพกทินของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนลงได้ ส่วนการเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้เจลสตาร์ชข้าวมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งสูงขึ้น โดยเห็นผลได้ชัดเจนในกลุ่มที่ใช้อัตราเร็วการแช่เยือกแข็งแบบช้า พบว่าการเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 สามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลว การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส และการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำได้ดีกว่าการเติมในระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.3 และ 0.0 ตามลำดับ แต่คอนยัคกลูโคแมนแนนไม่สามารถยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของเอมิไลเพกทินในเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้ ซึ่งสันนิษฐานว่าคอนยัคกลูโคแมนแนนน่าจะเข้าไปอยู่เป็นส่วนหนึ่งของวิทยาการกระจายในโครงสร้างหลัก

ของเจลและไปกีดขวางการจับกันของโมเลกุลเอมิโลส สำหรับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 และ -18 องศาเซลเซียส ซึ่งระบบจะอยู่ในสถานะกลาส (glassy state) จึงไม่มีผลให้เกิดความแตกต่างของค่าการแยกของของเหลว การเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ ค่าความแข็งของเจล รวมไปถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของเอมิโลเพกทิน โดยระยะเวลาการเก็บรักษาไม่มีผลต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งในแต่ละสถานะ

Pongsawatmanit *et al.* (2006) ตรวจสอบผลของการเติมไซโลกลูแคน (xyloglucan) จากเมล็ดมะขามต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดและความคงตัวของสตาร์ชมันสำปะหลัง ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยมีความเข้มข้นรวมของพอลิแซ็กคาไรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก พบว่าไซโลกลูแคนมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และความหนืดสุดท้าย (final viscosity) เพิ่มขึ้น และจากการทดสอบความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง พบว่าเพสต์สตาร์ชมันสำปะหลังที่ผสมไซโลกลูแคนมีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งดีกว่าเพสต์สตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ได้ผสมไซโลกลูแคน เนื่องจากเพสต์สตาร์ชมันสำปะหลังที่ผสมไซโลกลูแคนมีการแยกตัวของของเหลวน้อยกว่าเพสต์สตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ได้ผสมไซโลกลูแคน

Satrapai and Suphantharika (2007) ตรวจสอบผลของบีต้ากลูแคนจากยีสต์ที่ใช้ทำเบียร์ (brewer's yeast) ต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยมีความเข้มข้นรวมของพอลิแซ็กคาไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก พบว่าบีต้ากลูแคนสามารถลดการแยกตัวของของเหลวออกจากเจลสตาร์ชข้าวได้ และบีต้ากลูแคนยังสามารถลดความแข็งของเจลสตาร์ชข้าว (gel hardness) ที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่าง ๆ ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเบต้ากลูแคนสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวได้

Muadklay and Charoenrein (2008) ตรวจสอบผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยตรวจสอบไฮโดรคอลลอยด์ 4 ชนิด (กัวร์กัม คอนยัคกลูโคแมนแนน โลคัสต์บินกัม และแซนแทนกัม) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 กับ 0.50 พบว่าการเติมแซนแทนกัมมีประสิทธิภาพในการลดการแยกของของเหลว และลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังได้ดีที่สุด รองลงมาคือ โลคัสต์บินกัม และคอนยัคกลูโคแมนแนน ส่วนกัวร์กัมนั้นกลับทำให้เกิดการแยกตัวของของเหลวมากขึ้น

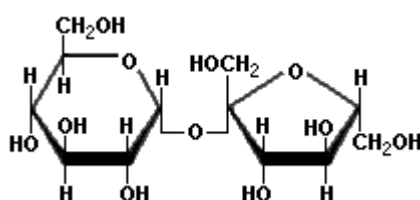
5. การใช้น้ำตาลเป็นส่วนประกอบในระบบของสัตว์

ในระบบของอาหารโดยทั่วไปจะใช้น้ำตาลเป็นส่วนประกอบในอาหารเพื่อให้มีรสชาติตามที่ต้องการ โดยน้ำตาลจัดเป็นสารให้ความหวานแก่ผลิตภัณฑ์อาหาร นอกจากนี้น้ำตาลยังมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของอาหารอีกด้วย (Baek *et al.*, 2004)

5.1 น้ำตาลซูโครส

น้ำตาล หรือน้ำตาลทรายที่ใช้กันทั่วไปนั้น หมายถึง น้ำตาลซูโครส (sucrose) ซึ่งเป็นผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด มีลักษณะเป็นเกล็ดใส มีสีขาว ปราศจากกากน้ำตาล (molasses) (กล้าณรงค์, 2542; ศิริลักษณ์, 2525) น้ำตาลซูโครสมีชื่อเรียกอื่น ๆ อีก เช่น น้ำตาลอ้อย และแซ็กคาไรส (saccharose) (วรรณ, 2549)

น้ำตาลซูโครส มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า α -D-glucopyranosyl-(1 $\rightarrow$ 2)- β -D-fructofuranoside จัดเป็นไดแซ็กคาไรด์ หรือน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่ประกอบขึ้นจากน้ำตาล 2 ชนิดที่ต่างกัน คือ น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโทส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -(1 $\rightarrow$ 2) มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 342 มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{12}H_{22}O_{11}$ สูตรโครงสร้างของน้ำตาลซูโครสดังแสดงในภาพที่ 17 ปกติน้ำตาลบริสุทธิ์จะอยู่ในรูปผลึกแบบ monoclinic ไม่มีสี และมีลักษณะโปร่งแสง ปกติเมื่อพืชสังเคราะห์จะสร้างแป้งเพื่อเก็บไว้เป็นอาหาร แต่ในพืชบางชนิดสามารถสังเคราะห์น้ำตาลซูโครสได้ในปริมาณสูงและเก็บไว้ในลำต้นหรือหัวได้ โดยเฉพาะอ้อย หรือหัวบีต เมื่อนำพืชประเภทนี้มาสกัดโดยน้ำ น้ำตาลจะละลายออกมาและเมื่อทำการสกัดสิ่งแปลกปลอมออก จะสามารถตกผลึกน้ำตาลออกมาได้ (กล้าณรงค์, 2542; นิธิยา, 2545; วรรณ, 2549)



ภาพที่ 17 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลซูโครส

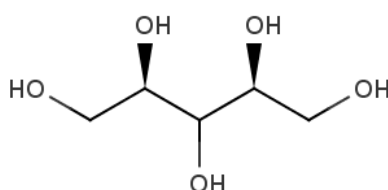
ที่มา: Zamora (2007)

น้ำตาลซูโครสเป็นวัตถุดิบที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากจะเป็นสารให้ความหวานแล้ว ยังมีหน้าที่อื่น ๆ อีกมากที่หาสารอื่น ๆ ทดแทนไม่ได้ ทั้งนี้เพราะน้ำตาลซูโครสมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความหนืด ความแวววับ เป็นต้น (กล้าณรงค์, 2542)

คุณสมบัติทางเคมีของน้ำตาลซูโครสที่สำคัญ คือ การแตกตัวของน้ำตาลซูโครสในสภาวะที่มีความร้อนสูง หรือสภาพความเป็นกรด-เบสสูง น้ำตาลซูโครสจะเกิดการแตกตัวเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ปัญหาการแตกตัวของน้ำตาลทรายในอุตสาหกรรมอาหารมักประสบเสมอ คือ สภาพการเกิดสี เช่น สีแดง สีนํ้าตาล ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เมื่อนํ้าตาลซูโครสแตกตัวออกมาเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทส (กล้าณรงค์, 2542) นอกจากนี้ถ้านํ้าตาลซูโครสได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวได้เป็นคาราเมล (caramel) มีสีน้ำตาล (นิธิยา, 2545)

5.2 ไซลิทอล

ไซลิทอล (xylitol) จัดเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ (sugar alcohol) ชนิดหนึ่งที่มีจำนวนคาร์บอน 5 อะตอมเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถพบได้ในผักและผลไม้ตามธรรมชาติ เช่น ในลูกพรุนเหลืองจะมีไซลิทอลอยู่มากที่สุดเกือบจะเท่ากับร้อยละ 1 ของน้ำหนักแห้ง (สาริโรจน์, 2547) ไซลิทอลมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 152 มีสูตรโมเลกุล คือ $C_5H_{12}O_5$ (Tong *et al.*, 2007) สูตรโครงสร้างของไซลิทอลดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 โครงสร้างทางเคมีของไซลิทอล

ที่มา: Tong *et al.* (2007)

ปัจจุบันการผลิตไซลิทอลในระดับอุตสาหกรรมเป็นกระบวนการทางเคมีที่ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก เริ่มต้นจากการสกัดไซโลส (xylose) ด้วยกรดจากวัสดุทางการเกษตรที่มีส่วนประกอบของไซเลน (xylane) ซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 20-30 แล้วนำสารละลายไซโลสที่สกัดได้ไปทำให้บริสุทธิ์ก่อนที่จะนำไปผ่านปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) จากนั้นจึงทำการตกผลึกไซลิทอล และทำให้บริสุทธิ์ต่อไปในขั้นตอนสุดท้าย (สารโจน, 2547)

ในบรรดาสารให้ความหวานชนิดให้พลังงานเพื่อทดแทนน้ำตาลซูโครสนั้น พบว่าไซลิทอลมีความหวานใกล้เคียงกับน้ำตาลซูโครส สมบัติที่เด่นชัดมากของไซลิทอลอยู่ที่จุลินทรีย์ในช่องปากของคนเราไม่สามารถใช้ไซลิทอลเป็นแหล่งอาหารได้ จึงทำให้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ในช่องปากที่ก่อให้เกิดสภาพกรดได้ ไซลิทอลจึงเป็นสารให้ความหวานตัวแรกในธรรมชาติที่ได้มีการศึกษาทางด้านคลินิกแล้วว่าสามารถป้องกันโรคฟันผุได้ (สารโจน, 2547) เนื่องจากไซลิทอลดูดพลังงานขณะอยู่ในรูปสารละลาย (negative heat of solution) จึงทำให้มีอุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้รู้สึกเย็น โดยที่ความรู้สึกนี้จะต่างจากรสเย็นของเมนทอล (menthol) (กล้าณรงค์, 2542) เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของไซลิทอลกับน้ำตาลซูโครสแล้ว พบว่าไซลิทอลน่าจะทดแทนน้ำตาลซูโครสได้ในผลิตภัณฑ์อาหารแทบทุกชนิดโดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงสูตรอาหาร ยกเว้นประเภทที่ต้องการใช้น้ำตาลของคาราเมลเท่านั้น (สารโจน, 2547) คุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และความหวานของไซลิทอลกับน้ำตาลซูโครสเปรียบเทียบในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และความหวานของไซลิทอลกับน้ำตาลซูโครส

คุณสมบัติ	ไซลิทอล	น้ำตาลซูโครส
น้ำหนักโมเลกุล	152	342
จุดหลอมเหลว (°ซ)	93.0-94.5	179-186
จุดเดือด (°ซ/760 มม.ปรอท)	216	สลายตัว
ความหนาแน่น (15 °ซ)	1.50	1.59
พลังงาน (แคลอรี/กรัม)	2.4-3.0	4.0
การหมักด้วยจุลินทรีย์	ไม่ได้	ได้
การเกิดคาราเมล	ไม่ได้	เกิด
ความสามารถในการละลาย (กรัม/100 กรัมของสารละลาย ที่ 20 °ซ)	63	66.7
การดูดความชื้น (ร้อยละ)		
ที่ความชื้นร้อยละ 60	0.05	0.02
ที่ความชื้นร้อยละ 92	90	4
ความหนืด (cP) (20 °ซ)		
ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10	1.23	1.31
ที่ความเข้มข้นร้อยละ 60	20.63	58.50
ความหวานสัมพัทธ์	1.0	1.0

ที่มา: สารโรจน์ (2547); Embuscado (2006)

ในอุตสาหกรรมอาหารได้มีการนำไซลิทอลไปใช้เป็นสารให้ความหวานในหมากฝรั่ง ลูกกวาดชนิดแข็ง (hard candy) และช็อกโกแลต (Embuscado, 2006) นอกจากนี้ยังมีการใช้ไซลิทอลเป็นสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครสในของหวานแช่เยือกแข็ง ขนมหั้ว ขนมหั้วกรอบ และเค้ก (Bond and Dunning, 2006)

5.3 ผลของน้ำตาลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของระบบสตาร์ช

ในอาหารที่มีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบโดยส่วนใหญ่มีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ซึ่งน้ำตาลที่ผสมลงไปนอกจากจะให้รสหวานแล้ว น้ำตาลยังมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น การเกิดเจลในเซชัน การเกิดรีโทรเกรเดชัน เป็นต้น ทั้งนี้คุณสมบัติต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ชและน้ำตาล (Pongsawatmanit *et al.*, 2007; Torley and Molen, 2005) ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบผลของน้ำตาลต่อสมบัติทางกายภาพของสตาร์ช

Prokopowich and Biliaderis (1995) ตรวจสอบผลของไรโบส ซูโครส และมอลโตทรีโอส ต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวกับเจลสตาร์ชข้าวสาลี ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิทรี (differential scanning calorimetry; DSC) พบว่าไรโบส ซูโครส และมอลโตทรีโอส สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวกับเจลสตาร์ชข้าวสาลีได้

Aee *et al.* (1998) ตรวจสอบผลของน้ำตาลซูโครสต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชเอคอร์น (acorn starch gel) ด้วยเทคนิค DSC โดยศึกษาน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10 และ 15 พบว่าน้ำตาลซูโครสสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชเอคอร์นได้ โดยการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชเอคอร์นนี้นั้นจะลดได้มากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มขึ้น

Baker and Rayas-Duarte (1998) ตรวจสอบผลของน้ำตาล 3 ชนิด คือ กลูโคส ซูโครส และฟรักโทสต่อความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลสตาร์ชแอมมะแรนซ์ (amaranth starch gel) โดยศึกษาน้ำตาล 3 ชนิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดทำให้เจลสตาร์ชแอมมะแรนซ์มีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง โดยสามารถลดการแยกของของเหลวได้

Lii *et al.* (1998) ตรวจสอบผลของน้ำตาลซูโครสต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าว ด้วยเทคนิค DSC โดยศึกษาน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นร้อยละ 5-20 พบว่าน้ำตาลซูโครสสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวได้

Back *et al.* (2004) ตรวจสอบผลน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์ 12 ชนิด คือ ไรโบส ไชโลส กลูโคส ฟรักโทส แมนโนส ซูโครส มอลโทส ไอโซมอลโทส ทรีฮาโลส ซิลิทอล แมนนิทอล และซอร์บิทอล ต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวโพดแช่เย็นกับแช่เยือกแข็ง ด้วยเทคนิค DSC พบว่าเมื่อเก็บรักษาเจลสตาร์ชข้าวโพดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน แอมิโลเพกทินจะเกิดการตกผลึกใหม่ (amylopectin recrystallization) หรือแอมิโลเพกทินกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่มากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์เพิ่มมากขึ้น ส่วนการเก็บรักษาเจลสตาร์ชข้าวโพดที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วันนั้น แอมิโลเพกทินจะเกิดการตกผลึกใหม่น้อยลง

6. ระบบของสตาร์ชผสมไฮโดรคอลลอยด์และน้ำตาล

ในระบบของอาหารหวานที่มีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบโดยทั่วไปมักใช้น้ำตาลซูโครสและไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งจากการที่ใช้น้ำตาลซูโครสและไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนประกอบในอาหารหวานที่มีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบนั้น ดังนั้นจึงมีการทดสอบระบบของอาหารที่มีสตาร์ชผสมไฮโดรคอลลอยด์และน้ำตาลเพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพ และความคงตัวของอาหารหวานที่มีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบ (Krüger *et al.*, 2003)

Ferrero *et al.* (2000) ได้ทดสอบระบบจำลองของอาหาร (model food systems) ที่มีสตาร์ชข้าวโพด น้ำตาลซูโครส และน้ำ แล้วมีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ ซึ่งใช้แซนแทนกัม กัวร์กัม และโซเดียมแอลจินเนตในอัตราส่วนที่ต่ำ เมื่อระบบจำลองของอาหารเกิดการเจลาติไนซ์ แล้วนำไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราที่ต่างกัน จากนั้นนำไปเก็บรักษา พบว่าในระบบจำลองของอาหารที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์ลงไปเมื่อนำไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราที่ช้าและในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -19 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ (sponge formation) ขึ้น เนื่องจากแอมิโลสเกิดรีโทรเกรเดชัน และจากการศึกษาโดยใช้เทคนิค DSC พบว่าแอมิโลเพกทินเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเช่นกัน และที่สภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ในระบบจำลองของอาหารที่มีสตาร์ชและน้ำตาลซูโครสเป็นองค์ประกอบที่ไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์จะมีผลต่อคุณภาพของเพสต์ (pastes) ส่วนในสภาวะที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ลักษณะเนื้อสัมผัสของเพสต์จะเป็นที่ยอมรับได้

นอกจากนี้ Pongsawatmanit *et al.* (2007) ตรวจสอบผลของน้ำตาลซูโครสต่อสมบัติทางกายภาพของระบบสตาร์ชมันสำปะหลังผสมกับไซโลกลูแคน (อัตราส่วน 10/1, 8/2 และ 6/4) โดยศึกษาน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 40 พบว่า อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ของระบบสตาร์ชมันสำปะหลังผสมกับไซโลกลูแคนเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มขึ้น และความหนืดสูงสุด (peak viscosity) กับความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของระบบสตาร์ชมันสำปะหลังผสมกับไซโลกลูแคนที่มีน้ำตาลซูโครสมีค่าที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของไซโลกลูแคนกับน้ำตาลซูโครสรวมกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

- 1.1 สตาร์ชข้าว จากบริษัท โรงเส้นหมีขอเฮง จำกัด อ.สามพราน จ.นครปฐม
- 1.2 คอนยัคกลูโคแมนแนน จากบริษัท คีทเฮล์ม จำกัด
- 1.3 น้ำตาลซูโครส (Food grade) จากบริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด
- 1.4 ไซลิทอล (Food grade) จากบริษัท รามาโปรดักชั่น จำกัด

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

- 2.1.1 เครื่องกวนที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ (High Torque stirrer, Ingenieurburo CAT, M.Zip รุ่น R50D, Germany)
- 2.1.2 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Memmert รุ่น WB22, Germany)
- 2.1.3 ตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิต่ำ (Low temperature incubator)
- 2.1.4 เครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิกแบบพ่นไอไนโตรเจนเหลว (Cryogenic cabinet freezer รุ่น Mini Batch Freezer 1000L, Bangkok Industrial Gas Co., Ltd.)
- 2.1.5 ตู้แช่เยือกแข็ง (Chest freezer Sanyo รุ่น SF-C1495)
- 2.1.6 สายเทอร์โมคอปเปิล (Thermocouple) และเครื่องบันทึกข้อมูล (Data-logger)
- 2.1.7 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (Sartorius รุ่น BP 3100S, Germany)
- 2.1.8 หลอดนํ้ายขนาด 25 มิลลิลิตร
- 2.1.9 หม้อนึ่ง
- 2.1.10 แผ่นความร้อน (Hot plate)
- 2.1.11 แผ่นความร้อนพร้อมเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer) และแท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)

2.1.12 พาราฟิล์ม (parafilm)

2.1.13 ก่อ่งโฟม

2.1.14 ขวดสีชาขนาด 500 มิลลิลิตร

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ

2.2.1 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot air oven, Memmert รุ่น ULE500, Germany)

2.2.2 ตู้อบแห้งสุญญากาศ (Vacuum oven, EYELA รุ่น vos-300sd, Japan)

2.2.3 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge, MRC รุ่น CN-1050, Israel)

2.2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (Microscope, Leica รุ่น DME)

2.2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, JEOL รุ่น JMS-5600LV, England)

2.2.6 เครื่องทำแห้งจุดวิกฤต (Critical point dryer, CPD, Energy Beam Sciences รุ่น K850, USA)

2.2.7 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC, Pyris1 Perkin-Elmer, USA)

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

2.2.9 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer, Stable Micro System รุ่น TA-Xtplus, UK)

2.2.10 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (Kjeldahl apparatus, Buchi)

2.2.11 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Tecator รุ่น Soxtec system HT)

2.2.12 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, Thermo Electron Corporation รุ่น GENESYS™10, USA)

2.2.13 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace, Gallenkamp รุ่น FSE-261-210D)

2.2.14 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (OHAUS รุ่น AP210-0, Switzerland)

2.2.15 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3. สารเคมี

3.1 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์แอมิโลส

- 3.1.1 เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 (Ethanol, Analytical grade, Merck, Germany)
- 3.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, Analytical grade, Merck, Germany)
- 3.1.3 กรดแอซีติกกลั่น (Glacial acetic acid, Analytical grade, Merck, Germany)
- 3.1.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (Amylose from potato, Sigma, USA)
- 3.1.5 ไอโอดีน (Iodine, Carlo Erba Reagent, Italy)
- 3.1.6 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, Ajax Finechem, Australia)

3.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์โปรตีน

- 3.1.1 กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 95-97 (Sulfuric acid, Analytical grade, Merck, Germany)
- 3.1.2 คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulphate, Analytical grade, Carlo Erba Reagent, Italy)
- 3.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, Analytical grade, Merck, Germany)
- 3.1.4 กรดบอริก (Boric acid, Analytical grade, Merck, Germany)
- 3.1.5 โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulphate, Analytical grade, Carlo Erba Reagent, Italy)
- 3.1.6 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, Analytical grade, Merck, Germany)
- 3.1.7 เมทิลเรด (Methyl red, Ajax Finechem, Australia)
- 3.1.8 โบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol green, Ajax Finechem, Australia)

3.3 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ไขมัน ได้แก่ ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether, Analytical grade, J.T. Baker, USA)

3.4 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์สมบัติการพองตัว ได้แก่ บลูเดกซ์แทรน (Blue dextran, Sigma, USA)

3.5 สารเคมีสำหรับเตรียมตัวอย่างเจลสตาร์ชที่ผ่านการกึ่งรูปจากเยือกแข็งในการนำไปตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ช ได้แก่ เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 (Ethanol, Analytical grade, Merck, Germany)

วิธีการ

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบ

1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของสตาร์ชข้าวและคอนยัคกลูโคแมนแนน (ภาคผนวก ก)

- 1.1.1 ความชื้น ตามวิธีการของ AACC (2000)
- 1.1.2 ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีการของ Juliano (1971)
- 1.1.3 ปริมาณโปรตีน ตามวิธีการของ AACC (2000)
- 1.1.4 ปริมาณไขมัน ตามวิธีการของ AACC (2000)
- 1.1.5 ปริมาณเถ้า ตามวิธีการของ AACC (2000)

1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำตาลซูโครสและไซลิทอล (ภาคผนวก ก)

- 1.2.1 ความชื้น ตามวิธีการของ AOAC (2000)

1.3 การวิเคราะห์สมบัติของสตาร์ชข้าว

1.3.1 ตรวจสอบรูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชข้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านที่กำลังขยาย 100 เท่า (ภาคผนวก ก)

1.3.2 ตรวจสอบสมบัติการพองตัวของสตาร์ชข้าว (ดัดแปลงจากวิธีการของ Tester and Morrison, 1990)

ชั่งสตาร์ชประมาณ 100 มิลลิกรัม ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ลงในหลอดที่มีฝาเกลียวปิดขนาด 10 มิลลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจำนวน 5 มิลลิตร นำหลอดที่ปิดฝาแล้วไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50, 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โดยนำหลอดตัวอย่างขึ้นมาเขย่าอย่างแรงด้วยเครื่อง vortex mixer ทุก ๆ 5 นาที จากนั้นนำหลอดมาทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วในอ่างน้ำแข็งจนอุณหภูมิถึง 20 องศาเซลเซียส เติมน้ำละลายบลูเดกซ์แทรน (blue dextran) เข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิตร จำนวน 0.5 มิลลิตร และผสมให้เข้ากัน นำหลอดไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,800 xg เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นดูดส่วนใสด้านบนมาวัดค่าการ

ดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร นำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาค่าแฟกเตอร์การพองตัว (swelling factor; SF) ตามสูตร โดย W คือ น้ำหนักสตาร์ช (มิลลิกรัม) A_s คือ ค่าการดูดกลืนแสงของหลอดที่มีตัวอย่างสตาร์ช และ A_R คือ ค่าการดูดกลืนแสงของหลอดที่ไม่มีการใส่ตัวอย่างสตาร์ช

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

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

2. การศึกษาผลของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง

2.1 การเตรียมเจลสตาร์ชข้าว คัดแปลงจากวิธีการของ อรวรรณ (2549) และ Charoenrein *et al.* (2008)

เตรียมเจลสตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง), เจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอล ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) (สถานะต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมระบบเจลสตาร์ช แสดงดังตารางผนวกที่ ข1) โดยกวนสตาร์ชซัสเพนชัน (starch suspension) หรือสตาร์ชซัสเพนชันผสมสารละลายน้ำตาล (สำหรับสตาร์ชซัสเพนชันผสมสารละลายน้ำตาล เตรียมเป็นสารละลายน้ำตาลก่อนนำไปผสมกับสตาร์ชซัสเพนชัน) ด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 80-87 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นถ่ายแบ่งใส่ในหลอดฉีดยา แล้วนำไปนึ่งในหม้อนึ่ง แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.2 การแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชและการคืนรูปจากเยือกแข็ง

นำตัวอย่างเจลสตาร์ช ที่เตรียมได้จากข้อ 2.1 ไปแช่เยือกแข็งโดยใช้ตู้แช่เยือกแข็ง อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วทำการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยการนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นับเป็นการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 และทำซ้ำเช่นเดิมจนครบ 5 รอบ จากนั้นนำเจลสตาร์ชแต่ละรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งแล้วนำไปตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ (ค่าร้อยละการแยกของของเหลว โครงสร้างระดับจุลภาค และเนื้อสัมผัส)

2.3 การตรวจสอบผลของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง

2.3.1 การตรวจสอบค่าร้อยละการแยกของของเหลว ตามวิธีการของ Arunyanart and Charoenrein (2008)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จากข้อ 2.2 ที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 ถึง 5 มาคืนรูปจากเยือกแข็งตามวิธีในข้อ 2.2 โดยนำตัวอย่างเจลใส่ในหลอดที่มีการวางกระดาษกรอง Whatman No.41 อยู่ข้างใน เพื่อใช้แยกส่วนของเหลวออกจากเจล นำหลอดไปหมุนเหวี่ยงแยกในเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 100 xg เป็นเวลา 15 นาที จำนวน 3 หลอด แล้ววัดปริมาณของเหลวที่แยกออกมาจากเจลด้วยบิวเรตต์ขนาด 10 มิลลิลิตรที่มีขีดแบ่งย่อยเท่ากับ 0.02 มิลลิลิตร จากนั้นคำนวณหาค่าร้อยละการแยกของของเหลว (%syneresis) ตามสูตร

$$\text{ค่าร้อยละการแยกของของเหลว} = \frac{\text{ปริมาณของของเหลวที่ถูกเหวี่ยงแยกออกมา}}{\text{น้ำหนักของเจลเริ่มต้นก่อนการเหวี่ยงแยก}} \times 100$$

2.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ช

นำตัวอย่างเจลสตาร์ช จากข้อ 2.2 ที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ มาขจัดน้ำออกจากตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ในเอธิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 50, 70, 90 และเอธิลแอลกอฮอล์ล้วนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงตามลำดับ แล้วนำขึ้นตัวอย่างไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งจุดวิกฤต (critical point dryer) จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (microstructure) ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.3.3 การตรวจสอบเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช คัดแปลงจากวิธีการของ Yoshimura *et al.* (1998)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชก่อนการแช่เยือกแข็งและเจลสตาร์ชที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ มาคืนรูปจากเยือกแข็ง (ตัวอย่างละ 5 ซ้ำ) แล้วนำมาตัดให้มี ความสูง 20 มิลลิเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร) จากนั้นนำไปตรวจสอบเนื้อสัมผัสด้วย เครื่องวัดเนื้อสัมผัส Texture Analyzer ด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) ใช้หัววัด P/100 กดตัวอย่างด้วยความเร็ว 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยที่กดเจลให้มีระดับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation level) ร้อยละ 20 จากความสูงดั้งเดิมของเจล

2.4 การตรวจสอบปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ชที่ผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ตามวิธีการของ Arunyanart and Charoenrein (2008)

ชั่งสตาร์ชขาว 5.4 มิลลิกรัมและน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (น้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอล) 0, 2 และ 4.5 มิลลิกรัม ลงในถ้วยใส่ตัวอย่างสแตนเลส และเติมน้ำกลั่น 12.6 มิลลิกรัม ปิดฝาให้สนิท และวางตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์ปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ (freezable water) ในระบบเจลสตาร์ชด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (DSC) (ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ) ใช้ถ้วยใส่ตัวอย่างสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอย่างอ้างอิง กำหนดอุณหภูมิโดยลดอุณหภูมิ ลงมาที่ -60 องศาเซลเซียสด้วยอัตราเร็วในการลดอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้ อุณหภูมิคงที่ที่ -60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิ 160 องศา-เซลเซียส ด้วยอัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลง มาที่ -60 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็วในการลดอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้อุณหภูมิ คงที่ที่ -60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ด้วย

อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อีกครั้ง โดยปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ช สามารถคำนวณได้จากเอนโดเทอร์มของการหลอมเหลวของน้ำแข็ง (ice melting endotherm) จากการเพิ่มอุณหภูมิในครั้งที่สอง

2.5 การตรวจสอบผลของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของระบบสตาร์ชข้าว

เตรียมสตาร์ชข้าวซัสเพนชันความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) ที่ผสมกับสารละลายน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (น้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอล) ความเข้มข้นร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) (วิธีการเตรียมสตาร์ชซัสเพนชัน ดังข้อ 2.1 แต่จะเตรียมแบบลดสัดส่วนลง โดยแสดงดังตารางผนวกที่ ข3) มาตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyzer; RVA) โดยใช้ profile standard I ประมาณ 12.5 นาที เริ่มให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้อุณหภูมิคงที่ที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2.5 นาที แล้วลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็วในการลดอุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้อุณหภูมิคงที่ที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 นาที หยุดการทำงานที่ 12.5 นาที (ดัดแปลงจาก AACC, 2000 และ Funami *et al.*, 2005) ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) และค่าเซตแบค (setback) โดยรายงานผลจากค่าเฉลี่ยการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ

3. การศึกษาผลของคอนยักกลูโคแมนแนน น้ำตาลชนิดต่าง ๆ และอัตราการแช่เยือกแข็งต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง

3.1 การเตรียมเจลสตาร์ชข้าว คัดแปลงจากวิธีการของ อรวรรณ (2549) และ Charoenrein *et al.* (2008)

เตรียมเจลสตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) , เจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอล ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง), เจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (น้ำหนักแห้ง) และเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 กับผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10 (สภาวะต่าง ๆ แสดงดังตารางผนวกที่ ข2) โดยกวนสตาร์ชซัสเพนชัน, สตาร์ชซัสเพนชันผสมสารละลายน้ำตาล, สตาร์ชซัสเพนชันผสมสารละลายคอนยักกลูโคแมนแนน และสตาร์ชซัสเพนชันผสมสารละลายคอนยักกลูโคแมนแนนกับผสมสารละลายน้ำตาล (สำหรับสตาร์ชซัสเพนชันผสมสารละลายน้ำตาล เตรียมเป็นสารละลายน้ำตาลก่อนนำไปผสมกับสตาร์ชซัสเพนชัน ส่วนสตาร์ชซัสเพนชันผสมสารละลายคอนยักกลูโคแมนแนน เตรียมเป็นสารละลายคอนยักกลูโคแมนแนนก่อนนำไปผสมกับสตาร์ชซัสเพนชัน ส่วนสตาร์ชซัสเพนชันผสมสารละลายน้ำตาลจะเตรียมเป็นสารละลายน้ำตาลและสารละลายคอนยักกลูโคแมนแนนก่อน จากนั้นค่อยผสมสารละลายทั้งสองเข้าด้วยกันก่อนนำไปผสมกับสตาร์ชซัสเพนชัน) ด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 80-87 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นถ่ายแบ่งใส่ในหลอดลิดียา แล้วนำไปนึ่งในหม้อนึ่ง แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เหตุที่งานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 เนื่องจากพบว่าเจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 20 มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งมากกว่าเจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10 ดังนั้นจึงได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อไปที่จะทำให้เจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10 มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งมากขึ้น และในงานวิจัยนี้ยังได้เลือกใช้คอนยักกลูโคแมนแนนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 เนื่องจาก อรวรรณ (2549) พบว่าคอนยักกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้นนี้สามารถลดการแยกของของเหลว ลดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส

ลดการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ และลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้ ทำให้เจลสตาร์ชข้าวมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งได้ดี

3.2 การแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชและการคืนรูปจากเยือกแข็ง

นำตัวอย่างเจลสตาร์ช ที่เตรียมได้จากข้อ 3.1 ไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง 2 ระดับ โดยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าใช้ตู้แช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส มีอัตราการแช่เยือกแข็งประมาณ 0.1 องศาเซลเซียสต่อนาที และแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิก ซึ่งจะได้อัตราการแช่เยือกแข็งประมาณ 4.0 องศาเซลเซียสต่อนาที แผนภาพการแช่เยือกแข็งของเจลสตาร์ชดังแสดงในภาพผนวกที่ ข1 กำหนดอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งหน่วยเป็นองศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นนำตัวอย่างมาเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 7, 21 และ 45 วัน ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยการนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเจลออกจากพิมพ์แล้วนำไปตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ (ค่าร้อยละการแยกของของเหลว โครงสร้างระดับจุลภาค และเนื้อสัมผัส)

3.3 การตรวจสอบผลของคอนยัคกลูโคแมนแนน น้ำตาลชนิดต่าง ๆ และอัตราการแช่เยือกแข็งต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง

3.3.1 การตรวจสอบค่าร้อยละการแยกของของเหลว ตามวิธีการของ Arunyanart and Charoenrein (2008)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จากข้อ 3.2 ที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 0, 7, 21 และ 45 วัน มาคืนรูปจากเยือกแข็ง ตามวิธีในข้อ 3.2 จากนั้นนำตัวอย่างเจลมาตรวจสอบค่าร้อยละการแยกของของเหลว ตามวิธีในข้อ 2.3.1

3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ช

นำตัวอย่างเจลสตาร์ช จากข้อ 3.2 ที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 21 วัน มาตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค ตามวิธีในข้อ 2.3.2

3.3.3 การตรวจสอบเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช คัดแปลงจากวิธีการของ Yoshimura *et al.* (1998)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชก่อนการแช่เยือกแข็งและเจลสตาร์ชที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 0, 7, 21 และ 45 วันมาคั้นรูปจากเยือกแข็ง (ตัวอย่างละ 5 ซ้ำ) จากนั้นนำตัวอย่างเจลมาตรวจสอบเนื้อสัมผัส ตามวิธีในข้อ 2.3.3

4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (completely randomized design; CRD) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) ด้วยโปรแกรม SPSS (version 12.0) ถ้ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะนำมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

5. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการและอาคารแปรรูปภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หน่วยงานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ระยะเวลาการทดลอง

ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2549 ถึง เดือนเมษายน 2551

7. แหล่งทุนสนับสนุน

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยมหัศจรรย์ สกว. สาขา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2549 (MRG495S024) และ โครงการ RSA 5080014

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University Research and Development Institute) ภายใต้โครงการวิจัยการลดความเปลี่ยนแปลงของสสารจากการ
แซ่เชื้อแข็งเจลสตาร์ช

ผลและวิจารณ์

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบ

1.1 องค์ประกอบของวัตถุดิบ

สตาร์ชข้าว คอนยัคกลูโคแมนแนน น้ำตาลซูโครส และไซลิทอลที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ มีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 4 คือ สตาร์ชข้าวมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 31.60 ซึ่งจัดเป็นสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (Juliano, 1992) ส่วนปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้ามีอยู่ร้อยละ 0.95, 0.06 และ 0.05 ตามลำดับ โดยจากการทดลองของ Singh *et al.* (2000) ที่สกัดสตาร์ชข้าวจากข้าวพันธุ์อินดิกา (Indica) ที่เป็นข้าวทางการค้าจากประเทศไทย พบว่ามีปริมาณแอมิโลส โปรตีน ไขมัน และเถ้าอยู่ร้อยละ 34.60, 0.45, 0.08 และ 0.22 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่ามีค่าที่แตกต่างกันบ้าง เนื่องจากสตาร์ชข้าวที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นสตาร์ชข้าวทางการค้าโดยสกัดมาจากข้าวหลายพันธุ์ผสมกันทำให้ไม่ทราบสายพันธุ์ที่แน่นอน และปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ของสตาร์ชข้าวยังขึ้นอยู่กับวิธีการสกัดสตาร์ช (Lumdubwong and Seib, 2000)

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของวัตถุดิบ

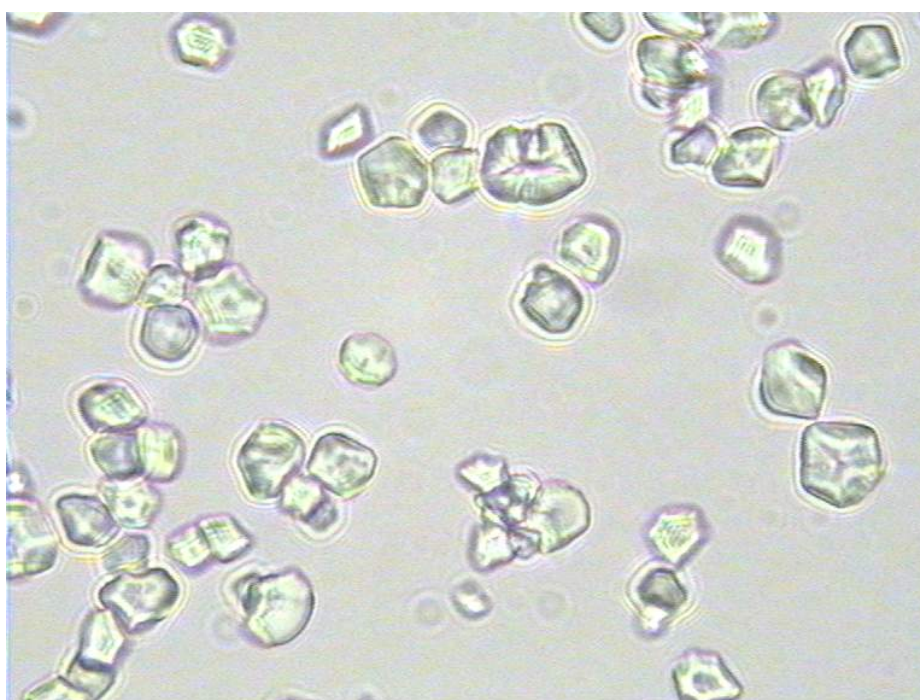
ตัวอย่าง	(หน่วย: ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)				
	ความชื้น	แอมิโลส	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า
สตาร์ชข้าว	11.64 ± 0.06	31.60 ± 0.42	0.95 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.05 ± 0.02
คอนยัคกลูโคแมนแนน	9.95 ± 0.07	-	0.86 ± 0.03	0.94 ± 0.02	1.78 ± 0.03
ซูโครส	0.02 ± 0.01	-	-	-	-
ไซลิทอล	0.08 ± 0.01	-	-	-	-

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผงบุก (konjac flour) โดยทั่วไปมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าอยู่ร้อยละ 2.2, 2.3 และ 5.2 ตามลำดับ ส่วนผงบุกที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว (purified konjac flour) นั้นมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าอยู่ร้อยละ 0.8, 0.9 และ 1.7 ตามลำดับ (Takigami, 2000) ส่วนคอนยัคกุกูโค-แมนแนนที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นผงบุกที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าอยู่ร้อยละ 0.86, 0.94 และ 1.78 ตามลำดับ

1.2 ขนาดและรูปร่างของสตาร์ชข้าว

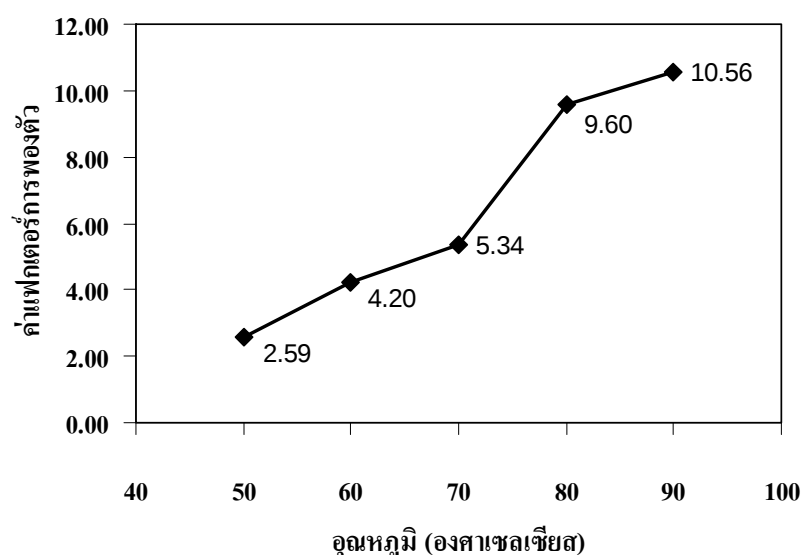
ภาพที่ 19 แสดงรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวพบว่า เม็ดสตาร์ชมีลักษณะเป็นรูปร่างหลายเหลี่ยม (polygonal) มีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน เม็ดสตาร์ชมีการกระจายตัวและจับตัวเป็นกลุ่มเล็ก ๆ โดยจากการสุ่มวัดขนาดของเม็ดสตาร์ชข้าวจำนวน 100 เม็ด พบว่าค่าเฉลี่ยขนาดของเม็ดสตาร์ชมีค่าประมาณ 6.8 ± 0.9 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Zhou *et al.* (2002) ที่ว่า สตาร์ชข้าวมีลักษณะเป็นรูปร่างหลายเหลี่ยม และมีขนาดเม็ดสตาร์ชเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 3-8 ไมครอน



ภาพที่ 19 รูปร่างและลักษณะของเม็ดสตาร์ชข้าวที่กำลังขยาย 100 เท่า

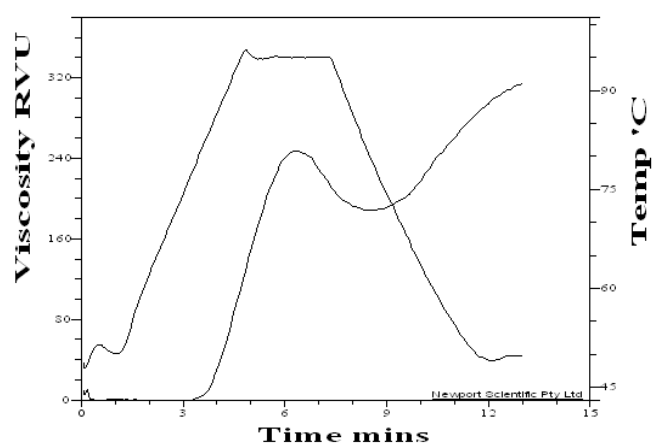
1.3 สมบัติการพองตัวและการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าว

ค่าแฟกเตอร์การพองตัว (swelling factor; SF) ของสตาร์ชข้าว แสดงดังภาพที่ 20 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ค่าแฟกเตอร์การพองตัวมีค่า 2.59, 4.20 และ 5.34 ตามลำดับซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส ค่าแฟกเตอร์การพองตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 9.60 โดยเกิดเนื่องจากที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสนั้นเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวซึ่งโดยปกติมีค่าอยู่ในช่วง 58-74 องศาเซลเซียส (Matz, 1991) ดังนั้นเมื่อสตาร์ชจึงพองตัวเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยก็จะมีค่าแฟกเตอร์การพองตัวเท่ากับ 10.56 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 20 ค่าแฟกเตอร์การพองตัวของสตาร์ชข้าวที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากภาพที่ 21 พบว่าในช่วงแรกของการให้ความร้อนสตาร์ชข้าวไม่มีความหนืดเกิดขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่เม็ดสตาร์ชเริ่มดูดน้ำ (Phillips and Williams, 2000) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ความหนืดของสตาร์ชข้าวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากเม็ดสตาร์ชพองตัวได้มากขึ้นและมีส่วนที่ละลายออกมานอกเม็ดสตาร์ชเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากค่าแฟกเตอร์การพองตัวข้างต้น สำหรับอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด ความหนืดสูงสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และเซตแบบของสตาร์ชข้าว แสดงดังตารางที่ 5



ภาพที่ 21 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว

ตารางที่ 5 อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด ความหนืดสูงสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และ เซตแบคของสตาร์ชข้าว

อุณหภูมิที่เริ่ม เกิดความหนืด (°C)	ความหนืด (RVU)				เซตแบค
	ความหนืด สูงสุด	ความหนืด ต่ำสุด	ความหนืด ลดลง	ความหนืด สุดท้าย	
80.8	249.6	189.0	60.6	316.6	127.7
± 0.0	± 3.9	± 0.6	± 3.2	± 3.4	± 2.7

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าแฟกเตอร์การพองตัวและอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของสตาร์ชข้าวที่ได้จากการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิที่สตาร์ชซัสเพนชันเริ่มเกิดความหนืด คือที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการนำไปใช้เตรียมเจลสตาร์ชข้าว โดยการเตรียมเจลสตาร์ชข้าวนั้นจะกวนสตาร์ชซัสเพนชันในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชซัสเพนชันมีความหนืดก่อนที่จะถ่ายใส่พิมพ์เพื่อให้สตาร์ชซัสเพนชันมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ไม่มีการตกตะกอนของสตาร์ชซึ่งถือว่าเป็นการเพิ่มความคงตัวให้กับสตาร์ชซัสเพนชัน จากนั้นนำไปนึ่งในหม้อนึ่งเพื่อให้เกิดเจลในตัวอย่างสมบูรณ์ แล้วจึงตั้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดเป็นเจล

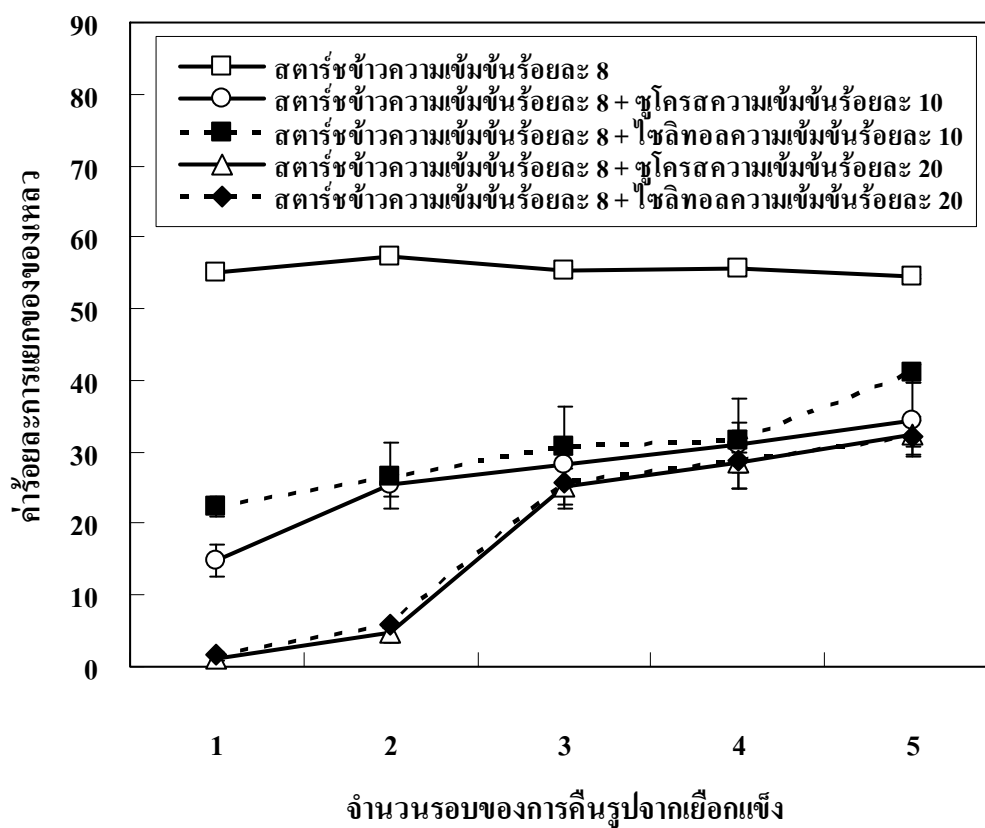
2. ผลของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง

2.1 ผลของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ต่อค่าร้อยละการแยกของของเหลว

งานวิจัยนี้เลือกใช้เจลสตาร์ชข้าวที่ความเข้มข้นร้อยละ 8 เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเตรียมเจลสตาร์ชข้าว และทำให้ได้เจลสตาร์ชข้าวที่มีลักษณะคงตัว (อรรณ, 2549) โดยปกติงานวิจัยทั่วไปหรือส่วนใหญ่มักใช้คำว่าค่าร้อยละการแยกของน้ำ แต่ในงานวิจัยนี้ใช้คำว่าค่าร้อยละการแยกของของเหลว (% syneresis) เนื่องจากในระบบของเจลสตาร์ชมีการผสมน้ำตาลสองชนิดเปรียบเทียบกันคือ น้ำตาลซูโครสกับไซลิทอล เวลาวัดค่าร้อยละการแยกของของเหลวด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยงร่วมกับการกรอง (centrifugation-filtration method) จะวัดเป็นปริมาณของของเหลวที่ถูกเหวี่ยงแยกและกรองออกมา โดยปริมาณของของเหลวที่ถูกเหวี่ยงแยกและกรองออกมานั้นน่าจะมีโมเลกุลของน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลผสมออกมาด้วย ทำให้ไม่สามารถนำของเหลวนั้นไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าร้อยละการแยกของน้ำเหมือนกับงานวิจัยอื่น ๆ ได้ เพราะน้ำตาลซูโครสกับไซลิทอลมีมวลโมเลกุลไม่เท่ากันจึงไม่สามารถเปรียบเทียบในรูปของการชั่งน้ำหนักได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงวัดปริมาณของของเหลวที่ถูกเหวี่ยงแยกและกรองออกมาจากเจลด้วยบิวเรตต์ ซึ่งวิธีการนี้ได้ดัดแปลงมาจากงานวิจัยของ Baker and Rayas-Duarte (1998) ที่หาค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชแอมมะแรนซ์ (amaranth starch gel) ที่ผสมน้ำตาลกลูโคส, ซูโครส หรือฟรักโทส โดยการวัดปริมาณของของเหลวที่ถูกเหวี่ยงแยกออกมาจากเจลด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยง (centrifugation method) โดยใช้กระบอกตวง (cylinder)

ในงานวิจัยนี้ตรวจสอบความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยการวัดค่าร้อยละการแยกของของเหลว (% syneresis) จากการแช่เยือกแข็งแล้วคืนรูปจากเยือกแข็งทั้งหมด 5 รอบ ซึ่งเป็นการเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ช (Biliaderis, 1998; Brennan *et al.*, 2004; Jacobson and BeMiller, 1998) ทำให้เกิดการแยกของของเหลวเร็วขึ้น (Varavinit *et al.*, 2002) การที่นำเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็งแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งแล้วเกิดการแยกของของเหลว (syneresis) นั้นมีสาเหตุเนื่องจากการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ระหว่างสายโซ่สตาร์ชโดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นผลจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส (Morris, 1990) โดยปริมาณของการเกิดการแยกของของเหลวเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (Karim *et al.*, 2000)

การทำงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การทดลองหาค่าร้อยละการแยกของของเหลวโดยเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการนำเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็งแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งโดยทำเช่นนี้ซ้ำไปมาเป็นจำนวนรอบ (freeze-thaw cycle process; FTC process) หรือที่เรียกว่าความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง ซึ่งเป็นวิธีที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้น ๆ ลง ๆ (temperature fluctuations) โดยเป็นสาเหตุหนึ่งซึ่งช่วยเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งซึ่งเกิดเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสตาร์ช และการเกิดการตกผลึกของน้ำแข็งใหม่ (ice recrystallization) (Bevilacqua and Zaritzky, 1982) โดยการเกิดการตกผลึกของน้ำแข็งใหม่จะส่งผลให้เจลสตาร์ชเกิดการแยกของของเหลวมากขึ้น (Lee *et al.*, 2002) เนื่องจากผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้โมเลกุลของสตาร์ชอยู่ใกล้กันมากขึ้น ดังนั้นโอกาสที่โมเลกุลจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันจึงมีมากกว่าเมื่อผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็ก และยังเป็นสภาวะที่สามารถเกิดขึ้นได้จริงทั้งในระหว่างการเก็บรักษา และการขนส่งผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงผลของน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลต่อการลดการเปลี่ยนแปลงหรือลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในระบบของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้มากที่สุด จึงได้ใช้การทดลองหาค่าร้อยละการแยกของของเหลวโดยเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยวิธีการนำเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็งแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งโดยทำเช่นนี้ซ้ำไปมาเป็นจำนวนรอบ (freeze-thaw cycle process)



ภาพที่ 22 ค่าร้อยละการแยกของของเหลวจากการคืบรูปจากเอือกแข็ง 1-5 รอบ ของเจลลดปวดหลัง
กับเจลลดปวดหลังผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ชูโครสหรือโซลิทอล)

ผลของน้ำตาลชูโครสหรือโซลิทอลต่อความคงตัวต่อการคืบรูปจากเอือกแข็งของเจลลดปวดหลังแสดงในภาพที่ 22 หรือตารางผนวกที่ ข4 พบว่าค่าร้อยละการแยกของของเหลว ในการคืบรูปจากเอือกแข็ง 1 ถึง 5 รอบของเจลลดปวดหลังที่ไม่ได้ผสมน้ำตาลมีค่าสูงประมาณร้อยละ 55 สาเหตุที่มีค่าร้อยละการแยกของของเหลวสูงเนื่องจากเป็นเจลลดปวดหลังที่มีปริมาณแอมิโลสสูงถึงร้อยละ 31.60 (ดังตารางที่ 4) จึงเป็นสาเหตุหลักของการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลลดปวดหลัง ซึ่งจากการทดลองของ Varavinit *et al.* (2002) พบว่าเมื่อนำเจลแปงข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (ร้อยละ 28) ไปแช่เอือกแข็ง ค่าร้อยละการแยกของของเหลวมากกว่าเจลแปงข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปาน กลาง (ร้อยละ 18) และต่ำ (ร้อยละ 5) ตามลำดับ ในขณะที่เจลลดปวดหลังที่ผสมน้ำตาลชูโครสหรือโซลิทอลสามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลวได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่ลดลงตามความเข้มข้นของน้ำตาลชูโครสหรือโซลิทอลที่เพิ่มขึ้น ในการคืบรูปจากเอือกแข็งรอบที่ 1 ถึง 5 แสดงให้เห็นว่าน้ำตาลชูโครสมีประสิทธิภาพในการลดค่าร้อยละการแยก

ของของเหลวได้ดีกว่าไซลิทอลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10 แต่ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 น้ำตาลทั้ง 2 ชนิดให้ค่าร้อยละการแยกของของเหลวใกล้เคียงกัน

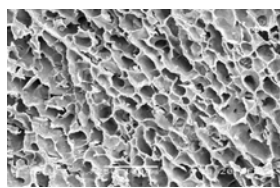
เจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลสามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลวได้ดีในรอบที่ 1 และ 2 ของการคั้นรูปจากเยือกแข็ง ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองของ Baker and Rayas-Duarte (1998) ที่พบว่าการผสมน้ำตาลซูโครสร้อยละ 10 และ 20 ลงในเจลสตาร์ชแอมมะแรนซ์ (amaranth starch gel) ทำให้เจลสตาร์ชมีความคงตัวต่อการคั้นรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 1 และ 2 ของการคั้นรูปจากเยือกแข็ง แต่อย่างไรก็ตามเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลมีค่าร้อยละการแยกของของเหลวเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น เนื่องจากการที่จำนวนรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็งเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่ใหญ่ขึ้นไปทำลายโครงสร้างของเจลสตาร์ชได้มากขึ้น และยังส่งผลให้โมเลกุลของสตาร์ชอยู่ใกล้กันมากขึ้น ดังนั้นจึงมีโอกาสที่โมเลกุลของสตาร์ชเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างกันมากขึ้น เป็นเหตุให้สายโซ่โมเลกุลของสตาร์ชมาอัดตัวกันแน่นขึ้น ซึ่งถือเป็นการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช จึงทำให้ของเหลวแยกตัวออกมาจากเจลได้ง่ายขึ้น (Arunyanart and Charoenrein, 2008; Bao, 2004; Yuan and Thomson, 1998)

2.2 ผลของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ช

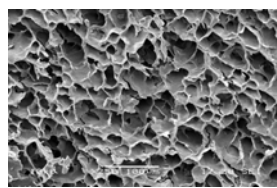
การทดลองนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของของเหลวกับโครงสร้างระดับจุลภาค (microstructure) ของเจลสตาร์ชหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งจะทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างของเจลสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง

จากภาพที่ 23 เห็นได้อย่างชัดเจนถึงความแตกต่างในโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งที่ไม่ผสมน้ำตาลกับผสมน้ำตาล เมื่อนำเจลสตาร์ชมาแช่เยือกแข็งส่วนที่ไม่แข็งตัวหรือที่เรียกว่า เมทริกซ์ (matrix) มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ทำให้สายโซ่ของโมเลกุลสตาร์ชมาบีบอัดตัวกันแน่น โดยเฉพาะการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสภายในเจลสตาร์ช และเมื่อนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งส่วนที่แข็งตัวได้หรือเกิดผลึกน้ำแข็งจะเกิดการละลายโดยเมื่อจำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น ขนาดรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ และเกิดการแยกของของเหลวออกจากเจล (Ferrero *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 2002) จากผลการทดลองพบว่าสามารถลดกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ได้ด้วยการผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลลงไปในระบบของเจลสตาร์ชข้าว โดยพบว่าส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุน (pore) จากผลึกน้ำแข็งของเจลสตาร์ชที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลจะมีความหนานมากกว่าเจลสตาร์ชที่ไม่ได้ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอล โดยความหนาในส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูจะมีความหนามากขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 (ภาพที่ 23 จ-ค) พบว่าส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุน (pore) จากผลึกน้ำแข็งมีความหนานมากกว่าของเจลสตาร์ชที่ไม่ได้ผสมน้ำตาล (ภาพที่ 23 ก-ค)

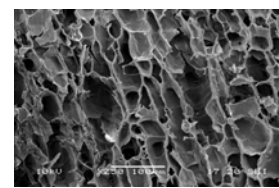
เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมไซลิทอล ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน คือที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 กับความเข้มข้นร้อยละ 20 พบว่าน้ำตาลซูโครสทำให้ส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุน (pore) จากผลึกน้ำแข็งในเจลสตาร์ชข้าวมีความหนานมากกว่าไซลิทอล แสดงให้เห็นว่าน้ำตาลซูโครสมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำได้ดีกว่าไซลิทอล



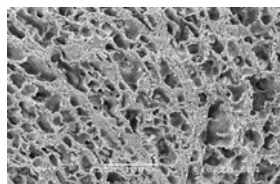
(ก) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8
รอบที่ 1



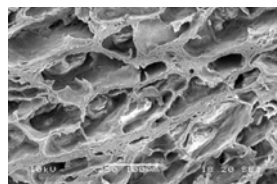
(ข) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8
รอบที่ 3



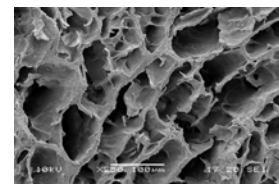
(ค) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8
รอบที่ 5



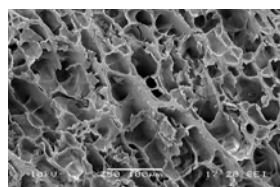
(ง) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10
รอบที่ 1



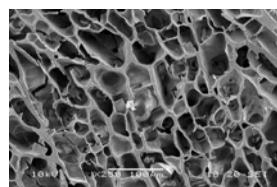
(จ) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10
รอบที่ 3



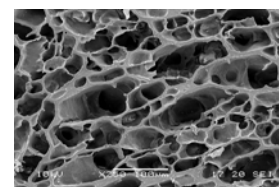
(ฉ) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10
รอบที่ 5



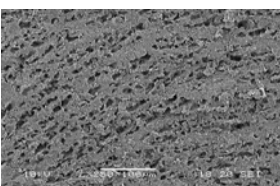
(ช) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10
รอบที่ 1



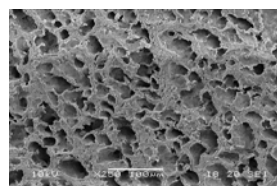
(ซ) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10
รอบที่ 3



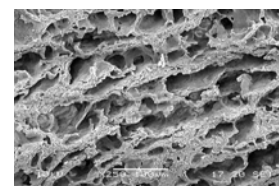
(ฌ) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10
รอบที่ 5



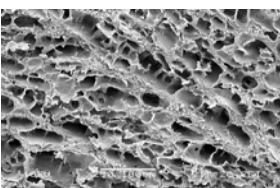
(ญ) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20
รอบที่ 1



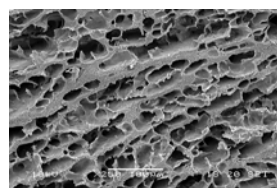
(ฎ) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20
รอบที่ 3



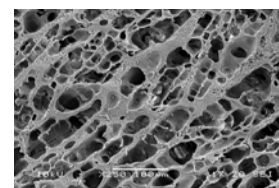
(ฏ) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20
รอบที่ 5



(ฐ) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 20
รอบที่ 1



(ฑ) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 20
รอบที่ 3

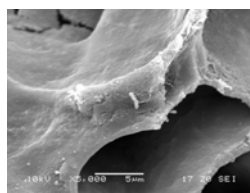


(ฒ) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 20
รอบที่ 5

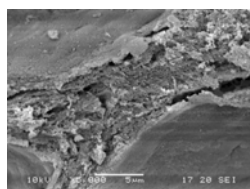
ภาพที่ 23 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสม
ซูโครสหรือไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 หลังการคั้นรูปจากเยือกแข็งใน
รอบที่ 1, 3 และ 5 (250x, Bar = 100 μ m)

ส่วนจำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งนั้นมีความหนาในส่วนของ เมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุนจากผลึกน้ำแข็งเช่นกัน ถึงแม้ว่าผลสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลลงไปใน เจลสตาร์ชข้าว แต่เมื่อจำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุนจากผลึกน้ำแข็งของเจลสตาร์ชที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลมีความหนาลดลงและขนาด รูพรุนใหญ่ขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการที่จำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิด ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นไปทำลายโครงสร้างของเจลสตาร์ชทำ ให้เกิดรูพรุนภายในโครงสร้างของเจลสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเจลสตาร์ชข้าวที่ ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลเมื่อนำไปแช่เยือกแข็งแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งสามารถลด การเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ (spongy structure) ได้เมื่อเทียบกับเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้ผสมน้ำตาล และผลที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสม น้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลนั้นให้ผลที่สอดคล้องกับคำอธิบายการแยกของของเหลว

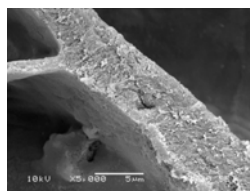
ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวหลังการคืนรูปจาก เยือกแข็งแสดงให้เห็นว่าน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลมีประสิทธิภาพทำให้โครงสร้างของ เจลสตาร์ชข้าวมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลสามารถช่วย รักษาส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุน (pore) จากผลึกน้ำแข็งของเจลสตาร์ชข้าวได้ ซึ่งทั้งนี้คาดว่า เนื่องจากน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลอาจช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสได้ หรือกล่าว ได้ว่าน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลอาจไปทำให้กลไกในการจัดเรียงตัวกันใหม่ระหว่างแอมิโลสกับ แอมิโลส (amylose-amylose re-association) เกิดขึ้นช้าลง



(ก) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8
รอบที่ 3



(ข) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ชูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10
รอบที่ 3



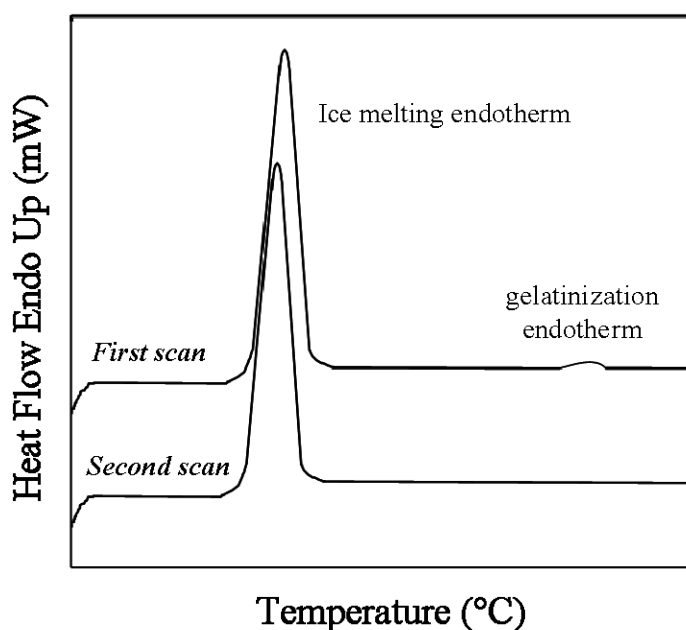
(ค) สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ไซลิตอลความเข้มข้นร้อยละ 10
รอบที่ 3

ภาพที่ 24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมชูโครสหรือไซลิตอลความเข้มข้นร้อยละ 10 หลังการคืนรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 3 (5000x, Bar = 5 μm)

จากภาพที่ 24 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลชูโครสหรือไซลิตอลความเข้มข้นร้อยละ 10 หลังการคืนรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 3 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อพิจารณาจากเนื้อเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุนพบว่าเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลชูโครสมีเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุนที่อ่อนมีลักษณะคล้ายกับเนื้อเยื่อของกระดาษทิชชูที่เปียกชุ่ม (mashed wet tissue paper) (ภาพที่ 24 ข) ส่วนเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมไซลิตอลมีเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุนที่แข็งมีลักษณะที่อัดตัวกันแน่น (ภาพที่ 24 ค)

2.3 ผลของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ต่อปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ช

ปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ (freezable water) คือ ส่วนของน้ำที่อยู่ในตัวอย่างที่สามารถแยกตัวออกมาและแข็งตัวได้เมื่อนำตัวอย่างไปแช่เยือกแข็ง ซึ่งตรวจวัดได้โดยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Reid and Kerr, 1993) ในการทดลองนี้เตรียมระบบของสตาร์ชกับระบบสตาร์ชที่ผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (น้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอล) แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ (freezable water) ในระบบสตาร์ชด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (DSC) โดยกำหนดสภาวะของเครื่องด้วยการลดอุณหภูมิแล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็นจำนวนสองครั้ง จะได้ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์เทอร์โมแกรมของระบบเจลสตาร์ช ดังแสดงในภาพที่ 25 ซึ่งปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ช สามารถคำนวณได้จากเอนโดเทอร์มของการหลอมเหลวของน้ำแข็ง (ice melting endotherm) จากการเพิ่มอุณหภูมิในครั้งที่สอง ซึ่งเป็นการแสดงถึงการละลายของน้ำแข็ง เหตุที่คำนวณจากเอนโดเทอร์มของการหลอมเหลวของน้ำแข็งจากการเพิ่มอุณหภูมิในครั้งที่สองเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในครั้งแรกนั้นทำให้ระบบสตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์อย่างสมบูรณ์ทำให้เกิดเป็นเจลสตาร์ช ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิในครั้งที่สองจึงเป็นเอนโดเทอร์มของการหลอมเหลวของน้ำแข็งในระบบที่เป็นเจลสตาร์ช



ภาพที่ 25 ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์เทอร์โมแกรมของระบบเจลสตาร์ช

ปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ (freezable water) ในระบบเจลสตาร์ชลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 6 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลไปจับกับโมเลกุลของน้ำในระบบเจลสตาร์ช เมื่อนำไปแช่เยือกแข็งส่วนของน้ำที่แข็งตัวได้จึงมีปริมาณน้อยลง ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งในโครงสร้างของเจลสตาร์ชน้อยลง ดังนั้นรูพรุนในโครงสร้างของเจลสตาร์ชที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลึกน้ำแข็งมีน้อยลง และความหนาในส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุนจากผลึกน้ำแข็งมีความหนามากขึ้น ซึ่งผลที่ได้ให้ผลที่สอดคล้องกับโครงสร้างระดับจุลภาคและค่าร้อยละการแยกของของเหลว

ตารางที่ 6 ปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ช

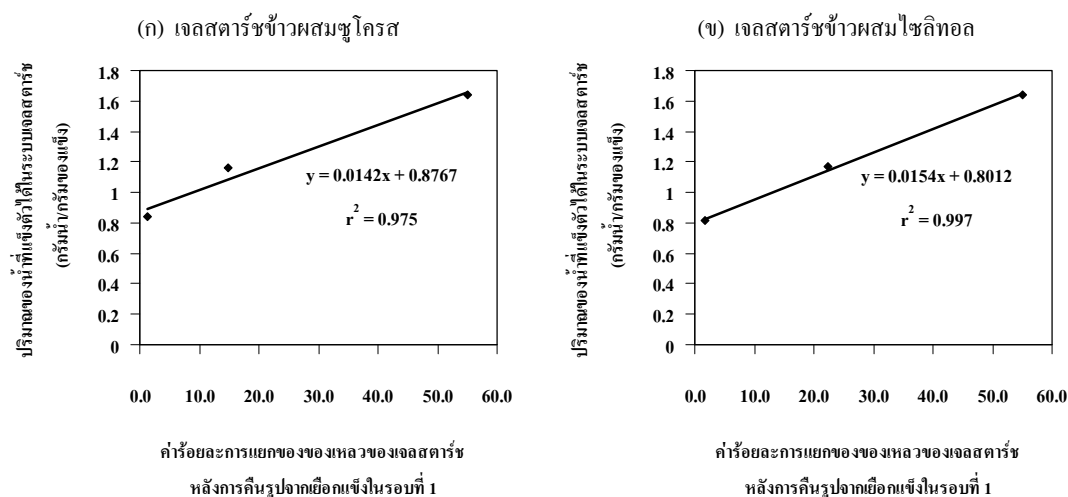
ตัวอย่าง	ปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ใน ระบบเจลสตาร์ช (กรัม น้ำ / กรัม ของแข็ง)
เจลสตาร์ชข้าว	1.638 ± 0.008^a
เจลสตาร์ชข้าว + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10	1.157 ± 0.005^b
เจลสตาร์ชข้าว + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10	1.170 ± 0.007^b
เจลสตาร์ชข้าว + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20	0.842 ± 0.006^c
เจลสตาร์ชข้าว + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 20	0.812 ± 0.004^d

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในระบบเจลสตาร์ชเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ (freezable water) ลดลงตามความเข้มข้นของน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเติมส่วนประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงในระบบอาหาร เช่น น้ำตาลซูโครสจะทำให้ปริมาณของน้ำที่ไม่แข็งตัว (unfreezable water) ในระบบของอาหารเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระหรือปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ลดลงเนื่องจากโมเลกุลของน้ำเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ที่มีขั้วในโมเลกุลของน้ำตาล น้ำที่ถูกตรึงอยู่กับโมเลกุลของน้ำตาลจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ไปรวมกันเป็นผลึกน้ำแข็งได้ (Slade and Levine, 1991) นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้ยังสอดคล้องกับ Pongsawatmanit *et al.* (2002) ที่ตรวจสอบผลของน้ำตาลซูโครสต่อ

ส่วนปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ (freezable water fraction) ในระบบของสตาร์ชมันสำปะหลัง ชั้สเฟนชัน โดยตรวจสอบระบบของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10 และ 15 ที่ผสมกับน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 พบว่าส่วนปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ (freezable water fraction) ในระบบของสตาร์ชมันสำปะหลังชั้สเฟนชันที่ทุกความเข้มข้น (ร้อยละ 5, 10 และ 15) ลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น

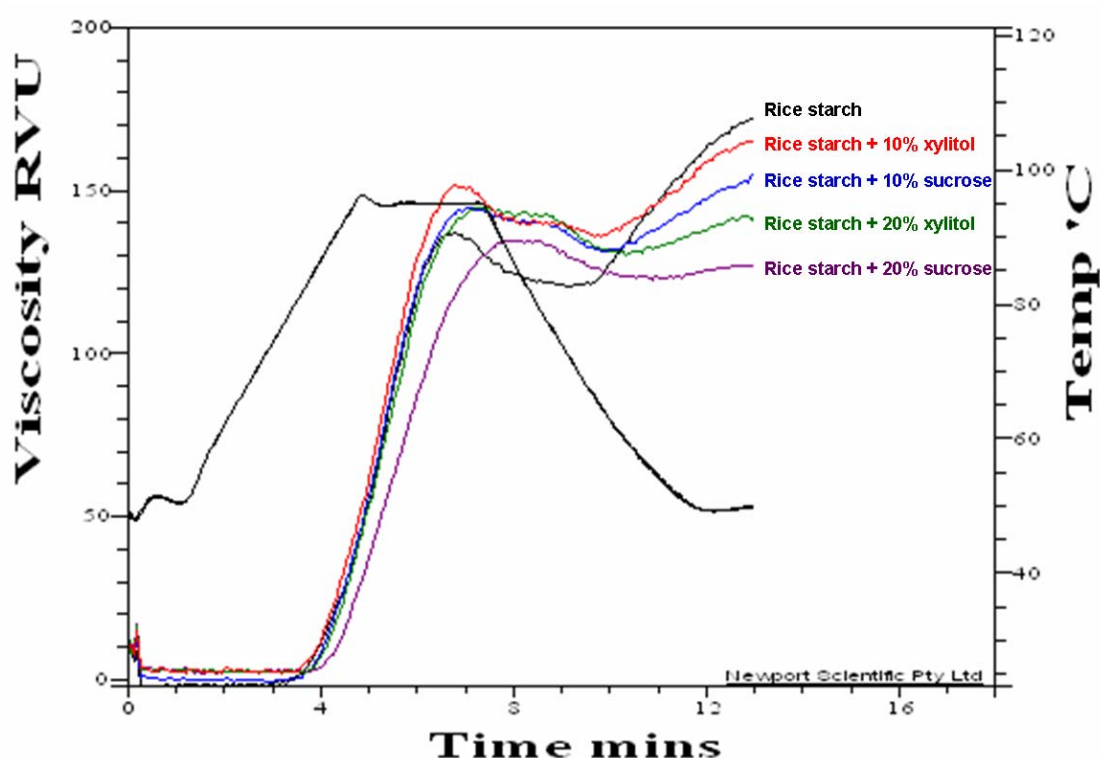


ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ชกับค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมซูโครสหรือไซลิทอลหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 1

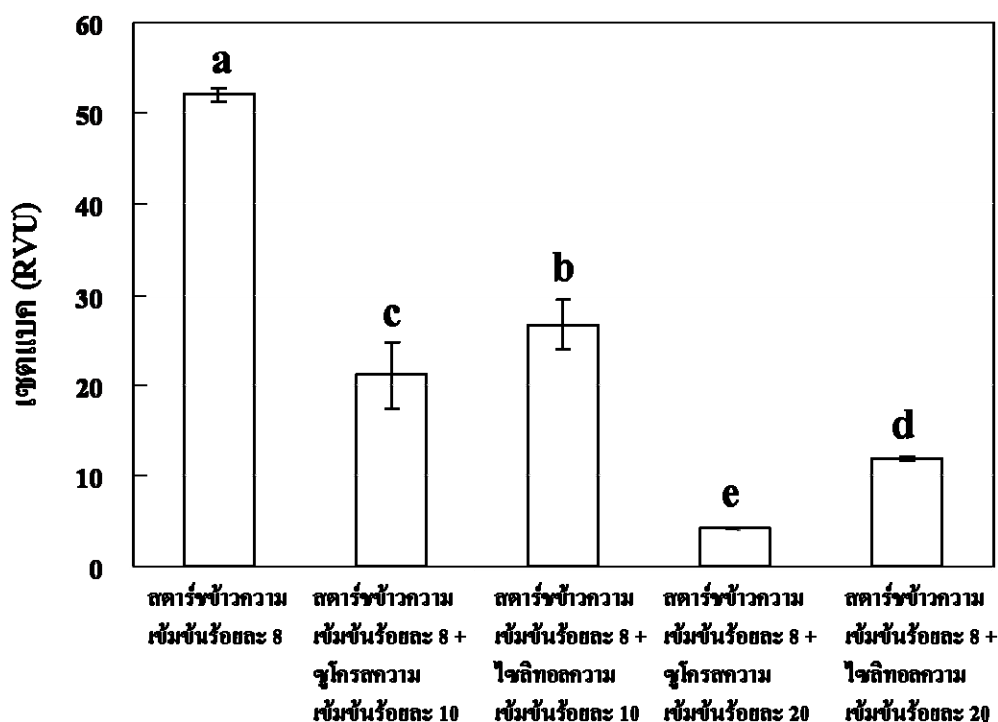
จากภาพที่ 26 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ชกับค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 1 นั้นมีความสัมพันธ์กันมาก โดยที่เจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครสมีค่า r^2 เท่ากับ 0.975 (ดังภาพที่ 26 ก) ส่วนเจลสตาร์ชข้าวผสมไซลิทอลมีค่า r^2 เท่ากับ 0.997 (ดังภาพที่ 26 ข) ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ชกับค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าว แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ชน้อยลง ค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวมีแนวโน้มลดลงด้วย

2.4 ผลของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของระบบสตาร์ชข้าว

เพื่อให้เข้าใจสาเหตุและยืนยันผลว่าน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลสามารถช่วยลดการแยกของของเหลวในระบบเจลสตาร์ชและลดการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำได้ จึงได้ตรวจสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของระบบสตาร์ชข้าวกับระบบสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 27 โดยจากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของระบบสตาร์ชข้าวจะพิจารณาดูที่ค่าเซตแบค (setback) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการคาดคะเนถึงแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (Karim *et al.*, 2000) โดยค่าเซตแบคเป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันและการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลสตาร์ชโดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นผลเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส และค่าเซตแบคที่ต่ำแสดงถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันและการเกิดการแยกของของเหลวที่ต่ำ (Ragaei and Abdel-Aal, 2006)



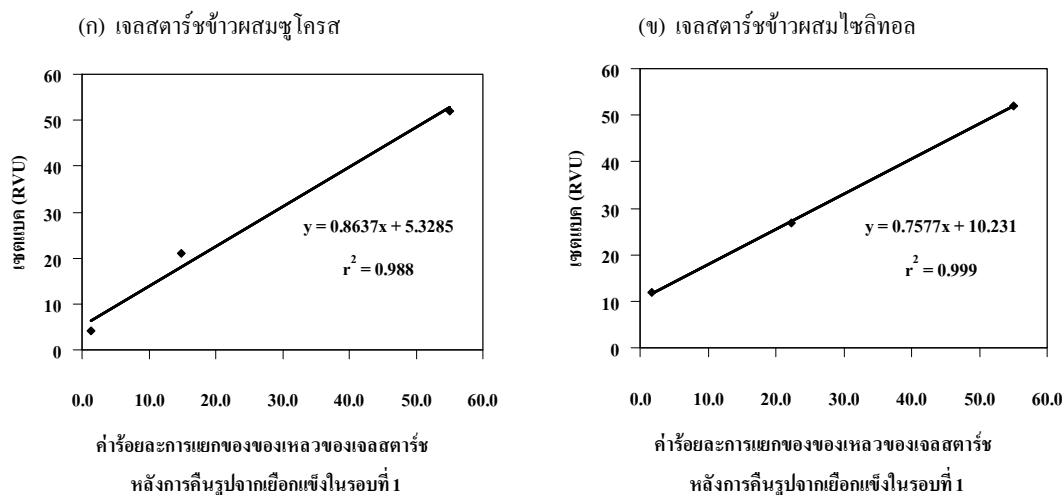
ภาพที่ 27 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของระบบสตาร์ชข้าวกับระบบสตาร์ชข้าวที่ผสมซูโครสหรือไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20



ภาพที่ 28 ค่าเซตแบคของระบบสตาร์ชี่วกับระบบสตาร์ชี่วที่ผสมชูโครสหรือโซลิทอลความ
เข้มข้นร้อยละ 10 และ 20

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
($p > 0.05$)

จากภาพที่ 28 พบว่าน้ำตาลชูโครสหรือโซลิทอลทำให้ค่าเซตแบคลดลง แสดงให้เห็น
ว่าน้ำตาลชูโครสหรือโซลิทอลสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชี่วได้ โดยที่ค่าเซตแบค
ลดลงตามความเข้มข้นของน้ำตาลชูโครสหรือโซลิทอลที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
($p \leq 0.05$) สาเหตุที่เกิดขึ้นคาดว่าเนื่องจากโมเลกุลของน้ำตาลชูโครสหรือโซลิทอลน่าจะไปขัดขวาง
การจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลสตาร์ชี่วโดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นผลเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน
ของเอมิโลส ซึ่งจากผลการทดลองในส่วนนี้ให้ผลที่สอดคล้องกับค่าร้อยละการแยกของของเหลว
(ภาพที่ 22)



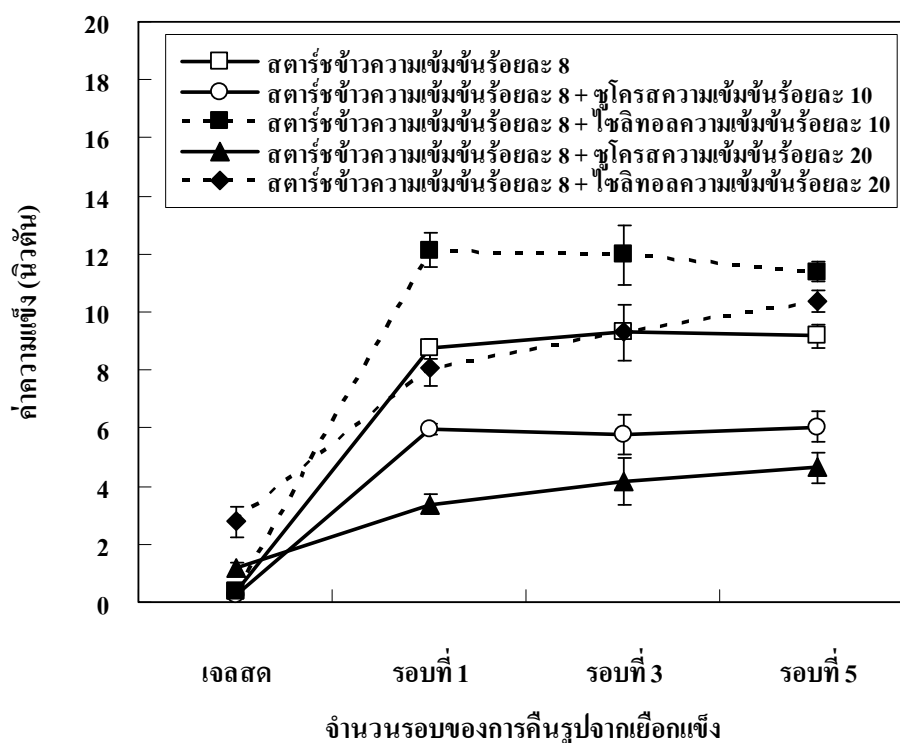
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเซตแบบของระบบสตาร์ชกับค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมซูโครสหรือไซลิทอลหลังการคั้นรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 1

จากภาพที่ 29 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าเซตแบบของระบบสตาร์ชกับค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลหลังการคั้นรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 1 นั้นมีความสัมพันธ์กันมาก โดยที่เจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครสมีค่า r^2 เท่ากับ 0.988 (ดังภาพที่ 29 ก) ส่วนเจลสตาร์ชข้าวผสมไซลิทอลมีค่า r^2 เท่ากับ 0.999 (ดังภาพที่ 29 ข) ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเซตแบบของระบบสตาร์ชกับค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าว แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าเซตแบบของระบบสตาร์ชน้อยลง ค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวมีแนวโน้มลดลงด้วย

2.5 ผลของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ต่อเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช

งานวิจัยนี้วัดเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) โดยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) และทำการกดเจลให้มีระดับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation level) ร้อยละ 20 จากความสูงดั้งเดิมของเจล โดยอ่านผลเป็นค่าความแข็งของเจล (hardness) ซึ่งค่าความแข็งของเจลเป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ช (Lan *et al.*, 2008)

โดยทั่วไปส่วนใหญ่งานวิจัยที่วัดเนื้อสัมผัสโดยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) มักกดเจลให้มีระดับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation level) อย่างมาก คือ ร้อยละ 75-80 จากความสูงดั้งเดิมของเจล แต่ในการทดลองนี้ทำการกดเจลให้มีระดับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพียงเล็กน้อย คือ ร้อยละ 20 จากความสูงดั้งเดิมของเจล ซึ่งในระบบอาหารประเภทเจลสตาร์ชจะทำการกดเจลให้มีระดับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงระหว่างร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 50 เนื่องจากการกดเจลให้มีระดับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมากตัวอย่างเจลสตาร์ชจะเกิดการยุบตัวลง (collapsed) และทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดเนื้อสัมผัสไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง (Huang *et al.*, 2002; Pons and Fiszman, 1996) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการกดเจลให้มีระดับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation level) ร้อยละ 20 จากความสูงดั้งเดิมของเจล แล้วรายงานผลออกมาเป็นค่าความแข็งของเจล ซึ่งค่าความแข็ง (hardness) ที่ได้ หมายถึง ค่าแรงสูงสุดจากกราฟ texture profile analysis ที่เกิดขึ้นจากการกดตัวอย่างครั้งที่ 1 ที่ระยะทางร้อยละ 20 ของความสูงเจล ค่าความแข็ง (hardness) ที่วัดได้มีหน่วยเป็นนิวตัน โดยสัมพันธ์กับความแข็งของเจลที่ต้านแรงกด เหตุที่งานวิจัยนี้รายงานเฉพาะค่าความแข็ง (hardness) เพียงค่าเดียวเนื่องจาก หลังการกดเจลในครั้งที่หนึ่งแล้ว ตัวอย่างเจลสตาร์ชที่มีน้ำตาลไซลิทอลเกิดการปริแตกทำให้ไม่สามารถหาค่า cohesiveness (การรวมตัวกันภายในของตัวอย่าง), springiness (การกลับคืนสู่ขนาดและรูปร่างเดิม), adhesiveness (การเกาะติดผิว), chewiness (พลังงานในการเคี้ยว) และ gumminess (ระดับความเป็นกาวยางหรือแป็งเปี้ยก) ต่าง ๆ เหล่านี้ได้



ภาพที่ 30 ค่าความแข็งแรงของเจดสตาร์ชข้าวกับเจดสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ชูโครสหรือโซลิตอล)

จากภาพที่ 30 หรือตารางผนวกที่ ข5 พบว่าค่าความแข็งแรงของเจดสตาร์ชหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 1, 3 และ 5 ของเจดสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลชูโครสมีค่าน้อยกว่าเจดสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้ผสมน้ำตาลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลชูโครสเพิ่มขึ้น แสดงว่าน้ำตาลชูโครสน่าจะสามารถช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ โดยที่เจดสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลชูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20 นั้นเป็นสถานะที่มีค่าความแข็งแรงของเจดหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งใกล้เคียงกับเจดสดมากที่สุด โดยผลการทดลองของในส่วนของเจดสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลชูโครสนั้นให้ผลที่สอดคล้องกับค่าร้อยละการแยกของของเหลวและโครงสร้างระดับจุลภาคของเจดสตาร์ชหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำตาลชูโครสสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเอมิโลสได้ จึงทำให้ค่าร้อยละการแยกของของเหลวลดลง และสามารถลดการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำได้

ในขณะที่ไซลิทอลทำให้ค่าความแข็งของเจลเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าจะเกิดจากไซลิทอลอาจเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับสายโซ่โมเลกุลของสตาร์ช และจากภาพที่ 24 ที่แสดงถึงความแตกต่างของโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสกับเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10 หลังการคืนรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 3 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อพิจารณาจากที่เมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุนพบว่าเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสมีเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุนที่อ่อนมีลักษณะคล้ายกับเนื้อเยื่อของกระดาษทิชชูที่เปียกชุ่ม (mashed wet tissue paper) (ภาพที่ 24 ข) จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสมีค่าน้อย ส่วนเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมไซลิทอลมีเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุนที่แข็งมีลักษณะที่อัดตัวกันแน่น (ภาพที่ 24 ค) จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมไซลิทอลมีค่าที่สูง

3. ผลของคอนยัคกลูโคแมนแนน น้ำตาลชนิดต่าง ๆ และอัตราการแช่เยือกแข็งต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง

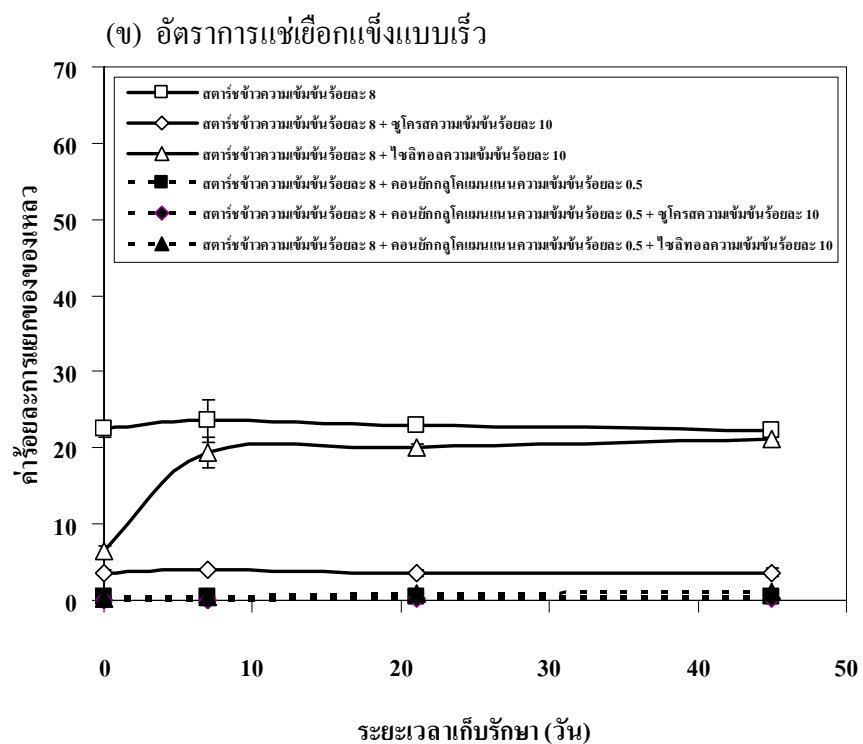
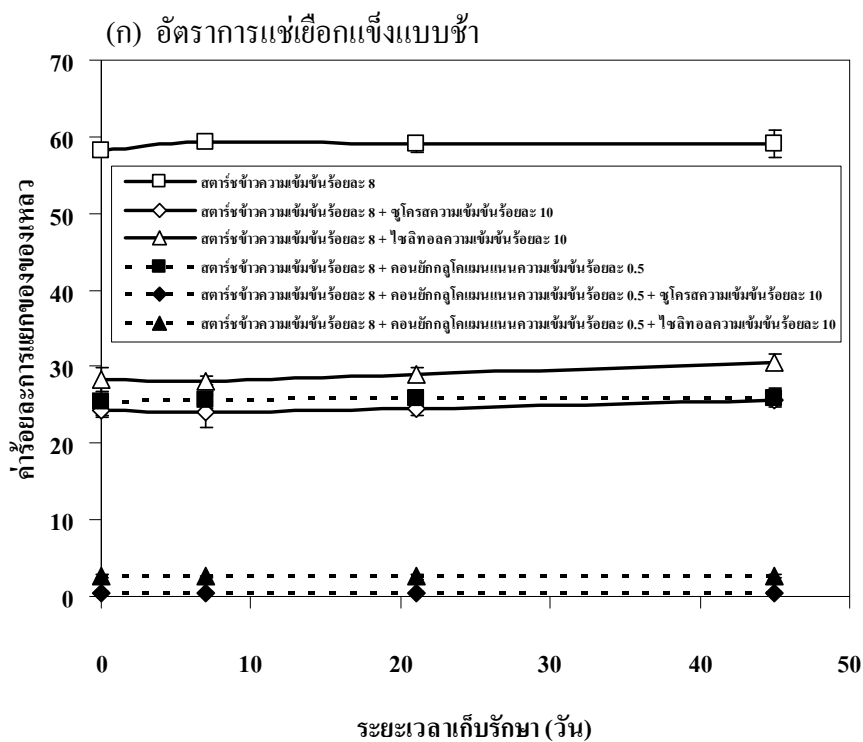
3.1 ผลของคอนยัคกลูโคแมนแนน น้ำตาลชนิดต่าง ๆ และอัตราการแช่เยือกแข็งต่อค่าร้อยละการแยกของของเหลว

อัตราการแช่เยือกแข็งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งได้ (Ferrero *et al.*, 1994; Jacobson and BeMiller, 1998) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้อัตราการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกัน 2 ระดับเพื่อเปรียบเทียบการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชได้แก่ อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (0.1 องศาเซลเซียสต่อนาที) และแบบเร็ว (4.0 องศาเซลเซียสต่อนาที) โดยอัตราการแช่เยือกแข็งที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการกำหนดขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผลของอัตราการแช่เยือกแข็ง ซึ่งอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วนี้มีค่าที่แตกต่างกันพอควร ดังนั้นจึงเป็นตัวแทนของอัตราการแช่เยือกแข็งของทั้งสองอัตราในการนำมาเปรียบเทียบผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้

ค่าร้อยละการแยกของของเหลว (% syneresis) เป็นค่าที่ใช้ประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ช (Soest *et al.*, 1994) ซึ่งถ้ามีค่ามากแสดงว่าเจลสตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันหรือเกิดการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลสตาร์ชสูง (Baker and Duarte, 1998; Lee *et al.*, 2002; Yuan and Thompson, 1998)

เจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีค่าร้อยละการแยกของของเหลวน้อยกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยเจลสตาร์ชข้าวที่ทุกสภาวะ คือ เจลสตาร์ชข้าว เจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลเข้มข้นร้อยละ 10 เจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยัคกลูโคแมนเข้มข้นร้อยละ 0.5 และเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนเข้มข้นร้อยละ 0.5 ร่วมกับน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลเข้มข้นร้อยละ 10 ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วเมื่อผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 0, 7, 21 และ 45 วัน พบว่ามีค่าร้อยละการแยกของของเหลวหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งที่ต่ำกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (เปรียบเทียบระหว่างสภาวะเดียวกัน แต่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าหรือเร็ว) ดังแสดงในภาพที่ 31 หรือตารางผนวกที่ 6 สาเหตุที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวได้มากกว่าอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า นั้นคาดว่าเป็นเพราะการลดอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งที่ผ่านช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นกระบวนการตกผลึกของสายพอลิเมอร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับขั้นการก่อนิวเคลียสผลึก (nucleation) และขั้นการเพิ่มขนาดผลึก (propagation) โดยทั้งสองขั้นตอนนี้เกิดได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง -5 ถึง 60 องศาเซลเซียสสำหรับโมเลกุลแอมิโลเพกทิน และ -5 ถึง 150 องศาเซลเซียสสำหรับโมเลกุลแอมิโลส (Biliaderis, 1998; Eerlingen *et al.*, 1993; Jacobson and BeMiller, 1998; Siliverio *et al.*, 2000; Wunderlich, 1976) จากการแช่เยือกแข็งตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วเมื่อเปรียบเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิจากประมาณ 25 จนถึง -5 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชพบว่า ที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า และแบบเร็วมีค่าประมาณ 182 และ 13 นาทีตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว นั้น อุณหภูมิของตัวอย่างเจลสตาร์ชลดลงผ่านช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชได้เร็วกว่าที่อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยการลดลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วนี้อาจส่งผลให้เกิดนิวเคลียสผลึกของโมเลกุลสตาร์ชที่เกิดขึ้นเนื่องจากการจับกันระหว่างสายของโมเลกุลแล้วเกิดเป็นเกลียวคู่สั้นลง (Ferrero *et al.*, 1994) ดังนั้นตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจึงเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินลดลง จากเหตุผลดังกล่าว

จึงทำให้เจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีค่าร้อยละการแยกของของเหลวน้อยกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับ Muadklay and Charoenrein (2008) ที่รายงานว่าเจลสตาร์ชมันลำปะหลังผสมแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.25 และ 0.50 ที่ความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับร้อยละ 5 เมื่อนำไปแช่เยือกแข็ง พบว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (2.30 องศาเซลเซียสต่อนาที) สามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลวซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้มากกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (0.90 องศาเซลเซียสต่อนาที) และเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (0.06 องศาเซลเซียสต่อนาที)



ภาพที่ 31 ค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตา์รช์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว

สำหรับค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ดังแสดงในภาพที่ 31 ก หรือตารางผนวกที่ ข6 พบว่าการเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ผสมน้ำตาลและผสมน้ำตาลได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในทุกระยะของการเก็บรักษา โดยเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครสมีประสิทธิภาพในการลดการแยกของของเหลวออกจากเจลได้มากที่สุด จากผลการทดลองดังกล่าวคาดว่าคอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถขัดขวางการเกิดเครือข่ายโครงข่ายของแอมิโลสได้ (อรรณ, 2549; Yoshimura *et al.*, 1988)

ส่วนเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว นั้นให้ผลในลักษณะเดียวกับเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า คือ การเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ผสมน้ำตาลและผสมน้ำตาลได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในทุกระยะของการเก็บรักษาเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 31 ข หรือตารางผนวกที่ ข6 และเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครสมีประสิทธิภาพในการลดการแยกของของเหลวออกจากเจลได้มากที่สุด

เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งทั้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วที่ทุกสภาวะ พบว่าที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเป็นเวลา 0, 7, 21 และ 45 วันนั้น ค่าร้อยละการแยกของของเหลวของทุกสภาวะส่วนใหญ่มีค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอล การผสมคอนยัคกลูโคแมนแนน หรือการผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลลงในเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง สามารถลดการแยกของของเหลวออกจากเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้เป็นเวลาถึง 45 วัน ซึ่งหมายถึงอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งที่มีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบหลักแล้วมีส่วนผสมต่าง ๆ เช่น น้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอล และคอนยัคกลูโคแมนแนน โดยในระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษาภายใน 45 วันนี้ ผลิตภัณฑ์จะไม่เกิดการเสื่อมเสียคุณภาพเนื่องจากการเกิดการแยกของของเหลว

เจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า นั้นทำการตรวจสอบค่าร้อยละการแยกของของเหลวที่ผ่านการเก็บรักษาระยะเวลา 0 วัน โดยการนำเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็งด้วยตู้แช่เยือกแข็งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเจลสตาร์ชมาคืนรูปจากเยือกแข็งแล้วจึงนำไปตรวจสอบค่าร้อยละการแยกของของเหลว ส่วนเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว นั้นทำการตรวจสอบค่าร้อยละการแยกของของเหลวที่ผ่านการเก็บรักษา

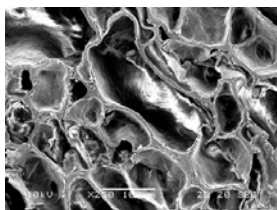
ระยะเวลา 0 วันโดยการนำเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิก จากนั้นนำมาเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เจลสตาร์ชทุกตัวอย่างมีอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเท่ากัน ซึ่งเป็นการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างเจลสตาร์ชในการเก็บรักษา แล้วจึงนำไปตรวจสอบค่าร้อยละการแยกของของเหลว

จากการเปรียบเทียบค่าร้อยละการแยกของของเหลวระหว่างเจลสตาร์ชข้าวผสม น้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 10 ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่ผ่านการเก็บรักษา ระยะเวลา 0 วัน (ภาพที่ 31 ก หรือตารางผนวกที่ ข6) กับเจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครสเข้มข้น ร้อยละ 10 ที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 1 (ภาพที่ 22 หรือตารางผนวกที่ ข4) พบว่า ค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 10 ที่ผ่านการ เก็บรักษาระยะเวลา 0 วัน มีค่าร้อยละการแยกของของเหลวที่สูงกว่าเจลสตาร์ชที่ผ่านการคืนรูปจาก เยือกแข็งในรอบที่ 1 เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ตู้แช่เยือกแข็ง 2 ตู้ โดยตู้แช่เยือกแข็งที่ใช้แช่เยือกแข็ง เจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 10 ที่ทำการเก็บรักษาแบบเป็นวันนั้นมีตัวอย่าง เจลสตาร์ชที่เก็บรักษาอยู่ในตู้แช่เยือกแข็งเป็นจำนวนมาก ทำให้อากาศหรือลมเย็นที่หมุนเวียน ภายในตู้แช่เยือกแข็งสัมผัสกับตัวอย่างเจลสตาร์ชที่นำมาแช่เยือกแข็งได้ช้าลง จึงไม่สามารถควบคุม อัตราการแช่เยือกแข็งให้มีอัตราการแช่เยือกแข็งเท่ากับสถานะที่แช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าวผสม น้ำตาลซูโครสเข้มข้นร้อยละ 10 ที่เก็บรักษาแบบเป็นรอบของการแช่เยือกแข็งได้ ทำให้เจลสตาร์ช ที่นำไปแช่เยือกแข็งที่ทำการเก็บรักษาแบบเป็นวันนั้นมีอัตราการแช่เยือกแข็งที่ช้ากว่าอัตราการ แช่เยือกแข็งแบบช้าที่ใช้ในการทดลองนี้ (มีอัตราการแช่เยือกแข็งที่ช้ากว่า 0.1 องศาเซลเซียสต่อ นาที) จึงทำให้ผลึกน้ำแข็งที่ไปทำลายโครงสร้างเจลสตาร์ชมีขนาดใหญ่มากขึ้น เป็นเหตุให้ ค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชที่ผ่านการเก็บรักษาระยะเวลา 0 วันมีค่าที่สูงกว่า เจลสตาร์ชที่เก็บรักษาแบบเป็นรอบของการแช่เยือกแข็ง

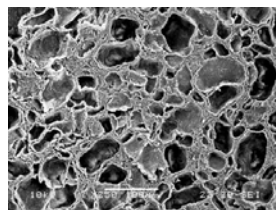
3.2 ผลของคอนยัคกลูโคแมนแนน น้ำตาลชนิดต่าง ๆ และอัตราการแช่เยือกแข็งต่อ โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ช

จากโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ดังภาพที่ 32 ข-ญ มีขนาดของรูพรุนที่เกิดจากผลึกน้ำแข็งเล็กและน้อยกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กและมีขนาดสม่ำเสมอ ส่วนการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ (สายสนม, 2546; วิไล, 2546; Fellows, 1988; Fennema, 1976) ดังนั้นเมื่อนำตัวอย่างเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วแล้วเปรียบเทียบกัน พบว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีค่าร้อยละการแยกของของเหลวน้อยกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า เนื่องจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ โดยผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่อาจไปทำลายโครงสร้างภายในของเจลสตาร์ชและทำให้ขนาดของรูพรุนที่เกิดจากผลึกน้ำแข็งภายในโครงสร้างของเจลสตาร์ชมีขนาดใหญ่ ดังภาพที่ 32 ก-ฉ เวลานั้นเจลสตาร์ชมาคิณรูปจากเยือกแข็งทำให้มีปริมาณของเหลวที่แยกออกมาจากเจลมาก อีกทั้งผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นภายในเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าอาจทำให้ส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุน (pore) จากผลึกน้ำแข็งของเจลสตาร์ชมาอัดตัวกันแน่นขึ้นเนื่องจากผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่หลาย ๆ ผลึกที่เกิดขึ้นไปเบียดส่วนของเมทริกซ์ให้แน่นขึ้น โดยส่วนของเมทริกซ์นั้นอยู่ระหว่างผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่จึงง่ายต่อการที่ส่วนของเมทริกซ์ถูกผลึกน้ำแข็งเบียดอัดได้ง่าย เป็นผลทำให้ไปเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของสายโซ่สตาร์ชและทำให้สายโซ่สตาร์ชมาบีบอัดตัวกันแน่นเป็นเหตุให้เมื่อนำมาคิณรูปจากเยือกแข็งทำให้เกิดการแยกของของเหลวออกจากเจล ส่วนการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กโดยผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กนี้ไปทำลายโครงสร้างภายในของเจลสตาร์ชได้น้อยกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและทำให้ขนาดของรูพรุนที่เกิดจากผลึกน้ำแข็งภายในโครงสร้างของเจลสตาร์ชมีเล็กกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ดังภาพที่ 32 ข-ญ เวลานั้นเจลสตาร์ชมาคิณรูปจากเยือกแข็งทำให้มีปริมาณของเหลวที่แยกออกมาจากเจln้อยกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

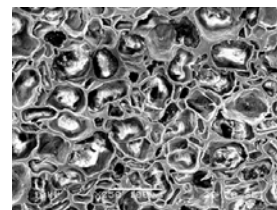
อัตราการใช้เยื่อแข็งแบบช้า



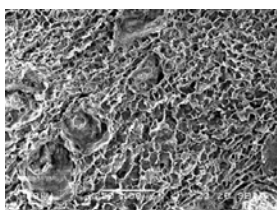
(ก) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8



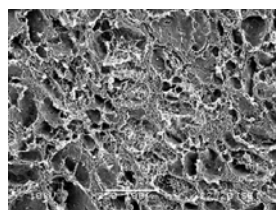
(ข) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10



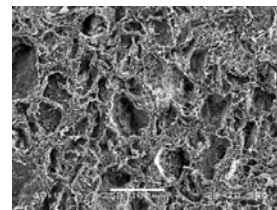
(ค) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10



(ง) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
คอนยัคกลูโคแมนแนน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.5

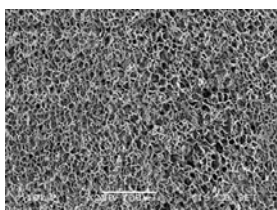


(จ) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
คอนยัคกลูโคแมนแนน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 +
ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10

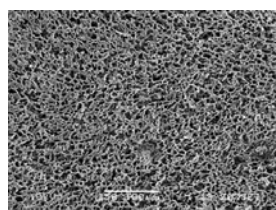


(ฉ) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
คอนยัคกลูโคแมนแนน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 +
ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10

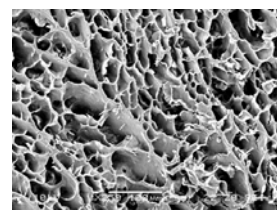
อัตราการใช้เยื่อแข็งแบบเร็ว



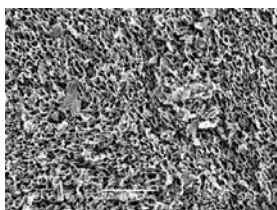
(ซ) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8



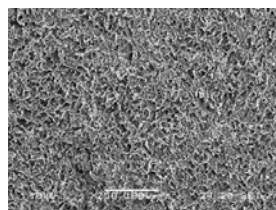
(ฌ) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10



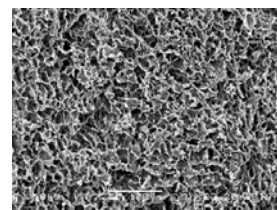
(ฉ) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10



(ญ) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
คอนยัคกลูโคแมนแนน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.5



(ฎ) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
คอนยัคกลูโคแมนแนน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 +
ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10



(ฏ) สดาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 +
คอนยัคกลูโคแมนแนน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 +
ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10

ภาพที่ 32 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเจลสดาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่เยื่อแข็งด้วย
อัตราการใช้เยื่อแข็งแบบช้าและแบบเร็วที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 21 วัน แล้วนำมา
คืนรูปจากเยื่อแข็ง (250x, Bar = 100 μ m)

เมื่อพิจารณาที่โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนทั้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วพบว่ามียูพรุนที่เกิดจากผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็ก เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์สามารถควบคุมขนาดของผลึกน้ำแข็งและการเกิดการแตกผลึกของน้ำแข็งใหม่ (Lee *et al.*, 2002) จึงทำให้โครงสร้างของเจลสตาร์ชที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนถูกทำลายได้น้อยกว่าโครงสร้างของเจลสตาร์ชที่ไม่ได้ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนน ด้วยเหตุนี้ทำให้คอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถลดขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ไปทำลายโครงสร้างของเจลสตาร์ชข้าวได้ และ Sharadanant and Khan (2003) ยังพบว่าการเติมไฮโดรคอลลอยด์ช่วยปรับปรุงคุณภาพของโดแช่เยือกแข็ง (frozen dough) โดยไฮโดรคอลลอยด์ไปจับกับน้ำภายในโด ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ (freezable water) จึงลดลง ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่ไปทำลายโครงสร้างของโดน้อยลง ด้วยเหตุนี้โดจึงเสียหายจากการแช่เยือกแข็งน้อยลง นอกจากนี้คอนยัคกลูโคแมนแนนยังสามารถลดการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำได้ เนื่องจากสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสได้ โดยเห็นได้จากภาพที่ 32 ที่แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่มีคอนยัคกลูโคแมนแนนส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูพรุน (pore) จากผลึกน้ำแข็งมีลักษณะที่คล้ายกับเนื้อเยื่อของกระดาษทิชชูที่เปียกชุ่ม (mashed wet tissue paper)

ส่วนโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลทั้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วพบว่ามียูพรุนที่เกิดจากผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้ผสมน้ำตาล ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลไปจับกับโมเลกุลของน้ำในระบบเจลสตาร์ช เมื่อนำไปแช่เยือกแข็งส่วนของน้ำที่แข็งตัวได้จึงมีปริมาณน้อยลง ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งในโครงสร้างของเจลสตาร์ชน้อยลง ดังนั้นรูพรุนในโครงสร้างของเจลสตาร์ชที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลึกน้ำแข็งจึงมีน้อยลง (ตารางที่ 6) โครงสร้างของเจลสตาร์ชจึงเสียหายจากการถูกผลึกน้ำแข็งทำลายน้อยลง

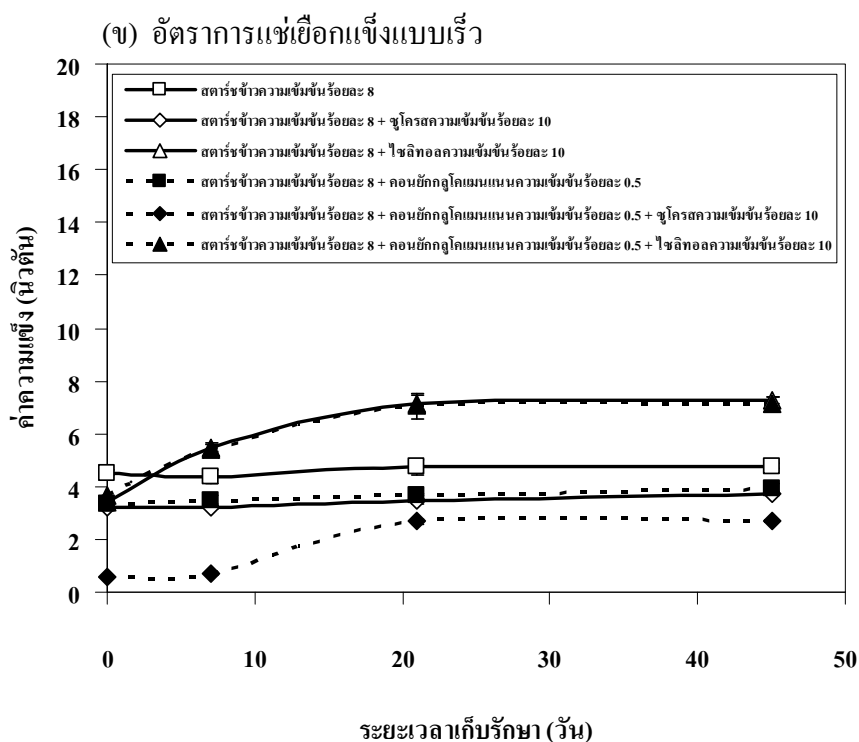
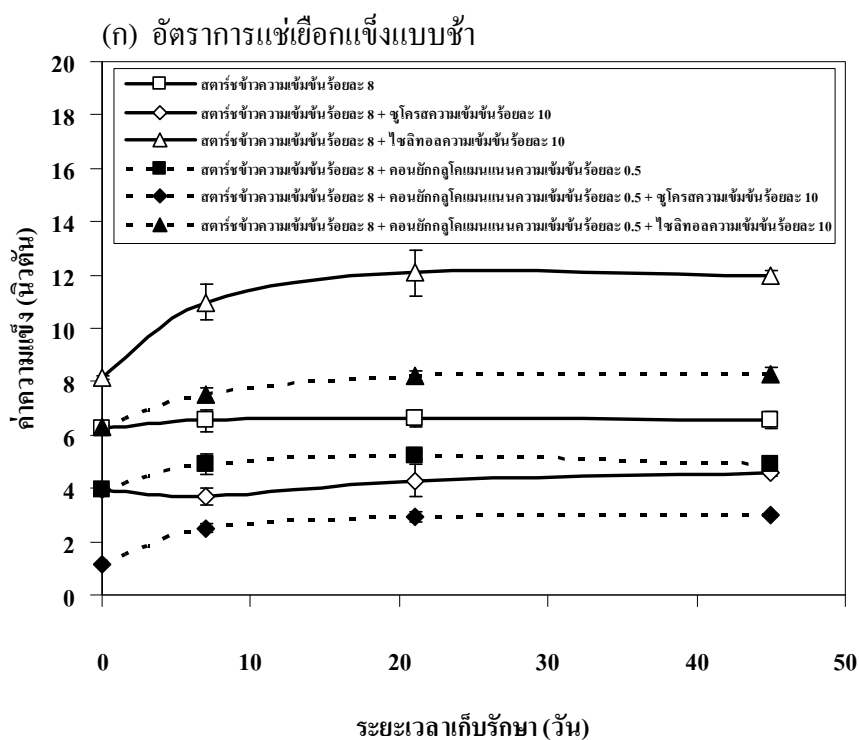
ในขณะที่โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลทั้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วพบว่ามียูพรุนที่เกิดจากผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็ก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของทั้งคอนยัคกลูโคแมนแนนและน้ำตาลผสมผสานร่วมกันในการควบคุมผลึกน้ำแข็ง โดยทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งในโครงสร้างของเจลสตาร์ชน้อยลง ดังนั้นรูพรุนในโครงสร้างของเจลสตาร์ชที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลึกน้ำแข็งจึงมีน้อยลง โครงสร้างของเจลสตาร์ชจึงเสียหายจากการถูกผลึกน้ำแข็งทำลายน้อยลง

ผลการทดลองที่ได้จากโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 21 วัน แล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกับคำอธิบายการแยกของของเหลว

3.3 ผลของคอนยัคกลูโคแมนแนน น้ำตาลชนิดต่าง ๆ และอัตราการแช่เยือกแข็งต่อเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ช

การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชในระหว่างการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษานั้น ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเจลมีความแข็งมากเพิ่มขึ้น (Hikone, 1998; Mandala, 2002) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเจลสตาร์ชหลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งเพื่อประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างที่ใช้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน

เจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีค่าความแข็งของเจลน้อยกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าดังภาพที่ 33 หรือตารางผนวกที่ ข7 โดยเจลสตาร์ชข้าวที่ทุกสภาวะ คือ เจลสตาร์ชข้าว เจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลซูโครส หรือไซลิทอลเข้มข้นร้อยละ 10 เจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนเข้มข้นร้อยละ 0.5 และเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนเข้มข้นร้อยละ 0.5 ร่วมกับน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลเข้มข้นร้อยละ 10 ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วเมื่อผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 0, 7, 21 และ 45 วัน พบว่ามีค่าความแข็งของเจลหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งที่ต่ำกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (เปรียบเทียบระหว่างสภาวะเดียวกัน แต่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าหรือเร็ว) ดังแสดงในภาพที่ 33 หรือตารางผนวกที่ ข7 เนื่องจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วนั้นทำให้ระบบผ่านสภาวะรีบเบอร์รี่ (rubbery state) ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเกิดนิวเคลียสและการโตของผลึกของสายโมเลกุลสตาร์ชไปได้อย่างรวดเร็ว จึงช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินลงได้ (Ferrero *et al.*, 1994) เป็นเหตุให้เจลมีความแข็งลดลง



ภาพที่ 33 ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว

สำหรับค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ดังภาพที่ 33 ก หรือตารางผนวกที่ ข7 พบว่าสถานะที่ใช้ น้ำตาลซูโครส, คอนยัคกลูโคแมนแนน และ คอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครสสามารถลดค่าความแข็งของเจลสตาร์ชได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คาดว่าเนื่องจากน้ำตาลซูโครสสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ โดยโมเลกุลของน้ำตาลซูโครสอาจไปขัดขวางการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลสตาร์ชโดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นผลเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส ส่วนคอนยัคกลูโคแมนแนนนั้นคาดว่าสามารถขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสได้ (อรรณ, 2549; Yoshimura *et al.*, 1988) เช่นกัน จึงทำให้ค่าความแข็งของเจลลดลง โดยสันนิษฐานว่าเกิดจากการที่โมเลกุลของคอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถเข้าไปกีดขวางการจัดตัวของโมเลกุลสตาร์ชได้ (อรรณ, 2549) และในสถานะที่มีคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครส อาจเป็นผลจากทั้งคู่ผสมผสานกันในการลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส จึงทำให้ลดค่าความแข็งของเจลได้ดี โดยเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครสนั้นเป็นสถานะที่มีค่าความแข็งของเจลหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งใกล้เคียงกับเจลสดมากที่สุด ซึ่งผลที่ได้ในส่วนนี้สอดคล้องกับผลในส่วนของการแยกของของเหลวออกจากเจลและโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ช ในขณะที่สถานะที่มีไซลิทอล และคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับไซลิทอลทำให้ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชสูงขึ้นซึ่งคาดว่าเกิดจากไซลิทอลอาจเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับสายโซ่โมเลกุลของสตาร์ช

ส่วนเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วนี้ให้ผลในลักษณะเดียวกับเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า คือ สถานะที่ใช้ น้ำตาลซูโครส, คอนยัคกลูโคแมนแนน และคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครสสามารถลดค่าความแข็งของเจลสตาร์ชได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 33 ข หรือตารางผนวกที่ ข7 โดยเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครสนั้นเป็นสถานะที่มีค่าความแข็งของเจลหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งใกล้เคียงกับเจลสดมากที่สุด ซึ่งผลที่ได้ในส่วนนี้สอดคล้องกับผลในส่วนของการแยกของของเหลวออกจากเจลและโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ช ในขณะที่สถานะที่มีไซลิทอล และคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับไซลิทอลทำให้ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชสูงขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การใช้ น้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 เป็นส่วนผสมในระบบเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งทำให้เจลสตาร์ชข้าวมีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งสามารถลดค่าการแยกของของเหลวได้ โดยที่ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 มีประสิทธิภาพสูงสุด เห็นได้จากเมื่อใช้น้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลเป็นส่วนผสมของระบบสตาร์ชทำให้ปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบสตาร์ชมีค่าลดลง โดยปริมาณของน้ำที่แข็งตัวได้ในระบบเจลสตาร์ช ลดลงตามความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลที่เพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปแช่เยือกแข็งทำให้มีส่วนของน้ำที่แข็งตัวได้ลดลง รูปพรุนภายในโครงสร้างของเจลสตาร์ชที่เกิดจากผลึกน้ำแข็งลดลง ทำให้ความหนาในส่วนของเมทริกซ์รอบ ๆ รูปพรุนมีความหนามากขึ้น ทำให้ลดการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ ส่วนการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส น้ำตาลซูโครสสามารถลดค่าความแข็งของเจลสตาร์ชได้ แต่ไซลิทอลทำให้ค่าความแข็งของเจลสูงขึ้น ทำให้ไซลิทอลอาจเหมาะสมในการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งที่ต้องการให้มีเนื้อสัมผัสที่แข็ง เพื่อให้เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ส่วนน้ำตาลซูโครสนั้นเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งที่ต้องการให้มีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่ม

2. การใช้ น้ำตาลซูโครส, ไซลิทอล, คอนยัคกลูโคแมนแนน, คอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครส หรือคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับไซลิทอล เป็นส่วนผสมในระบบเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งสามารถลดค่าการแยกของของเหลวได้ โดยมีประสิทธิภาพมากเมื่อใช้คอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครส ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลสตาร์ชที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งหลังจากที่เก็บรักษาเป็นเวลา 21 วัน ส่วนการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส น้ำตาลซูโครส, คอนยัคกลูโคแมนแนน และคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับน้ำตาลซูโครส สามารถลดค่าความแข็งของเจลสตาร์ชได้ แต่ไซลิทอล และคอนยัคกลูโคแมนแนนร่วมกับไซลิทอลทำให้ค่าความแข็งของเจลสูงขึ้น

3. เจลสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีคุณภาพดีกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า คือ สามารถลดการแยกของของเหลว ลดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส และลดการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำได้ดีขึ้น

4. สภาวะที่สามารถลดการแยกของของเหลว การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส การเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำได้ดีที่สุดในการทดลองนี้ หรือเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพ และลดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้ดีที่สุด คือ การใช้คอนยัคกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ร่วมกับน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10 และใช้การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

ข้อเสนอแนะ

1. คอนยัคกลูโคแมนแนน น้ำตาลซูโครส และโซลิตอลสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพและลดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้ ดังนั้นสามารถองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งพร้อมบริโภคพร้อมบริโภคจำพวกของหวาน (frozen desserts) ที่ทำจากแป้งข้าวหรือสตาร์ชข้าวที่มีลักษณะเป็นเจล โดยเฉพาะขนมไทย เช่น ขนมชั้น ขนมถ้วยฟู ลอดช่องน้ำกะทิ ขนมปลากุยมี่ไข่เต่า ครองแครงกะทิ เป็นต้น

2. ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำตาลที่ใช้ศึกษามีแค่น้ำตาลซูโครสกับโซลิตอล ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้น้ำตาลชนิดอื่น ๆ หรือศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ตัวอื่นนอกจากคอนยัคกลูโคแมนแนน เพื่อเป็นการเพิ่มทางเลือกการใช้ส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งให้กับอุตสาหกรรมอาหาร

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2542. **สารให้ความหวาน**. บริษัท จาร์พา เทคโนโลยี จำกัด, กรุงเทพฯ.

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

ธงชัย สุวรรณสิขณ. 2550. การประเมินคุณภาพทางกายภาพด้านเนื้อสัมผัส, น. 349-367. ใน รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, บรรณาธิการ. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเกษตร**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิธิยา รัตนปนนท์. 2545. **เคมีอาหาร**. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

นิรนาม. 2548. **ขนมไทย 1**. พิมพ์ครั้งที่ 15. สำนักพิมพ์แสงแดด, กรุงเทพฯ.

บั้งอร บุญชู. 2547. น้ำตาลและความหวานที่ไร้น้ำตาล. **บทความวิทยุกระจายเสียงรายการ สารยามบ่าย ครั้งที่ 42 กระจายเสียงจากสถานีวิทยุกระจายเสียงแห่งประเทศไทย ประจำเดือน เมษายน 2547 เวลา 16.30-17.00 น.**
แหล่งที่มา: http://siweb.dss.go.th/doc/radio/radiolist_show.asp?ID=26,
29 พฤษภาคม 2549.

ปาริฉัตร หงสประภาส. 2545. **เคมีกายภาพของอาหาร คอลลอยด์ อิมัลชัน และเจล**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

พนอจิต ัญญมมงคลพงศ์. 2531. การแยกส่วนแอมิโลสจากแป้งข้าวเจ้า. **วิทยานิพนธ์ปริญญาโท**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ไพบุลย์ ธรรมรัตน์वास. 2532. **กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร**. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2535. **วิศวกรรมการแปรรูป: การถนอมอาหาร**. โอ.เอส.พรี้นติ้งเฮาส์, กรุงเทพฯ.

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2550. หลักการประยุกต์ไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์, น. 275-296. ใน รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, บรรณาธิการ. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเกษตร**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วรรณา ตูลยชัย. 2549. **เคมีอาหารของคาร์โบไฮเดรต**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วิไล รังสาทอง. 2546. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร. คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

ศยามล เนตรประภา. 2544. **การพัฒนาเครื่องดื่มข้าวหอมมะลิ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศิริลักษณ์ สินธวลัย. 2525. **ทฤษฎีอาหาร เล่ม 1 หลักการประกอบอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 4. บริษัท บี เอฟ ไอ จำกัด, กรุงเทพฯ.

สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2546. กระบวนการแช่เยือกแข็งอาหาร, น. 154-186. ใน คณาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, บรรณาธิการ. **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สาโรจน์ ศิริคันสนียกุล. 2547. **เทคโนโลยีชีวภาพอาหาร การหมัก และสิ่งแวดล้อม**. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรรวรรณ ตติรัตน์. 2549. ผลของการแช่เยือกแข็งและคอนยักกลูโคแมนเนนต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. 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.

A.O.A.C. 2000. **Official Method of Analysis.** 17th ed., The Association of official Analytical Chemists, Arlington, Virginia.

Aee, L.A., K.N. Hie and K. Nishinari. 1998. DSC and rheological studies of the effects of sucrose on the gelatinization and retrogradation of acorn starch. **Thermo. Acta.** 322: 39-46.

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. Effect of sucrose on the freeze-thaw stability of rice starch gels: Correlation with microstructure and freezable water. **Carbohydr. Polym.** 74: 514-518

Back, M.H., B. Yoo and S.T. Lim. 2004. Effects of sugars and sugar alcohols on thermal transition and cold stability of corn starch gel. **Food hydrocoll.** 18: 133-142.

Baker, L.A. and P. Rayas-Duarte. 1998. Freeze-thaw stability of amaranth starch and the effects of salt and sugars. **Cereal Chem.** 75: 301-307.

Balagopalan, C., G. Padmaja, S.K. Nanda and S.N. Moorthy. 1988. **Cassava in Food, Feed and Industry.** CRC Press, Inc., Florida.

- Bao, J. and C. J. Bergman. 2004. The functionality of rice starch, pp. 258-294. *In* A.-C. Eliasson, ed. **Starch in food: Structure, function and applications**. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.
- Bevilacqua, A.E. and N.E. Zaritzky. 1982. Ice recrystallization in frozen beef. **J. Food Sci.** 47: 1410-1414.
- Biliaderis, C.G. 1992. Structure and phase transition of starch in food systems. **Food Technol.** 46: 98-108.
- Biliaderis, C.G. 1998. Structures and phase transitions of starch polymers, pp. 57-167. *In* R.H. Walter, ed. **Polysaccharide Association Structures in Food**. Marcel Dekker Inc., New York.
- Bond, M. and N. Dunning. 2006. Xylitol, pp. 295-324. *In* H. Mitchell, ed. **Sweeteners and Sugar Alternatives in Food Technology**. Blackwell Publishing Ltd, Oxford.
- Brennan, C., C.K. Tan, V. Kuri and C. M. Tudorica. 2004. The pasting behaviour and freeze-thaw stability of native starch-xanthan gum pastes. **Int. J. Food Sci. Technol.** 39: 1017-1022.
- 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.
- Chances, 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., O. Tatirat and J. Muadklay. 2008. Use of centrifugation-filtration for determination of syneresis in freeze-thaw starch gels. **Carbohydr. Polym.** 73: 143-147.
- CyberColloids Ltd. 2006. Konjac-an introduction. **Making Natural Polymers Work**.
Available Source: <http://www.cybercolloids.net/library/konjac/structure.php>, May 29, 2006.
- Dave, V., M. Sheth., S.P. McCarthy., J.A. Ratto and D.L. Kaplan. 1998. Liquid crystalline, rheological and thermal properties of konjac glucomannan. **Polymer**. 39: 1139-1148.
- Deman, M.J. 1999. **Principle of Food Chemistry**. Anaspen Publication, Maryland.
- Donovan, W.J. 1979. Phase transition of the starch-water system. **Biopolymers**. 18: 263-275.
- Eerlingen, R.C., M. Crombez and J.A. Delcour. 1993. Enzyme resistance starch I Quantitation and qualitative influence of incubation time and temperature of autoclaved starch on resistant starch formation. **Cereal Chem.** 70: 339-344.
- Eidam, D., W.M. Kuleke, K. Kuhn and R. Stute. 1995. Formation of maize starch gels selectively regulated by the addition of hydrocolloids. **Starch/Stärke**. 47: 378-384.
- Embuscado, M.E. 2006. Polyols, pp. 153-174. In W.J. Spillane, ed. **Optimising Sweet Taste in Foods**. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.
- 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.
- Fellows, P.J. 1998. **Food Processing Technology: Principles and Practice**. Ellis Horwood Limited, New York.

- Fennema, O.R. 1976. Freezing preservation, pp. 173-215. *In* O.R. Fennema, ed. **Principles of Food Science Part II: Physical Principles of Food Preservation**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Fennema, O.R. 1983. **Principles of Food Science**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Ferrero, C., M.N. Martino and N.E. Zaritzky. 1993. Effect of freezing rate and xanthan gum on the properties of corn starch and wheat flour pastes. **Int. J. Food Sci. Tech.** 28: 481-498.
- 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/Stärke**. 46: 300-308.
- Ferrero, C. 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 Hydrocoll.** 19: 1-13.
- 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.
- Gunaratne, A. and R. Hoover. 2002. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. **Carbohydr. Polym.** 49: 425-437.
- 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.

- Hikone, Y.H. 1998. Roles of water-soluble and water-insoluble carbohydrates in the gelatinization and retrogradation of rice starch. **Starch/Stärke**. 50: 474-478.
- Hizukuri, S., 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.
- Holmes, Z.A. and A. Solender. 1981. Macrostructure of selected raw starches and selected heated starch dispersion. **J. American Dietetic Association**. 78: 153-160.
- Huang, M., J.F. Kennedy, B. Li, X. Xu and B.J. Xie. 2007. Characters of rice starch gel modified by gellan, carrageenan, and glucomannan: A texture profile analysis study. **Carbohydr. Polym.** 69: 411-418.
- Jacquier, J. C., A. Kar, J. G. Lyng, D. J. Morgan and B. M. McKenna. 2006. Influence of granule size on the flow behaviour of heated rice starch dispersions in excess water. **Carbohydr. Polym.** 66: 425-434.
- Jacobson, M.R. and J.N. BeMiller. 1998. Method for determining the rate and extent of accelerated starch retrogradation. **Cereal Chem.** 75: 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.
- Juliano, B.O. 1992. Structure, chemistry, and functional of the rice grain and its fractions. **Cereal Foods World** 37: 772-774.

- Karim, A.A., M.H. Norziah and C.C. Seow. 2000. Methods for the study of starch retrogradation. **Food Chem.** 71: 9-36.
- Kaletunc, G. and K.J. Breslauer. 2003. **Characterization of Cereals and Flour.** Marcel Dekker, Inc., New York.
- Keetels, C.J.A.M., T. van Vilet and H. Luyten. 1995. Effect of retrogradation on the structure and mechanics of concentrated starch gels, pp. 472-479. In E. Dickinson and D. Lorient, eds. **Food Macromolecules and Colloids.** The Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Khanna, S. and R.F. Tester. 2006. Influence of purified konjac glucomannan on the gelatinization and retrogradation properties of maize and potato starch. **Food Hydrocoll.** 20: 567-576.
- Kim, S.Y., D.P. Wiesenborn, P.H. Orr and L.A. Grant. 1995. Screening potato starch for novel properties using Differential Scanning Calorimetry. **J. Food Sci.** 60: 1060-1065.
- Krüger, A., C. Ferrero and N.E. Zaritzky. 2003. Modelling corn starch swelling in batch systems: effect of sucrose and hydrocolloids. **J. Food Eng.** 58: 125-133.
- Lan, W., Y. Zhihua, W. Jia, S. Zhida and X. Bijun. 2008. A study on freeze-thaw characteristics and microstructure of Chinese water chestnut starch gels. **J. Food Eng.** 88: 186-192.
- 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 Hydrocoll.** 16: 345-352.
- Lii, C.-y., M.-F. Lai and K.-F. Liu. 1998. Factor influencing the retrogradation of two rice starches in low-molecular-weight saccharide solutions. **J. Cereal Sci.** 28: 175-185.

- Lii, Y.C., M.L. Tsai and K.H. Seng. 1996. Effects of amylase content on the rheological property of rice starch. **Cereal Chem.** 73: 415-420.
- 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.
- Lumdubwong, N. and P.A. Seib. 2000. Rice starch isolation by alkaline protease digestion of wet-milled rice flour. **J. Cereal Sci.** 31: 63-74. Cited T.J. Schoch. 1967. **Starch Chemistry and Technology' Vol. 2.** Academic Press Inc., 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.
- Mandala, I.G., 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.
- Matz, S.A. 1991. **The Chemistry and Technology of Cereal as Food and Feed.** 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Miles, M.J., V.J. Morris, P.D. Orford and S.G. Ring. 1985. The roles of amylase and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. **Carbohydr. Res.** 135: 271-281.
- 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. Blanshard and J.R. Mitchell. 1998. **Food Structure-Its Creation and Evaluation.** Butler and Tanner, Great Britain.
- Morris, V.J. 1990. Starch gelation and retrogradation. **Trends Food Sci. Tech.** 1: 2-6.

- Morris, V.J. 1992. Design polysaccharides for synergistic interactions, pp. 161-171. *In* G.O. Phillip, P.A. Williams and D.J. Wedlock, eds. **Gum and Stabilisers for the Food Industry 6**. Oxford University Press, New York.
- 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 Ltd, New York.
- Newport Scientific, Ltd. 1995. **Operation Manual for the Series 4 Rapid Visco Analyser**. Warriewood, New South Wales.
- Nishinari, K., P.A. Williams and G.O. Phillips. 1992. Review of the physico-chemical characteristics and properties of konjac mannan. **Food Hydrocoll.** 6: 199-222.
- Nishinari, K. and R. Takahashi. 2003. Interaction in polysaccharide solutions and gels. **Curr. Opin. Colloid In.** 8: 396-400.
- Oates, C.G. 1997. Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis. **Trends Food Sci. Tech.** 8: 375-382.
- Persson, P.O. and G. Londahl. 1993. Freezing Technology, pp. 20-58. *In* C.P. Mallett, ed. **Frozen Food Technology**. Chapman & Hall, Great Britain.
- Phillips, O.G. and P.A. Williams. 2000. **Handbook of Hydrocolloids**. Woodhead Publishing Ltd, New York.
- Pongsawatmanit, R., T. Temsiripong, S. Ikeda and K. Nishinari. 2006. Influence of tamarind seed xyloglucan on rheological properties and thermal stability of tapioca starch. **J. Food Eng.** 77: 41-50.

- Pongsawatmanit, R., T. Temsiripong and T. Suwonsichon. 2007. Thermal and rheological properties of tapioca starch and xyloglucan mixtures in the presence of sucrose. **Food Res. Int.** 40: 239-248.
- Pongsawatmanit, R., P. Thanasukarn and S. Ikeda. 2002. Effect of sucrose on RVA viscosity parameters, water activity and freezable water fraction of cassava starch suspensions. **ScienceAsia.** 28: 129-134.
- Pons, M. and S.M. Fiszman. 1996. Instrumental texture profile analysis with particular reference to gelled systems. **J. Texture Stud.** 27: 597-624.
- Prokopowich, D.J. and C.G. Biliaderis. 1995. A comparative study of the effect of sugars on the thermal and mechanical properties of concentrated waxy maize, wheat, potato and pea starch gels. **Food Chem.** 52: 255-262.
- Putaux, L.J., A. Bulon and H. Chanzy. 2000. Network formation in dilute amylose and amylopectin studied by TEM. **Macromolecule.** 30: 6416-6422.
- Ragaei, S. and El-S. M. Abdel-Aal 2006. Pasting properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. **Food Chem.** 95: 9-18.
- Rahman, M.S. 1999. Food preservation by freezing, pp. 259-284. *In* M. S. Rahman, ed. **Handbook of Food Preservation.** Marcel Dekker, Inc., New York.
- Ratcliffe, I., P.A. Williams, C. Viebke and J. Meadows. 2005. Physicochemical characterization of konjac glucomannan. **Biomacromolecules.** 6: 1977-1986.
- Reid, D.S. and W. Kerr. 1993. Calorimetry, pp. 123-132. *In* J.M.V. Blanshard, ed. **The Glassy State in Foods.** Nottingham University Press, Nottingham.

Richardson, S.J. 1988. Molecular mobilities of instant starch gels determined by oxygen-17 and carbon-13 nuclear magnetic resonance. **J. Food Sci.** 53: 1175-1180.

Roos, Y.H. 1995. **Phase Transition in Foods**. Academic Press, Inc., California.

Roos, Y.H. and M. Karel. 1991. Applying state diagrams to food processing and development. **Food Technol.** 1: 66-71.

Satrapai, S. and M. Suphantharika. 2007. Influence of spent brewer's yeast β -glucan on gelatinization and retrogradation of rice starch. **Carbohydr. Polym.** 67: 500-510.

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.

Schoch, T.J. 1968. Effect of freezing and cold storage on pasted starches, pp. 44-56. *In* D.K. Tressler, W.B.V. Arsdell and M.J. Copley, eds. **The Freezing Preservation of Foods: Vol. IV**. The AVI Publishing Company, Inc., Connecticut.

Sharadanant, R. and K. Khan. 2003. Effect of hydrophilic gums on frozen dough. I. Dough quality. **Cereal Chem.** 80: 764-772.

Siliverio, J., H. Fredriksson, R. Andersson, A.C. Eliasson and P. Aman. 2000. The effect of temperature cycling on the amylopectin retrogradation of starches with different amylopectin unit-chain length distribution. **Carbohydr. Polym.** 42: 175-184.

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.

- Singh, V., H. Okadome, H. Toyoshima, S. Isobo and K. Ohtsubo. 2000. Thermal and physicochemical properties of rice grain, flour and starch. **J. Agric. Food Chem.** 48: 2639-2647.
- Slade, L. and H. Levine. 1991. Beyond water activity: recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety. **Crit. Rev. Food Sci. Nutr.** 30: 115-360.
- 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/Stärke.** 46: 453-457.
- Stephen, A.M. 1995. **Food Polysaccharides and Their Applications.** Marcel Dekker, Inc., new York.
- Takigami, S. 2000. Konjac mannan, pp. 413-424. *In* G.O. Phillips and P.A. Williams, eds. **Handbook of Hydrocolloids.** Woodhead Publishing Limited., New York.
- Tester, F.R. and W.R.Morrison. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose and lipids. **Cereal Chem.** 67: 558-563.
- Tester, R.F. 1997. Starch: the polysaccharide fractions, pp. 163-147. *In* P.J. Frazies, A.M. Donald and P. Richmond, eds. **Starch Structure and Functionality.** The Royal Society of Chemistry, U.K.
- Thiewes, H.J. and P.A.M.S. Groningen. 1997. Comparison of the Brabender Viskograph and the Rapid Visco Analyser: I Statistical Evaluation of the Pasting Profile. **Starch/Stärke.** 49: 85-92.

- Tong, B., Z.-C. Tan, Q. Shi, Y.-S. Li, D.-T. Yue and S.-X. Wang. 2007. Thermodynamic investigation of several natural polyols (I): Heat capacities and thermodynamic properties of xylitol. **Thermo. Acta.** 457: 20-26.
- Torley, P.J. and F.v.d. Molen. 2005. Gelatinization of starch in mixed sugar systems. **LWT-Food Sci, Technol.** 38: 762-771.
- Tye, R.J. 1991. Konjac flour: properties and applications. **Food Tech.** 45: 86-92.
- Varavinit, S. Shobsngob, W. Varayanond, P. Chinachoti and O. Naivikul. 2002. Freezing and thawing conditions affect the gel stability of different varieties of rice flour. **Starch/Stärke** 54: 31-36.
- Wang, Y. J. and J. Jane. 1994. Correlation between glass transition temperature and starch retrogradation in the presence of sugars and maltodextrins. **Cereal Chem.** 71: 527-531.
- Whistler, R.L. and J.N. BeMiller. 1999. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists.** Eagan Press, St. Paul, MN.
- Winton, A.L. and K.B. Winton. 1906. **The Structure and Composition of Food.** John Wiley & Son, Inc., New York.
- Wunderlich, B. 1976. **Macromolecular Physics: Volume 2: Crystal Nucleation, Growth, Annealing.** Academic Press, New York. Cited J.M.V. Blanshard and J.R. Mitchell. 1998. **Food Structure: Its Creation and Evaluation.** Butler and Tanner, Great Britain.
- 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.

- Yoshimura, M., T. Takaya and K. Nishimari. 1998. Rheological studies on mixtures of corn starch and konjac-glucomannan. **Carbohydr. Polym.** 35: 71-79.
- Yuan, R.C. and D.B. Thompson. 1998. Freeze-thaw stability of three waxy maize starch pastes measured by centrifugation and calorimetry. **Cereal Chem.** 75: 571-573.
- Zamora, A. 2007. Scientific Psychic. **Carbohydrates-chemical structure**. Available Source: <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates.html>, October 9, 2008.
- Zhang, Y.-q., B.-j. Xie and X. Gan. 2005. Advance in the applications of konjac glucomannan and its derivatives. **Carbohydr. Polym.** 60: 27-31.
- Zhou, Z., K. Robards, S. Helliwell and C. Blanchard. 2002. Review composition and functional properties of rice. **Int. J. Food Sci. Technol.** 37: 849-868.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของสตาร์ชข้าวและคอนยัคกลูโคแมนแนน

1. 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 เดซิกเคเตอร์ (desiccator)

1.2 วิธีการวิเคราะห์

อบภาชนะใส่ตัวอย่างพร้อมฝา ในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาใส่ในเดซิกเคเตอร์ทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

ชั่งตัวอย่างในภาชนะใส่ตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2-3 กรัม นำไปใส่ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยเปิดฝาภาชนะไว้ เมื่อครบเวลาแล้วนำออกจากตู้อบ ปิดฝาภาชนะและนำมาใส่ในเดซิกเคเตอร์ทันที ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง (ปกติ 45-60 นาที) แล้วจึงนำไปชั่ง คำนวณปริมาณความชื้นจากน้ำหนักที่หายไป โดยที่ A เป็น น้ำหนักที่หายไป (กรัม) และ B เป็นน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

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

2. การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (apparent amylose) (Juliano, 1971)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1.1 ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

2.1.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, Thermo Electron Corporation รุ่น GENESYS™10, USA)

2.1.3 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

2.1.4 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

2.2 สารเคมี

2.2.1 เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) ความเข้มข้นร้อยละ 95

2.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 นอร์แมล เตรียมโดยชั่ง NaOH นหนัก 40 กรัม ละลายในน้ำกลั่นประมาณ 800 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร

2.2.3 กรดแอซิกกลั่น (glacial acetic acid) ความเข้มข้น 1 นอร์แมล เตรียมโดยตวงกรดแอซิกกลั่นปริมาตร 60 มิลลิลิตร ใส่ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1 ลิตร

2.2.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (pure potato amylose) ของ Sigma, USA

2.2.5 สารละลายไอโอดีน เตรียมโดยชั่งไอโอดีน (I_2) 0.2 กรัมและโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.0 กรัม ผสมสารทั้งสองเข้ากันแล้วละลายในน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ควรเก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา

2.3 วิธีการวิเคราะห์

2.3.1 ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1000 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ในขวด (flask) ขนาด 50 มิลลิลิตร

2.3.2 เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 1 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ เพื่อเกลี่ยสตาร์ชให้กระจายออก ระวังอย่าให้สตาร์ชขึ้นมากเกาะตามผนังขวด

2.3.3 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์แมลจำนวน 9 มิลลิลิตร

2.3.4 นำสารซัสเพนชันไปให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาทีแล้วทิ้งไว้ให้เย็น

2.3.5 ถ่ายสารซัสเพนชันลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตรและผสมให้เข้ากัน

2.3.6 ดูดสารซัสเพนชันปริมาตร 5 มิลลิลิตรลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

2.3.7 เติมกรดแอสติกความเข้มข้น 1 นอร์แมลจำนวน 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีนจำนวน 2 มิลลิลิตร

2.3.8 เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

2.3.9 ทำแบลงค์ (blank) โดยนำขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรมาเติมกรดแอสติกความเข้มข้น 1 นอร์แมล จำนวน 2 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตร

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

2.3.11 นำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าปริมาณแอมิโลสโดยนำไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน

2.4 การเขียนกราฟมาตรฐาน (standard curve)

2.4.1 ชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่งจำนวน 0.0400 กรัมใส่ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 2.3.2-2.3.4 แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ใช้เป็นสารละลายมาตรฐาน

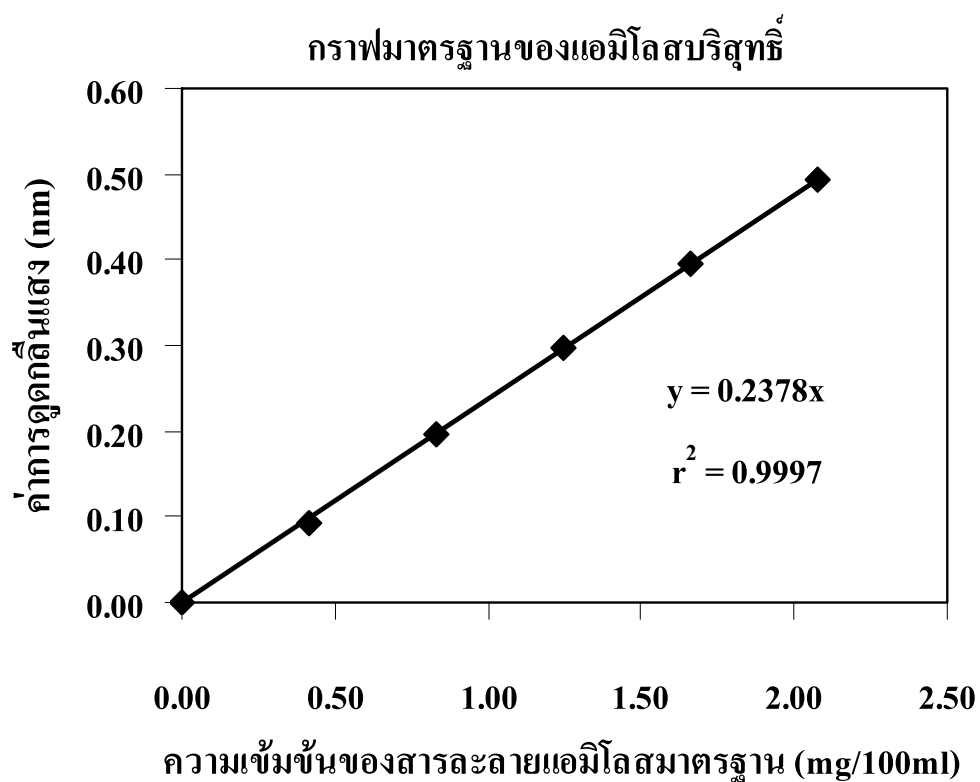
2.4.2 ปิ่เปิดสารละลายมาตรฐานปริมาตร 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตรใส่ในขวดกำหนดปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมกรดแอสติกความเข้มข้น 1 นอร์แมลปริมาณ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตรลงในขวดแก้วที่มีสารละลายมาตรฐานตามลำดับ เติมสารละลายไอโอดีน 2.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

2.4.3 วัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

2.4.4 เขียนกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายแอมิโลสมาตรฐาน (แกน x) และค่าการดูดกลืนแสง (แกน y)

2.5 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของปริมาณแอมิโลส} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่อ่านได้จากสารละลายแอมิโลสมาตรฐาน} \times 10}{5 \times \text{น้ำหนักสารแห้ง (กรัม)}} \times \frac{(\text{มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร})}{(\text{มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร})}$$



ภาพผนวกที่ ก1 ปริมาณแอมิโลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน

3. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (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 กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 95

3.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 35

3.2.3 สารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4

3.2.4 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์มัล

3.2.5 คอปเปอร์ซัลเฟต

3.2.6 โพแทสเซียมซัลเฟต

3.2.7 อินดิเคเตอร์สมระหว่างเมทิลเรดและโบรโมคริสซอลกรีน

3.3 วิธีการวิเคราะห์

3.3.1 ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนใส่ลงไปในหลอดย่อย ระวังอย่าให้ติดข้างหลอด

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

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

3.3.4 นำหลอดย่อยต่อเข้ากับชุดเครื่องกลั่น แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 35 จนสารละลายในหลอดย่อยเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

3.3.5 รองรับสิ่งกลั่นด้วยขวด (flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายกรดบอริกความเข้มข้นร้อยละ 4 จำนวน 25 มิลลิลิตร โดยกลั่นประมาณ 5 นาที

3.3.6 นำไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์แมล จนกระทั่งได้สารละลายสีเทา (จุดยุติ) บันทึกปริมาณกรดที่ใช้แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละของไนโตรเจน (ให้ทำแบบลบล้างค่าด้วย โดยไม่มีตัวอย่างในหลอดย่อย)

3.4 วิธีการคำนวณ

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

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

เมื่อ S หมายถึง ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง
 B หมายถึง ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับเบบล่งค์
 N หมายถึง ความเข้มข้นเป็นนอร์แมลของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน
 W หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม

4. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AACC, 2000) Method 30-25

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 4.1.1 เครื่องมือวิเคราะห์ไขมัน (Soxtec System HT2; 1045 Etraction unit)
- 4.1.2 เครื่องทำความเย็น
- 4.1.3 extraction cup
- 4.1.4 thimble
- 4.1.5 เดซิเคเตอร์ (desicator)

4.2 สารเคมี

ปิโตรเลียมอีเทอร์ที่มีจุดเดือดในช่วง 40- 60 องศาเซลเซียส

4.3 วิธีการวิเคราะห์

4.3.1 อป extraction cup และทิ้งให้เย็นในเคชิกเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักไว้ (W_1)

4.3.2 ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงบนกระดาษกรองและห่อให้มิดชิด บันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่แน่นอน (W_2) แล้วนำมาใส่ลงใน thimble

4.3.3 นำ thimble ใส่ใน extraction unit แล้วเติมปิโตรเลียมอีเทอร์ปริมาตร 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 ให้เย็นในเคชิกเคเตอร์ และนำไปชั่งน้ำหนัก (W_3)

4.4 วิธีการคำนวณ

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

เมื่อ W_1 หมายถึง น้ำหนัก extraction cup หน่วยเป็นกรัม

W_2 หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างที่วิเคราะห์ หน่วยเป็นกรัม

W_3 หมายถึง น้ำหนัก extraction cup และไขมันที่สกัดได้ หน่วยเป็นกรัม

5. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AACC, 2000) Method 08-01

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

5.1.1 เตา muffle furnace

5.1.2 เตาไฟฟ้าให้ความร้อนแบบแผ่นราบ

5.1.3 เป้า (crucible)

5.1.4 เชชชั่งเคเตอร์

5.2 วิธีการวิเคราะห์

5.2.1 เตาเผาในเตา muffle furnace ทิ้งไว้ให้เย็นเคชชั่งเคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก

5.2.2 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในเป้าแล้วนำไปเผาด้วยไฟอ่อน ๆ จนหมดควัน

5.2.3 นำไปเผาในเตา muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสจนกว่าได้เถ้าเป็นสีขาวหรือสีเทา

5.2.4 นำเป้าออกมาใส่ในเคชชั่งเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

5.3 วิธีการคำนวณ

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

เมื่อ W_0 หมายถึง น้ำหนักของเป้า หน่วยเป็นกรัม

W_1 หมายถึง น้ำหนักของเป้าและตัวอย่างก่อนเผา หน่วยเป็นกรัม

W_2 หมายถึง น้ำหนักของเป้าและตัวอย่างหลังจากเผาจนได้น้ำหนักคงที่ หน่วยเป็นกรัม

การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำตาลซูโครสและไซลิทอล

1. การหาปริมาณความชื้น (AOAC, 2000) Method 925.45A

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1.1 ตู้อบลมร้อน (hot air oven)

1.1.2 ตู้อบแห้งสุญญากาศ (vacuum oven)

1.1.3 ภาชนะใส่ตัวอย่าง (moisture can) ทำด้วยอลูมิเนียม

1.1.4 เดซิเคเตอร์ (desiccator)

1.2 วิธีการวิเคราะห์

อบภาชนะใส่ตัวอย่างพร้อมฝา ในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำมาใส่ในเดซิเคเตอร์ทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

ชั่งตัวอย่างในภาชนะใส่ตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2 กรัม นำไปใส่ในตู้อบแห้งสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะความดันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 มิลลิเมตรปรอท เป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยเปิดฝาภาชนะไว้ เมื่อครบเวลาแล้วนำออกจากตู้อบ ปิดฝาภาชนะและนำมาใส่ในเดซิเคเตอร์ทันที ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำไปชั่ง นำไปอบซ้ำอีกครั้งละ 1 ชั่วโมง จนได้น้ำหนักคงที่ เมื่อผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งได้ 2 ครั้งติดต่อกัน ต้องต่างกันไม่มากกว่า 2 มิลลิกรัม คำนวณปริมาณความชื้นจากน้ำหนักที่หายไป โดยที่ A เป็น น้ำหนักที่หายไป (กรัม) และ B เป็นน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

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

การวิเคราะห์สมบัติของสตาร์ชข้าว

1. การตรวจสอบรูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชข้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1.1 กล้องจุลทรรศน์ต่อกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์

1.1.2 Stage micrometer

1.2 วิธีการตรวจสอบ

1.2.1 เตรียมสไลด์ตัวอย่างสตาร์ชข้าวโดยเตรียมสตาร์ชข้าวซัสเพนชันความเข้มข้นร้อยละ 8 แล้วหยดสตาร์ชข้าวซัสเพนชันลงบนแผ่นสไลด์แล้วปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ จากนั้นนำไปตรวจสอบรูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชข้าวด้วยกำลังขยาย 100 เท่า

1.2.2 วัดขนาดของเม็ดสตาร์ชจากภาพในจอคอมพิวเตอร์จำนวน 100 เม็ด แล้วหาขนาดของเม็ดสตาร์ชโดยนำ stage microscope (stage microscope มีเส้นตรงความยาว 1 มิลลิเมตร แบ่งสเกลออกเป็น 100 ส่วน แต่ละส่วนจึงมีความยาว 0.01 มิลลิเมตร) มาวางแทนที่สไลด์ตัวอย่าง (กำลังขยายเดิม) แล้ววัดขนาดของส่วนย่อย 1 ส่วนว่ามีขนาดเท่าใด โดยจากกำลังขยาย 100 เท่า วัดได้ 1 ส่วนย่อยมีขนาด 2.8 เซนติเมตร ดังนั้นถ้าเม็ดสตาร์ชวัดจากภาพขนาด 1.9 เซนติเมตร แสดงว่ามีขนาดจริงเท่ากับ $(1.9 \times 0.01/2.8) \times 1000$ มีหน่วยเป็นไมครอน

2. การตรวจสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืด (AACC, 2000)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

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

2.2 วิธีการวิเคราะห์

2.2.1 ตัวอย่างสตาร์ชข้าวที่ใช้วิเคราะห์ต้องผ่านการบดจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าหรือเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร แล้วจึงนำไปหาความชื้นตามวิธี AACC (2000) ก่อนการวิเคราะห์

2.2.2 ชั่งสตาร์ชข้าวจำนวน 3 กรัม ใส่ลงในอุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก และตวงน้ำปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร (± 0.1 มิลลิลิตร) ใส่ในถ้วยทรงกระบอก (คำนวณที่ความชื้นร้อยละ 12) แต่ถ้าตัวอย่างสตาร์ชมีความชื้นไม่เท่ากับร้อยละ 12 สามารถคำนวณปริมาณน้ำและสตาร์ชที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามสูตร

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

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

$$\begin{aligned} \text{โดย} \quad S &= \text{น้ำหนักตัวอย่างที่ปรับค่าแล้ว} \\ W &= \text{น้ำหนักน้ำที่ปรับค่าแล้ว} \\ M &= \text{ปริมาณความชื้นที่แท้จริงของตัวอย่าง (ร้อยละ)} \end{aligned}$$

หมายเหตุ สตาร์ชข้าวที่ใช้มีความชื้นร้อยละ 11.64 ดังนั้นจะต้องชั่งสตาร์ชข้าว 2.99 กรัม ในน้ำ 25.01 กรัม)

2.2.3 ใส่สตาร์ชลงบนผิวหน้าของน้ำในถ้วยทรงกระบอก ใช้ใบพายเขย่าตัวอย่างในถ้วยทรงกระบอกขึ้นลง 10 ครั้ง แต่ถ้าสตาร์ชยังคงอยู่บนผิวหน้าหรือติดบนใบพาย ให้เขย่าตัวอย่างซ้ำอีกครั้ง

2.2.4 ใส่ใบพายในถ้วยทรงกระบอก และสวมใบพายเข้ากับที่ชั่งโดยให้ใบพายอยู่กึ่งกลางถ้วย แล้วเริ่มต้นการวิเคราะห์โดยกดมอเตอร์ของเครื่องมือลง และมีสิ่งที่ต้องระวังคืออย่าผสมสตาร์ชกับน้ำนานกว่า 1 นาทีก่อนการวิเคราะห์ โดยสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาดังนี้

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

หมายเหตุ ความเร็วรอบเริ่มต้นที่ใช้ คือ 960 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 160 รอบต่อนาทีจนถึงที่ตลอดการทดสอบ

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

ภาคผนวก ข

ข้อมูลประกอบผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ข1 สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมระบบเจลสตาร์ชผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครส หรือไซลิทอล)

ตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าว	สตาร์ชข้าว (กรัม)	ปริมาณน้ำตาล (กรัม)	น้ำกลั่น (กรัม)	ทั้งระบบ (กรัม)
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8	80	-	920	1,000.00
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10	80	111.11	920	1,111.11
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10	80	111.11	920	1,111.11
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20	80	250.00	920	1,250.00
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 20	80	250.00	920	1,250.00

หมายเหตุ ปริมาณของสตาร์ชข้าวและน้ำตาลที่แสดงในตารางนี้เป็นน้ำหนักแห้ง

ตารางผนวกที่ ข2 สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมระบบเจลสตาร์ช, เจลสตาร์ชผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครสหรือไซลิทอล) เจลสตาร์ชผสมคอนยัคกลูโคแมนแนน และ เจลสตาร์ชผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนกับน้ำตาลชนิดต่าง ๆ

ตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าว	สตาร์ชข้าว (กรัม)	คอนยัคกลูโค- แมนแนน (กรัม)	ปริมาณ น้ำตาล (กรัม)	น้ำกลั่น (กรัม)	ทั้งระบบ (กรัม)
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8	80	-	-	920	1,000.00
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10	80	-	111.11	920	1,111.11
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10	80	-	111.11	920	1,111.11
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + คอนยัคกลูโคแมนแนนความ เข้มข้นร้อยละ 0.5	75	5	-	920	1,000.00
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + คอนยัคกลูโคแมนแนนความ เข้มข้นร้อยละ 0.5 + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10	75	5	111.11	920	1,111.11
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + คอนยัคกลูโคแมนแนนความ เข้มข้นร้อยละ 0.5 + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10	75	5	111.11	920	1,111.11

หมายเหตุ ปริมาณของสตาร์ชข้าว คอนยัคกลูโคแมนแนนและน้ำตาลที่แสดงในตารางนี้เป็น
น้ำหนักแห้ง

ตารางผนวกที่ ข3 สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมระบบเจลสตาร์ชผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครส หรือ ไซลิทอล) เพื่อศึกษาผลของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของระบบสตาร์ชข้าว

ตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าว	สตาร์ชข้าว (กรัม)	ปริมาณน้ำตาล (กรัม)	น้ำกลั่น (กรัม)	ทั้งระบบ (กรัม)
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8	2.24	-	25.76	28.00
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10	2.24	3.11	25.76	31.11
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10	2.24	3.11	25.76	31.11
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20	2.24	7.00	25.76	35.00
สตาร์ชข้าวความเข้มข้นร้อยละ 8 + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 20	2.24	7.00	25.76	35.00

หมายเหตุ ปริมาณของสตาร์ชข้าวและน้ำตาลที่แสดงในตารางนี้เป็นน้ำหนักแห้ง

ตารางผนวกที่ ๖4 ค่าร้อยละการแยกของของเหลวจากการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ ของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครสหรือไซลิทอล)

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละการแยกของของเหลว				
	จำนวนรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็ง				
	1	2	3	4	5
สตาร์ชข้าว	55.02 ^{aBC} ± 0.57	57.25 ^{aA} ± 0.39	55.41 ^{aB} ± 0.41	55.62 ^{aB} ± 0.39	54.54 ^{aC} ± 0.27
สตาร์ชข้าว + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10	14.84 ^{cC} ± 2.16	25.37 ^{bB} ± 1.53	28.34 ^{bAB} ± 2.70	31.05 ^{bcAB} ± 6.28	34.47 ^{cA} ± 5.25
สตาร์ชข้าว + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10	22.36 ^{bC} ± 1.43	26.64 ^{bBC} ± 4.63	30.78 ^{bB} ± 5.51	31.49 ^{bB} ± 2.58	40.99 ^{bA} ± 1.31
สตาร์ชข้าว + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20	1.25 ^{dE} ± 0.36	4.64 ^{cD} ± 1.20	25.20 ^{bC} ± 2.54	28.57 ^{bB} ± 1.41	32.54 ^{cdA} ± 1.80
สตาร์ชข้าว + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 20	1.69 ^{dC} ± 0.26	5.81 ^{cC} ± 0.11	25.78 ^{bB} ± 3.75	28.88 ^{bAB} ± 3.99	32.22 ^{cdA} ± 2.67

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ข5 ค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวกับเจลสตาร์ชข้าวผสมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ (ซูโครสหรือไซลิทอล)

ตัวอย่าง	ค่าความแข็งของเจล (นิวตัน)			
	จำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็ง			
	เจลสด	1	3	5
สตาร์ชข้าว	0.390 ^{aA} ± 0.115	8.728 ^{dB} ± 0.366	9.304 ^{cC} ± 0.246	9.178 ^{cC} ± 0.401
สตาร์ชข้าว + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10	0.220 ^{aA} ± 0.011	5.957 ^{bB} ± 0.185	5.755 ^{bB} ± 0.675	6.051 ^{bB} ± 0.524
สตาร์ชข้าว + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 10	0.346 ^{aA} ± 0.066	12.133 ^{cB} ± 0.593	11.958 ^{dB} ± 1.023	11.391 ^{cB} ± 0.324
สตาร์ชข้าว + ซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 20	1.172 ^{bA} ± 0.193	3.378 ^{aB} ± 0.347	4.163 ^{aC} ± 0.817	4.650 ^{aC} ± 0.536
สตาร์ชข้าว + ไซลิทอลความเข้มข้นร้อยละ 20	2.764 ^{bA} ± 0.515	8.070 ^{cB} ± 0.611	9.288 ^{cC} ± 0.988	10.365 ^{dD} ± 0.369

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางผนวกที่ ๖ ค่าร้อยละการแยกของของเหลวของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละการแยกของของเหลว			
	ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)			
	0	7	21	45
สตาร์ชข้าว	58.12 ^{gA} ± 0.63	59.38 ^{gA} ± 0.22	59.01 ^{hA} ± 1.06	59.11 ^{fA} ± 1.71
สตาร์ชข้าว + ซูโครสร้อยละ 10	24.36 ^{eA} ± 0.72	24.16 ^{eA} ± 2.09	24.47 ^{eA} ± 0.82	25.65 ^{dA} ± 0.39
สตาร์ชข้าว + ไซลิตอลร้อยละ 10	28.31 ^{fA} ± 1.63	28.19 ^{fA} ± 0.57	28.88 ^{gAB} ± 0.89	30.63 ^{cB} ± 0.94
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5	25.45 ^{eA} ± 1.98	25.62 ^{eA} ± 1.16	25.82 ^{fA} ± 1.12	25.93 ^{dA} ± 1.20
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 + ซูโครสร้อยละ 10	0.50 ^{aA} ± 0.06	0.51 ^{abA} ± 0.12	0.54 ^{aA} ± 0.11	0.54 ^{aA} ± 0.12
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 + ไซลิตอลร้อยละ 10	2.61 ^{bA} ± 0.19	2.59 ^{bcA} ± 0.18	2.62 ^{bA} ± 0.28	2.68 ^{bA} ± 0.30
สตาร์ชข้าว	22.47 ^{dA} ± 0.98	23.57 ^{eA} ± 2.76	22.95 ^{dA} ± 0.21	22.25 ^{cA} ± 0.20
สตาร์ชข้าว + ซูโครสร้อยละ 10	3.65 ^{bA} ± 0.39	3.94 ^{cA} ± 0.14	3.51 ^{bA} ± 0.40	3.67 ^{bA} ± 0.58
สตาร์ชข้าว + ไซลิตอลร้อยละ 10	6.49 ^{cA} ± 0.72	19.42 ^{dB} ± 2.06	19.99 ^{cB} ± 0.43	21.24 ^{cB} ± 0.53
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5	0.41 ^{aA} ± 0.01	0.41 ^{abA} ± 0.01	0.41 ^{aA} ± 0.01	0.40 ^{aA} ± 0.01
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 + ซูโครสร้อยละ 10	0.10 ^{aA} ± 0.00	0.10 ^{aA} ± 0.00	0.27 ^{ab} ± 0.05	0.28 ^{ab} ± 0.06
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 + ไซลิตอลร้อยละ 10	0.20 ^{aA} ± 0.01	0.41 ^{abA} ± 0.01	0.96 ^{ab} ± 0.11	1.03 ^{ab} ± 0.22

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

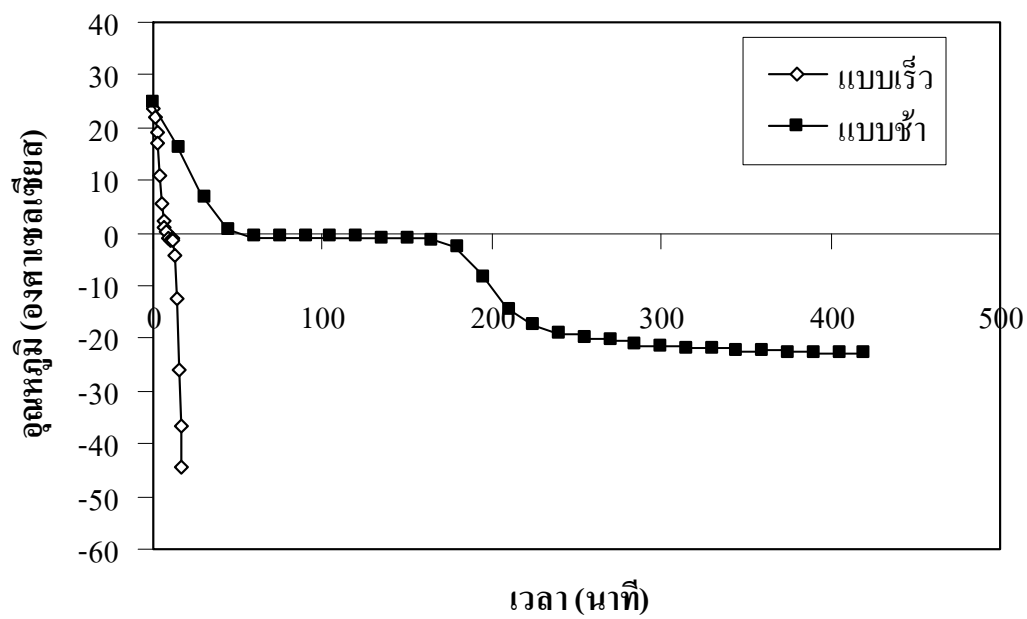
ตารางผนวกที่ ๗ ค่าความแข็งแรงของเจลสตาร์ชที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็ว

ตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงของเจล (นิวตัน)				
	ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)				
	เจลสด	0	7	21	45
สตาร์ชข้าว	0.390 ^{bA} ± 0.115	6.239 ^{gB} ± 0.392	6.538 ^{gB} ± 0.305	6.639 ^{gB} ± 0.316	6.546 ^{dB} ± 0.579
สตาร์ชข้าว + ชูโครสรี้อยละ 10	0.220 ^{aA} ± 0.011	3.956 ^{eBC} ± 0.307	3.696 ^{eB} ± 0.623	4.295 ^{dC} ± 0.116	4.585 ^{cD} ± 0.318
สตาร์ชข้าว + ไชลิทอลร้อยละ 10	0.346 ^{bA} ± 0.066	8.176 ^{hB} ± 0.684	10.977 ^{iC} ± 0.853	12.086 ^{jD} ± 0.173	11.986 ^{gD} ± 0.425
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5	0.361 ^{bA} ± 0.034	3.976 ^{eB} ± 0.375	4.929 ^{eC} ± 0.145	5.228 ^{fC} ± 0.124	4.934 ^{cC} ± 0.341
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 + ชูโครสรี้อยละ 10	0.164 ^{aA} ± 0.022	1.144 ^{bB} ± 0.183	2.512 ^{bC} ± 0.214	2.935 ^{bD} ± 0.069	3.012 ^{aD} ± 0.105
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 + ไชลิทอลร้อยละ 10	0.199 ^{aA} ± 0.021	6.304 ^{gB} ± 0.259	7.495 ^{hC} ± 0.181	8.222 ^{iD} ± 0.219	8.294 ^{fD} ± 0.122
สตาร์ชข้าว	0.390 ^{bA} ± 0.115	4.525 ^{fBC} ± 0.249	4.354 ^{dB} ± 0.287	4.735 ^{eC} ± 0.115	4.785 ^{cC} ± 0.105
สตาร์ชข้าว + ชูโครสรี้อยละ 10	0.220 ^{aA} ± 0.011	3.222 ^{cB} ± 0.072	3.237 ^{cB} ± 0.149	3.502 ^{cC} ± 0.056	3.708 ^{bD} ± 0.154
สตาร์ชข้าว + ไชลิทอลร้อยละ 10	0.346 ^{bA} ± 0.066	3.395 ^{cdB} ± 0.150	5.493 ^{fC} ± 0.327	7.163 ^{hD} ± 0.134	7.277 ^{eD} ± 0.078
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5	0.361 ^{bA} ± 0.034	3.351 ^{cdB} ± 0.173	3.491 ^{eBC} ± 0.111	3.634 ^{cC} ± 0.237	3.896 ^{bD} ± 0.111
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 + ชูโครสรี้อยละ 10	0.164 ^{aA} ± 0.022	0.571 ^{aB} ± 0.068	0.720 ^{aB} ± 0.101	2.676 ^{aC} ± 0.021	2.693 ^{aC} ± 0.221
สตาร์ชข้าว + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.5 + ไชลิทอลร้อยละ 10	0.199 ^{aA} ± 0.021	3.643 ^{deB} ± 0.164	5.411 ^{efC} ± 0.487	7.059 ^{hD} ± 0.247	7.131 ^{eD} ± 0.314

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรเล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ค่าเฉลี่ยตามด้วยตัวอักษรใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



ภาพผนวกที่ ข1 แผนภาพการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและแบบเร็วของ
เจลสตาร์ช

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายธันยบูรณ์ อรัญนารถ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 15 มีนาคม 2526
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมี) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (พ.ศ. 2547)
ผลงานทางวิชาการ	1. Arunyanart T. and S. Charoenrein 2008. Effect of sucrose on the freeze-thaw stability of rice starch gels: Correlation with microstructure and freezable water. Carbohydrate Polymers. 74: 524-518. 2. Arunyanart T. and S. Charoenrein 2008. Effects of sucrose, xylitol and konjac glucomannan on stability of frozen rice starch gels. The 34 th Congress of Science and Technology Thailand (STT 34), October 31- November 2, 2008, Bangkok, Thailand. (Oral presentation) 3. Arunyanart T. and S. Charoenrein 2007. Effect of sucrose on freeze-thaw stability and morphology of rice starch gels. Starch Update 2007: The 4 th Conference on Starch Technology, November 6-7, 2007, Bangkok, Thailand. (Poster presentation) 4. Arunyanart T. and S. Charoenrein 2007. Granular/Pasting property relations of rice starch-sugar-water suspensions. The 10 th International Symposium on the Properties of Water, September 2-7, 2007, Bangkok, Thailand. (Poster presentation)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	- โครงการทุนวิจัยมหบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2549 - ทุนผู้ช่วยสอนจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2549)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน (ต่อ)

ประสบการณ์งานวิจัย

- ผู้ช่วยวิจัยโครงการการลดความเปลี่ยนแปลงของสสารจาก
การแช่เยือกแข็งเจลดาร์ช (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)
- ผู้ช่วยวิจัยโครงการการพัฒนาโครงสร้างในเจลดาร์ชช่วยให้
ทนต่อการแช่เยือกแข็งและทำลายโดยการเติมพอลิแซคคา-
ไรด์ของไทย (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย)