



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตรการอาหาร

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวและการคืนรูปจากเยือกแข็งต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส
ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หงสุก

Effect of Rice Aging and Freeze-Thaw Cycle on Textural Properties of Cooked Rice
(*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105

นามผู้วิจัย นางสาวรรชนี เกตุคง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์อรอนงค์ นัยวิกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรรณี จิรภาคย์กุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงห์สีเงิน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวและการคั่วจากเยือกแข็ง
ต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุก

Effect of Rice Aging and Freeze-Thaw Cycle on Textural Properties
of Cooked Rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105

โดย

นางสาววรรณิ์ เกตุคง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วรรณิณี เกตุคง 2556: ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวและการคั้นรูปจากเยือกแข็งต่อคุณภาพ
ด้านเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุก ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์
การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D. 116 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาเก็บรักษาข้าวและการคั้นรูปจากเยือกแข็ง
ต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก โดยงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ใช้ข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105
ที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 ระดับ ในช่วง 0-12 เดือนเป็นวัตถุดิบ การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาผลของระยะเวลา
การเก็บรักษาข้าวต่อสมบัติทางเคมีและเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งข้าวพบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวไม่มีผลต่อ
การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมิโลส ส่วนสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวพบว่า ความหนืดสูงสุด
และความหนืดลดลงมีค่าลดลงเมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษามากขึ้น นอกจากนี้พบว่า อุณหภูมิและพลังงาน
ที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชันของแป้งข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวที่มากขึ้น การทดลอง
ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง นำตัวอย่าง
ข้าวมาหุงสุก แช่เยือกแข็งและคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ ลักษณะเนื้อสัมผัสจากเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส
และการประเมินทางประสาทสัมผัสพบว่า ก่อนการแช่เยือกแข็งข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12
เดือนมีความแข็งมากกว่าและความเหนียวน้อยกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ
0.7 เดือน ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า ค่าความแข็งของข้าวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่วนความเหนียวของข้าว
มีแนวโน้มลดลงเมื่อข้าวหุงสุกผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง ภาพโครงสร้างของข้าวหุงสุกจากกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่า ก่อนการแช่เยือกแข็งข้าวหุงสุกมีลักษณะผิวที่เรียบ อย่างไรก็ตาม
หลังผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบบริเวณผิวของข้าวหุงสุกมีลักษณะขรุขระ โดยเฉพาะข้าวหุงสุก
จากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีลักษณะผิวที่ขรุขระมากกว่าตัวอย่างอื่น นอกจากนี้ยังพบว่า
ค่าพลังงานของการสลายผลึกแอมิโลเพกทินรีโทรเกรดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวมากขึ้น
และเมื่อข้าวหุงสุกผ่านรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาผลของระยะเวลาการ
เก็บรักษาข้าวต่อความคงตัวในการคั้นรูปจากเยือกแข็งของเจลแป้งข้าวพบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าว
และการคั้นรูปจากเยือกแข็งมีผลต่อร้อยละการแยกตัวของน้ำและค่าความแข็งของเจลแป้งข้าวโดยเฉพาะอย่างยิ่ง
หลังผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 นอกจากนี้พบว่า ทุกตัวอย่างมีค่าพลังงานในการสลายสารประกอบ
เชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันเพิ่มขึ้นหลังตัวอย่างผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ ภาพจาก SEM แสดง
ให้เห็นว่าเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ล้อมรอบด้วยส่วนของ
เมทริกซ์ที่หนามากกว่าเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน จากการทดลองแสดง
ให้เห็นว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวเป็นสาเหตุให้ข้าวหุงสุกมีความแข็งมากขึ้น นอกจากนั้นการคั้นรูปจาก
เยือกแข็งยังมีอิทธิพลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งและเจลแป้งข้าวแช่เยือกแข็ง

Wattinee Katekhong 2013: Effect of Rice Aging and Freeze-Thaw Cycle on Textural Properties of Cooked Rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Associate Professor Sanguansri Charoenrein, Ph.D. 116 pages.

The objective of this study was to study the effect of rice aging and freeze-thaw cycle on textural properties of cooked rice. This research was divided into three parts. Milled rice cultivar Khao Dawk Mali 105 which was aged for three different time periods, ranging from 0-12 months were used in this study. The first part, the chemical and physicochemical properties of rice flour we studied. The results showed no significant effect of aging rice on apparent amylose content of rice flour. The pasting properties of the milled rice flour showed a significant decrease in peak viscosity and breakdown after being aged. Moreover, the gelatinization temperature and gelatinization enthalpy of rice flour were increased with longer rice aging time. The second part of this study investigated the effect of rice aging on textural properties of frozen cooked rice. The frozen cooked rice was freeze-thawed up to 5 cycles. For the textural properties and sensory evaluation, the fresh cooked rice from rice aged for 12 months had higher hardness and lower stickiness than rice aged for 3 and 0.7 months, respectively. In addition, the freeze-thawed cooked rice had a tendency to increase hardness and decrease stickiness with subsequent freeze-thaw cycles. From a scanning electron micrograph, the surface of the cooked rice before freezing exhibited a smooth surface; however, after 5 freeze-thaw cycles the surface of the cooked rice became rough, in particular cooked rice from rice aged for 12 months. Moreover, an enthalpy of melting retrograded amylopectin increased with progressive aging time and a number of freeze-thaw cycles. The third part of this study investigated the effect of rice aging on freeze-thaw stability of rice flour gels. The result showed that aging of the milled rice and repeated freeze-thaw cycles affected the percent syneresis and hardness of the rice flour gels, in particular after the fifth freeze-thaw cycle. Furthermore, all samples showed an increase in enthalpy of a melting amylose-lipid complex after 5 freeze-thaw cycles. From the scanning electron micrograph, flour gels from rice aged for 12 months had large pores and the matrix surrounding the pores were thicker than flour gels made from rice aged for 3 and 0.7 months. These results demonstrate that aging of milled rice causes an increase in hardness of cooked rice. Moreover, repeated freeze-thaw cycles influence the textural properties of frozen cooked rice and frozen rice flour gels.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สงวนศรี เจริญเหรียญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น แนวทางในการแก้ปัญหา ความเอาใจใส่ ความเมตตา และฝึกฝนให้มีประสบการณ์ไม่ใช่ว่าแต่ด้านการเรียน แต่รวมถึงประสบการณ์อื่นๆ ที่เป็นประโยชน์ในการใช้ชีวิต ตลอดจนตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัชชัย จิตตานิษฐ์ ประธานควบคุมการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณิ สงวนดีกุล ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำเพิ่มเติม และช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่เมตตาอบรมสั่งสอนให้ข้าพเจ้ามีความรู้มาจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ) และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) ที่กรุณามอบทุนอุดหนุนวิจัยเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ ขอขอบคุณบริษัท บางกอกอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด ที่สนับสนุนในโตรเจนสำหรับการแช่เยือกแข็ง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และการช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องนิสิตปริญญาโท และเอก สาขาวิทยาศาสตร์การอาหารทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดช่วงระยะเวลาของการศึกษาและทำวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ที่ให้การอบรมสั่งสอนเลี้ยงดู รวมถึงให้การศึกษาดังแต่ยังเยาว์วัย จนมีโอกาสดำเนินการศึกษาต่อระดับปริญญาโท ตลอดจนกำลังใจที่ดีที่มีให้มาโดยตลอด รวมถึงผู้มีพระคุณที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ทุกท่าน สำหรับกำลังใจที่ดี และความช่วยเหลือเสมอมา

วรรณิ เกตุคง

มกราคม 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	34
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	77
สรุป	77
ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	79
ภาคผนวก	92
ภาคผนวก ก การตรวจสอบคุณภาพทางเคมี	93
ภาคผนวก ข การตรวจสอบคุณภาพทางเคมีเชิงฟิสิกส์	102
ภาคผนวก ค ตัวอย่างอ้างอิงและแบบทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส	106
ภาคผนวก ง ภาพผลการทดลอง	110
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	115

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 การเปลี่ยนแปลงของข้าวระหว่างการเก็บรักษา	17
2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ	42
3 ค่าความหนืดของแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว	45
4 การเกิดเจลในเซชันของแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ	49
5 ร้อยละปริมาณความชื้นของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง และหลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ	52
6 ค่าความแข็ง (นิวตัน) ของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง และหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ	55
7 ค่าความเหนียว (นิวตัน) ของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง และหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ	56
8 การประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ ด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง และหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-3 รอบ	58
9 การประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของข้าวหุงสุก ก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-3 รอบ	59
10 การเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง และหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบ	66
11 ร้อยละการแยกตัวของน้ำของเจลแป้งข้าวหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 ถึง 5 รอบ	70
12 ค่าความแข็ง (นิวตัน) ของเจลแป้งข้าวก่อนการแช่เยือกแข็ง และหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบ	71
13 การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งข้าวหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 และ 5 รอบ	76

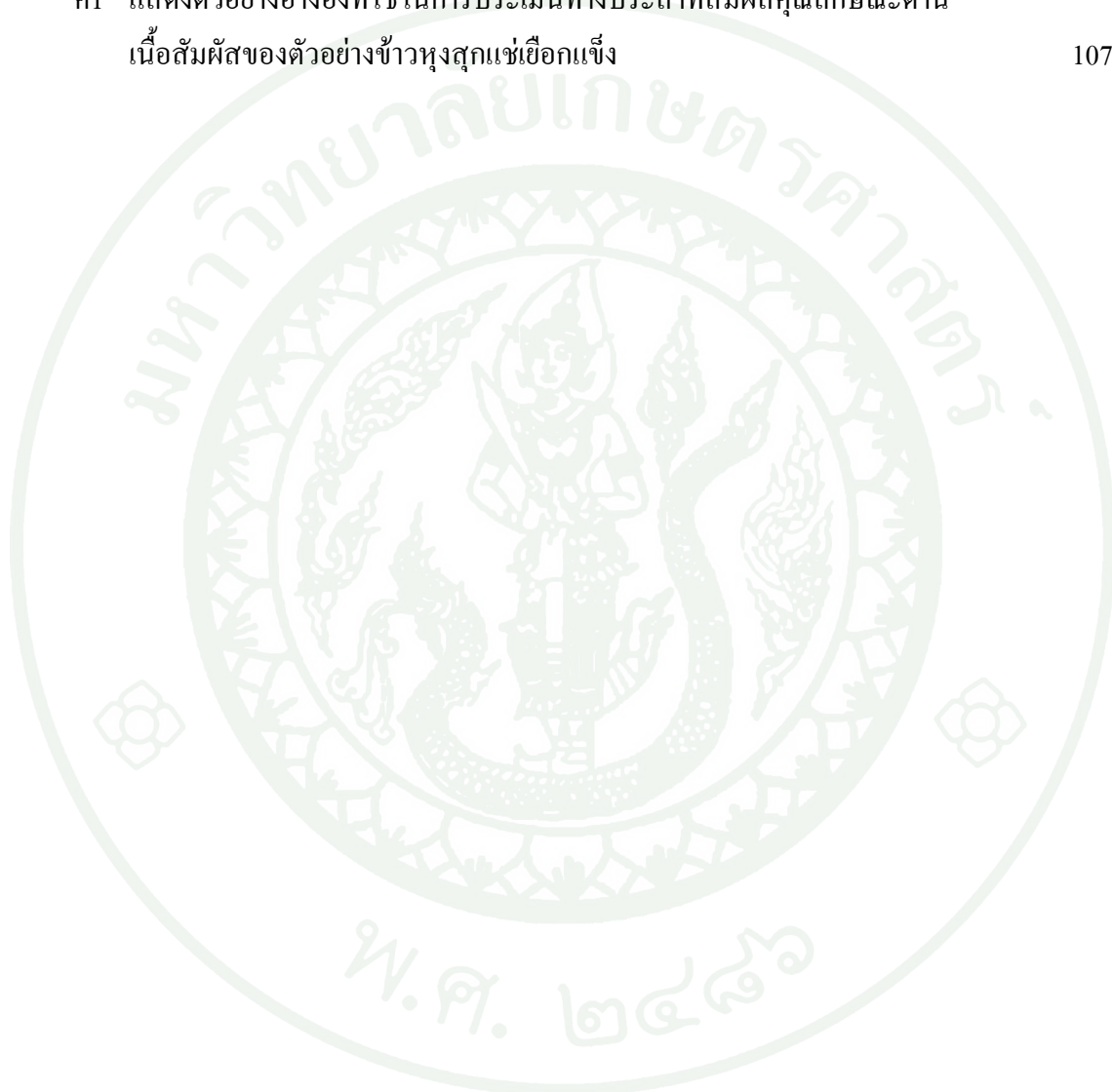
สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่

หน้า

- ค1 แสดงตัวอย่างอ้างอิงที่ใช้ในการประเมินทางประสาทสัมผัสคุณลักษณะด้าน
เนื้อสัมผัสของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง

107



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว	5
2 ภาพจำลองการจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ภายในโมเลกุลของสตาร์ช	8
3 โครงสร้างของแอมิโลส	9
4 โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน	10
5 โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช	11
6 ภาพจำลองการจัดตัวของแอมิโลสและไขมัน	12
7 การเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ช	13
8 การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (A คือ แอมิโลส, AP คือ แอมิโลเพกทิน)	14
9 แผนภาพกระบวนการแช่เยือกแข็ง	19
10 โครงสร้างแบบฟองน้ำของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่เกิดขึ้น ในระหว่างการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษา	21
11 ลักษณะเมล็ดของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ ก่อน (ก ข และ ค) และหลังแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1.7 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 23 ชั่วโมง (ง จ และ ฉ)	43
12 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวจากข้าว ที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ	44
13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใจกลางของข้าวหุงสุก จากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ ขณะที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิก	51
14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะ เนื้อสัมผัส และคะแนนความแข็งจากการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบ เชิงพรรณนา	61
15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะ เนื้อสัมผัส และคะแนนความเหนียวจากการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบ เชิงพรรณนา	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
16	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง (ก-ค) หลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบ (ง-ฉ) และ 5 รอบ (ช-ญ) ของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือน 3 เดือน และ 12 เดือน ตามลำดับ (กำลังขยาย 35 เท่า, สเกล = 500 ไมโครเมตร)	63
17	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใจกลางของเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ ขณะที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง	67
18	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างเจลแป้งข้าวก่อนการแช่เยือกแข็ง (ก-ค) และหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ (ง-ฉ) ของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือน 3 เดือน และ 12 เดือน ตามลำดับ (กำลังขยาย 250 เท่า, สเกล = 100 ไมโครเมตร)	73
ภาพผนวกที่		
ก1	ปริมาณแอมิโลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแอมิโลสที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร	100
ข1	ลักษณะเส้นความหนืดที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว	105
ง1	กราฟการดูดกลืนความร้อนในการเกิดเจลาคิโนเซชันของแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ	111
ง2	กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายผลึกแอมิโลเพกทินรีโทรเกรดของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ ก่อนการแช่เยือกแข็ง	111
ง3	กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายผลึกแอมิโลเพกทินรีโทรเกรดของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ หลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบ	112
ง4	กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายผลึกแอมิโลเพกทินรีโทรเกรดของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ หลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 3 รอบ	112

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง5 กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายผลิตภัณฑ์เอมิโลเพกทินรีโทรเกรดของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ หลังผ่านการคั่วจากเยือกแข็ง 5 รอบ	113
ง6 กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของเอมิโลสและไขมันของเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ หลังผ่านการคั่วจากเยือกแข็ง 1 รอบ	113
ง7 กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของเอมิโลสและไขมันของเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ หลังผ่านการคั่วจากเยือกแข็ง 5 รอบ	114

**ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวและการคั้นรูปจากเยือกแข็ง
ต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุก**

**Effect of Rice Aging and Freeze-Thaw Cycle on Textural Properties
of Cooked Rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105**

คำนำ

ประเทศไทยได้ชื่อว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม โดยมีข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศและถือเป็นอาหารหลักประจำชาติ ประเทศไทยสามารถผลิตข้าวได้ปีละประมาณ 28.0 – 34.0 ล้านตันข้าวเปลือก คิดเป็นมูลค่าปีละประมาณ 180,000 - 200,000 ล้านบาท นอกจากข้าวจะใช้บริโภคภายในประเทศแล้ว ยังเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญสามารถสร้างรายได้และนำเงินตราเข้าประเทศปีละประมาณ 80,000 - 100,000 ล้านบาท (กรมการค้าภายใน, 2550)

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภค (ready to eat meals) กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในผู้บริโภคแทบทุกประเทศ เนื่องจากผู้บริโภคมีวิถีชีวิตที่เปลี่ยนแปลงไป มีความเร่งรีบ จึงมีความต้องการลดระยะเวลาและเพิ่มความสะดวกในการเตรียมอาหาร แต่ยังคงต้องการอาหารที่มีคุณค่าทางอาหาร คุณภาพและรสชาติที่ดี (อรอนงค์, 2550; Luh, 2001; Gormley, 2008) วิธีการยืดอายุผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ การแช่เยือกแข็ง เนื่องจากสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ทั้งในด้านคุณค่าทางอาหาร กลิ่น รส และสีได้เป็นอย่างดี (Kock *et al.*, 1995; Reid, 1998) ในอาหารพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็งมักมีข้าวทั้งที่อยู่ในรูปของข้าวทั้งเมล็ดหรือแบ่งข้าวเป็นองค์ประกอบหลัก อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งจำเป็นต้องมีการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำและคงที่ตลอดเวลา มิฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษาหรือการขนส่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อมสภาพไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Perdon *et al.*, 1999; Yu *et al.*, 2010; Charoenrein *et al.*, 2011; Phimolsiripol *et al.*, 2011)

การเก็บรักษาข้าวเป็นขั้นตอนระหว่างการเก็บเกี่ยวและการบริโภคข้าว มีนักวิจัยหลากหลายกลุ่มพบว่า สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาข้าว (Villareal *et al.*, 1976; Chrastil, 1990; Perdon *et al.*, 1997; Zhou *et al.*, 2003) โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างชัดเจนในข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษามากกว่า 3 เดือน (Perez and Juliano,

1981) และเกิดขึ้นได้ในข้าวเจ้ามากกว่าข้าวเหนียว (Villareal et al., 1976) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า การเก็บรักษาข้าวมีผลต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าว คือ ทำให้ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และความหนืดลดลง (breakdown) มีค่าลดลงเมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น (Noomhorm et al., 1997; Zhou et al. 2002, 2003; Tulyathan and Leecharatanaluk, 2007) อุณหภูมิ การเกิดเจลในเซชันและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชันของแป้งข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวที่มากขึ้น (Fan and Mark, 1999) ด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก พบว่า ข้าวเก่าหุงสุกมีค่าความแข็งมากกว่าและมีความเหนียวน้อยกว่าข้าวใหม่หุงสุก (Ohno and Ohisa, 2005; Tulyathan and Leecharatanaluk, 2007) อย่างไรก็ตามเมื่อนำข้าวเก่ามาสกัดเอาโปรตีน ออกบางส่วนพบว่า ความแข็งของข้าวหุงสุกลดลง แสดงให้เห็นว่าโปรตีนอาจมีอิทธิพลต่อสมบัติ ทางเคมีเชิงฟิสิกส์และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าว (Seleh and Meullenet, 2007) มีนักวิจัยหลายท่าน ได้ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลโปรตีนในระหว่างการเก็บรักษาข้าวพบว่า สายโมเลกุล โปรตีนออริซานินซึ่งเป็นโปรตีนหลักในข้าวเกิดการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ทำให้ โปรตีนออริซานินที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลต่อคุณลักษณะด้านความ หนืดของเมล็ดสาร (Zhou et al., 2002) และส่งผลให้ข้าวหุงสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งและมีความ เหนียวลดลง (Noomhorm et al., 1997)

อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานกล่าวถึงผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อคุณภาพของ ข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งและเจลแป้งข้าวแช่เยือกแข็ง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของ ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อคุณภาพของข้าวหุงสุกและเจลแป้งข้าวแช่เยือกแข็ง โดยเน้น การศึกษาด้านลักษณะเนื้อสัมผัส อีกทั้งศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคและการเกิดรีโทรเกรเดชัน ของข้าวหุงสุกและเจลแป้งข้าวเมื่อผ่านการคินรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ เพื่อสามารถใช้ในการ อธิบายผลการทดลองได้ดีขึ้น ผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ทำให้ทราบระยะเวลาการ เก็บรักษาข้าวที่เหมาะสมในการผลิตเป็นอาหารพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็งที่มีแป้งข้าวหรือข้าวทั้ง เมล็ดเป็นองค์ประกอบหลัก และเป็นแนวทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งพร้อม บริโภคให้มีคุณภาพดี ตรงตามความต้องการของผู้บริโภค ช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์และเพื่อให้ สามารถเป็นผลิตภัณฑ์ส่งออกสร้างรายได้ให้กับประเทศได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีและเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7, 3 และ 12 เดือน
2. เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส โครงสร้างระดับจุลภาค และการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง
3. เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อความคงตัวจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง โครงสร้างระดับจุลภาค และการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งข้าวแช่เยือกแข็ง

การตรวจเอกสาร

ข้าว

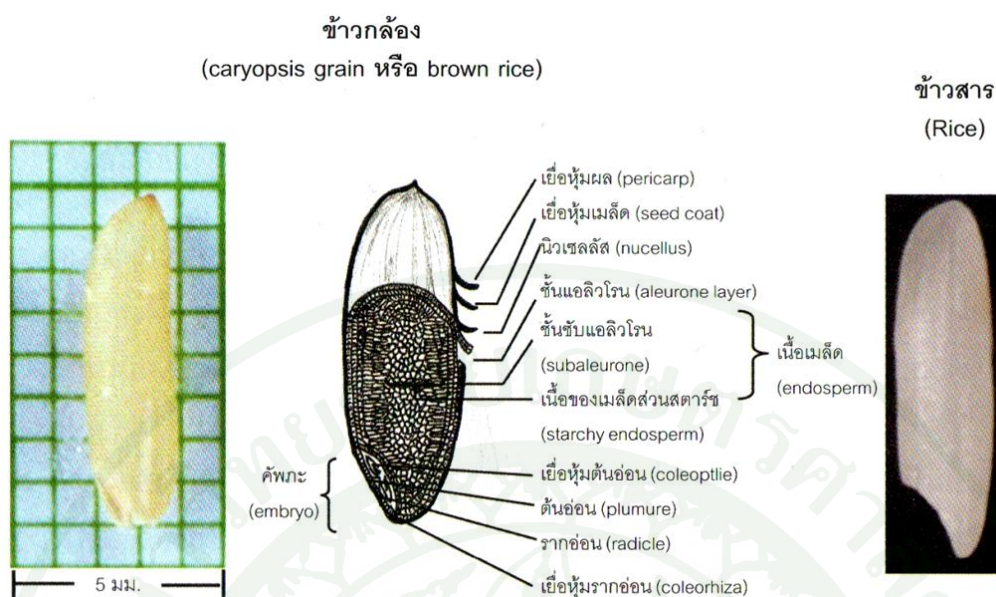
1. โครงสร้างของข้าว

อรอนงค์ (2550) ได้กล่าวไว้ว่า ข้าวเป็นคำที่ใช้เรียก เมล็ดข้าว (rice fruit, rice grain หรือ rice seed) ซึ่งทางพฤกษศาสตร์จะหมายถึง ผล (fruit) ที่มีลักษณะเป็นผลเดี่ยว (single fruit) เกิดจากรังไข่อันเดียวชนิดลอยตัว (superior ovary) ของดอกเดี่ยวในแต่ละดอกย่อยที่เกิดรวมกันอยู่เป็นช่อดอก ผลเดี่ยวนี้จะติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล (pericarp) ซึ่งเมื่อผลสุกหรือแก่จะเป็นผลแห้ง (dry fruit) ที่ไม่แตก (indehiscent fruit) เรียกว่า เมล็ด (caryopsis grain) ที่มีเยื่อหุ้มผล และเปลือกหุ้มเมล็ด (seed coat หรือ testa) เชื่อมรวมกันอย่างแนบแน่นโดยตลอดผลหรือเมล็ดข้าวจะมีลักษณะแตกต่างตามพันธุ์ในด้านขนาด รูปร่าง สี การมีหาง (awn) หรือไม่มีหาง และขน (pubescence) หรือไม่มีขนบนเปลือกแข็ง (hull หรือ husk) เมล็ดข้าว (ภาพที่ 1) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ (1) ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว (หรือผล) เรียกว่า แกลบ (hull หรือ husk) และ (2) ส่วนเนื้อผลหรือผลแท้ (true fruit หรือ caryopsis grain) หรือข้าวกล้อง (caryopsis หรือ brown rice) โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วน ดังนี้

1.1. แกลบ ประกอบด้วยเปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) ขน หาง ข้าวเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmas) ซึ่งเชื่อมต่อกับก้าน (pedicel)

1.1.1 เปลือกใหญ่ เป็นเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านท้อง (dorsal side) ที่มีขนาดใหญ่ อาจมีหางหรือไม่มีก็ได้ ลักษณะของเปลือกใหญ่จะเป็นรอยเส้น (nerves) ตามความยาวของเปลือกประมาณ 5 เส้น เปลือกใหญ่จะห่อหุ้มเปลือกเล็กไว้ทั้ง 2 ด้านในลักษณะขบอยู่ด้านบนอย่างแนบสนิท ประมาณ 2/3 ของเปลือกทั้งหมดตามแนวยาวของเมล็ด

1.1.2 เปลือกเล็ก เป็นเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านหลัง (ventral side) ที่มีขนาดเล็กกว่าเปลือกใหญ่ประมาณ 1/3 ของเปลือกทั้งหมด จะขบอยู่ใต้เปลือกใหญ่ตามแนวยาว ทำให้เปลือกทั้งสองติดกันสนิท บนผิวเปลือกเล็กจะเป็นรอยเส้นตามความยาวของเปลือกประมาณ 3 เส้น



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา: อรอนงค์ (2550)

1.1.3 ขน จะขึ้นบนเปลือกใหญ่ และเปลือกเล็กเป็นส่วนใหญ่ อาจมีบางพันธุ์ที่ไม่มี ขนแต่เป็นส่วนน้อย ขนนี้คือ ส่วนของเซลล์ผิวนอก (epidermal cell) ที่เจริญกลายเป็นขน เพื่อทำหน้าที่ลดการระเหยของน้ำ ป้องกันอันตรายของเมล็ดจากสภาวะภายนอกเมล็ด และเพื่อการกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติ

1.1.4 หาง เป็นส่วนปลายของเปลือกใหญ่ที่ยาวออกมาเกินตำแหน่งยอดดอก (apiculus) ในบางพันธุ์อาจสั้น หรือยาว หรือไม่มี ทำหน้าที่ในการกระจายพันธุ์คล้ายขน

1.1.5 ขั้วเมล็ด เป็นก้านสั้นอยู่ระหว่างกลีบรองเมล็ดกับเปลือกใหญ่ และยังคงติดอยู่กับเมล็ดข้าวเปลือก

1.1.6 กลีบรองเมล็ด เป็นกลีบเล็ก 2 กลีบ อยู่ตรงข้ามกันได้สุดของเมล็ด

1.2 ข้าวกล้องหรือเนื้อผล ประกอบด้วย

1.2.1 เชื้อหุ้มผล เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอก มีความหนาประมาณ 10 ไมครอน (μ) ห่อหุ้มผลอยู่ภายใน มีลักษณะเป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์เส้นใย 6 ชั้น มีสารสีหรือรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่างๆ เช่น น้ำตาลอ่อน น้ำตาลแก่ น้ำตาลแดง น้ำตาลม่วง น้ำตาลจนเกือบดำ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีโปรตีน เฮมิเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบสำคัญ

1.2.2 เชื้อหุ้มเมล็ด อยู่ถัดจากเชื้อหุ้มผลเข้ามา ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น รูปยาว เรียงตามขวาง และมีผนังบางกั้น (หนาประมาณ 0.5 ไมครอน) ภายในเซลล์มีไขมันและสารสี เช่นเดียวกับเชื้อหุ้มผล ทำให้ข้าวกล้องมีสี

1.2.3 นิวเซลล์ (nucellus) เป็นเซลล์ชั้นที่ติดกับเชื้อหุ้มเมล็ด แต่พันธะระหว่างนิวเซลล์กับเชื้อหุ้มเมล็ดไม่ติดแน่น จึงแยกจากกันได้ง่าย มีความหนาประมาณ 0.8-2.5 ไมครอน

1.2.4 เยื่อชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) เป็นชั้นถัดจากเชื้อหุ้มเมล็ด ประกอบด้วยเซลล์ 1-7 ชั้น และมีลักษณะของเยื่อหุ้มด้านหลังของเมล็ดจะหนากว่าเยื่อหุ้มด้านท้อง ซึ่งความหนานี้จะแตกต่างกันไปตามพันธุ์ข้าว เช่น ข้าวเมล็ดป้อมสั้นจะมีเยื่อชั้นแอลิวโรนหนากว่าข้าวเมล็ดยาว เป็นต้น เซลล์แอลิวโรนจะไม่เชื่อมติดกับคัพภะในส่วนของใบเลี้ยงด้านท้องของเมล็ดลงมาถึงจุดเชื่อมระหว่างใบเลี้ยงกับเยื่อหุ้มรากอ่อน ซึ่งอยู่ข้างในของเมล็ด จึงแบ่งลักษณะของเซลล์แอลิวโรนเป็น 2 ลักษณะคือ เซลล์ส่วนที่ห่อหุ้มรอบเนื้อของเมล็ดจะมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ และมีไซโตพลาสซึม (cytoplasm) อยู่หนาแน่น ในเซลล์ยังมีกลุ่มโปรตีนที่มีรูปร่าง (protein bodies) กลุ่มไขมัน (lipid bodies) และสารอื่นๆ เช่น นิวเคลียส (nucleus) ไมโครบอดี (microbodies) ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) เอนโดพลาสมิก เรติคูลัม (endoplasmic reticulum) เวสิเคิล (vesicles) และพลาสทิด (plastids) เป็นต้น ส่วนเซลล์แอลิวโรนที่ห่อหุ้มคัพภะจะบาง มีไซโทพลาสซึมน้อย รูปร่างยาว มีกลุ่มไขมัน และกลุ่มโปรตีนน้อย มีเวสิเคิลมาก เป็นต้น ส่วนผนังเซลล์จะมีโปรตีน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสประกอบอยู่

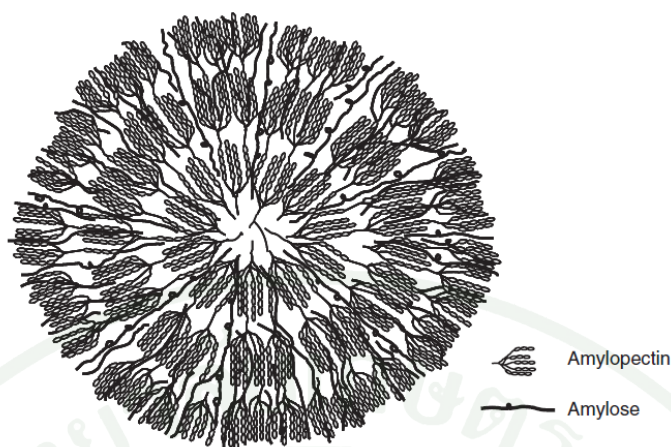
1.2.4.1 คัพภะ หรือเชื้อชีวิต จะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ ส่วนท้องของเมล็ดมีส่วนประกอบเป็นรากอ่อน (radicle) ต้นอ่อน (plumule) เยื่อหุ้มรากอ่อน (coleorhiza) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (coleoptile) ท่อน้ำท่ออาหาร (epiblast) และใบเลี้ยง (scutellum) ซึ่งเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว คัพภะเป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อน จึงอุดมไปด้วยโปรตีน และไขมันในส่วนต่างๆ

1.2.4.2 เนื้อเมล็ดหรือเนื้อข้าว (endosperm) มีมากที่สุดในส่วนหัว (ประมาณร้อยละ 80 ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด) แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนชั้นซับแอลิวโรน (subaleurone layer) เป็นเซลล์ 2 ชั้นอยู่ถัดจากชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) ซึ่งเป็นเชื้อหุ้มเมล็ด และส่วนที่เป็นสตาร์ช ในเนื้อของเมล็ด (starchy endosperm) ในชั้นซับแอลิวโรนจะมีกลุ่มโปรตีนอยู่ 3 ลักษณะคือ ลักษณะกลมใหญ่ (ขนาด 1-2 ไมครอน) กลมเล็ก (ขนาด 0.5-0.75 ไมครอน) และเป็นผลึกติดกัน ขนาด 2-3.5 ไมครอน ในส่วนของเนื้อเมล็ดจะมีกลุ่มโปรตีนลักษณะกลมขนาดใหญ่และเล็กแทรกอยู่ในระหว่างเม็ดสตาร์ช (starch granules)

องค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดข้าว

1. สตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบมากที่สุดในเนื้อเมล็ดของข้าว เม็ดสตาร์ชข้าวมีขนาด 3-5 ไมครอน มีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยม อยู่รวมกันเป็นกลุ่มประมาณ 20-60 เม็ดภายในส่วนของแอมิโลพลาสต์ โดยมีกลุ่มของโปรตีนแทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ช (Champagne, 1996) โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ลักษณะคือ แอมิโลส และแอมิโลเพกทิน ซึ่งโมเลกุลทั้งสองจัดเรียงตัวกันแน่นจนเป็นเม็ดสตาร์ช โดยมีโครงสร้างลักษณะเป็นรัศมีจากจุดกึ่งกลางแบบกึ่งผลึก (semicrystalline) (ภาพที่ 2) ประกอบด้วยส่วนอสัณฐาน (amorphous regions) และส่วนที่เป็นผลึก (crystalline regions) โดยส่วนอสัณฐานประกอบด้วย ส่วนของโมเลกุลแอมิโลสที่อยู่อย่างอิสระและส่วนที่เป็นจุดเชื่อมกิ่งของแอมิโลเพกทิน ในส่วนผลึกประกอบด้วยส่วนของโมเลกุลสตาร์ชที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างกันได้เป็นเกลียวคู่ (double helices) ขึ้นภายในโครงสร้าง

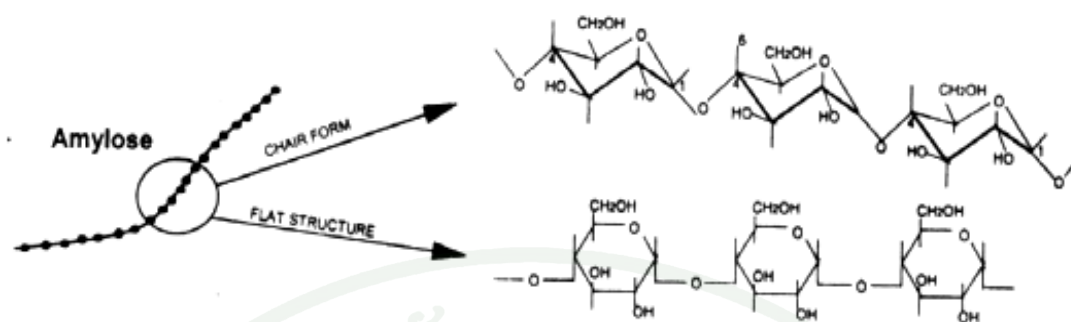


ภาพที่ 2 ภาพจำลองการจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินภายในโมเลกุลของสตาร์ช

ที่มา: Jane (2009)

1.1 แอมิโลส

แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (linear chains) ที่ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1, 4 (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2550) (ภาพที่ 3) ปัจจุบันพบว่า สายของแอมิโลสอาจมีโซ่กิ่ง (branched chain) เล็กน้อย โดยจับกับสายโซ่หลักด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1, 6 น้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 ดาลตัน มีระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization; DP) เฉลี่ย 1,000-1,100 ความยาวของสายเฉลี่ย 250-320 หน่วยของกลูโคส (อรอนงค์, 2550) โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลสมิหลายรูปแบบ เช่น สายตรง สายพันเป็นเกลียว (helix) เดี่ยว หรือคู่ มีลักษณะเกลียวม้วนเกลียวที่คลายตัวหรือ ม้วนอย่างไม่เจาะจง (Whistler and Danial, 1984) แอมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน (amylose-iodine complex) มีสีน้ำเงิน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน โดยแอมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายน้ำ (Galliard and Bowler, 1987)

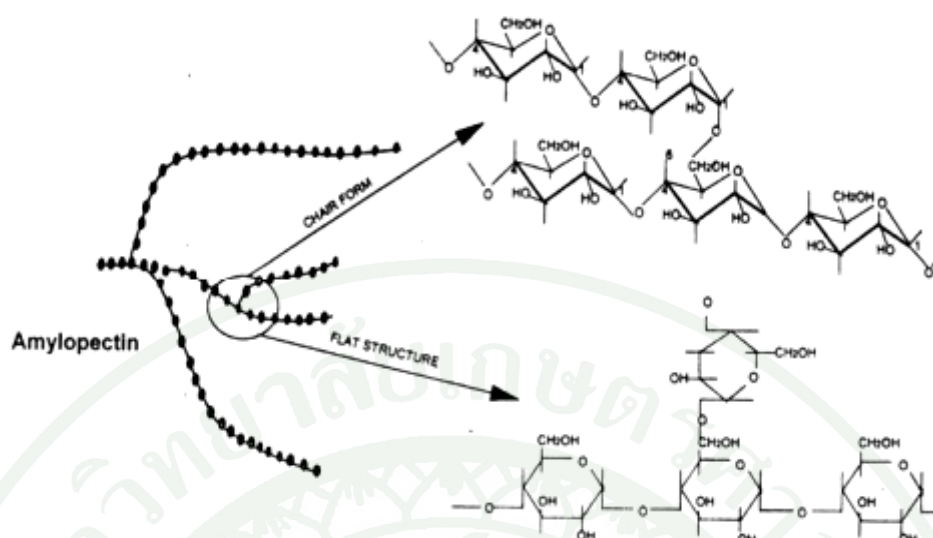


ภาพที่ 3 โครงสร้างของแอมิโลส

ที่มา: Murphy (2000)

1.2 แอมิโลเพกทิน

แอมิโลเพกทิน เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1, 4 ส่วนที่เป็นกิ่งแขนงเชื่อมต่อดัวยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1, 6 (ภาพที่ 4) แอมิโลเพกทินมีโมเลกุลขนาดใหญ่ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย $10^7 - 10^9$ ดาลตัน (Biliaderis, 1998) มีระดับขึ้นการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันเฉลี่ย 4,700-18,500 และความยาวของสายเฉลี่ย 18-21 หน่วยกลูโคส (อรอนงค์, 2550) ลักษณะรูปแบบโมเลกุลของแอมิโลเพกทินเป็นคลัสเตอร์ (cluster) แต่ละคลัสเตอร์ประกอบด้วยสายแกนหรือสาย C (C-chain) ซึ่งมีหมู่รีดิวซิงที่ปลายของโมเลกุลอยู่ที่จุดกึ่งกลาง (hilum) สำหรับสายที่มาต่อกับสาย C จะเป็นสายกิ่งเชื่อมหรือสาย B (B-chain) และสาย A จะจับต่อออกไปจากสาย B โดยสาย A เป็นกิ่งชั้นนอกสุด ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายนี้อีก (ภาพที่ 5ก)

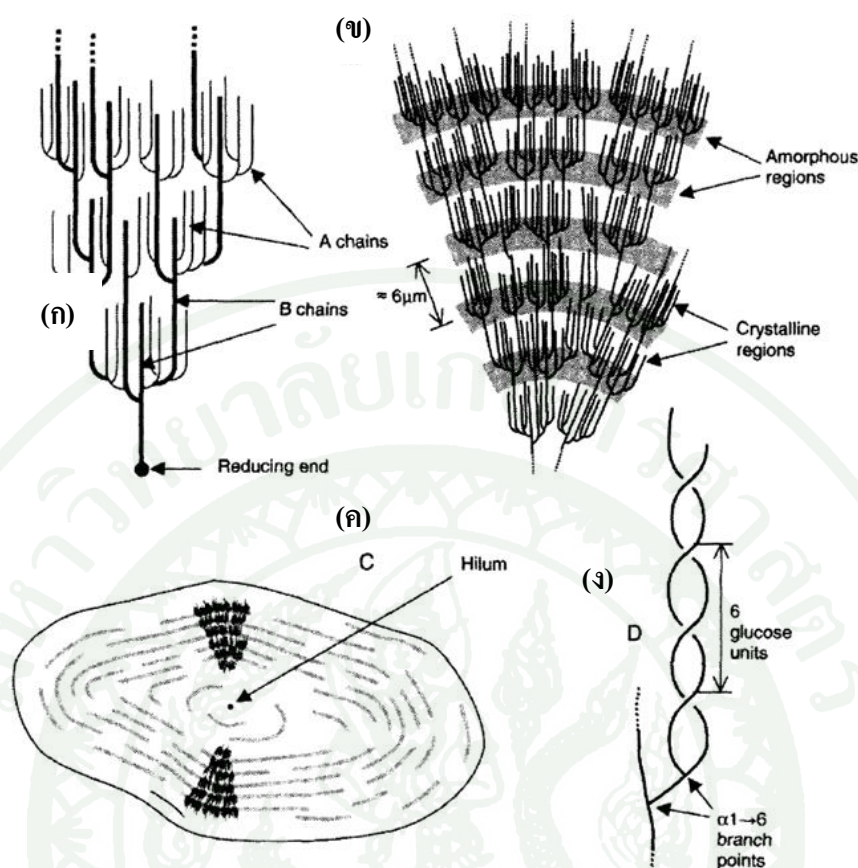


ภาพที่ 4 โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน

ที่มา: Murphy (2000)

2. โปรตีน

โปรตีนในข้าวมีประมาณร้อยละ 6-9 แตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว พบมากในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด และเนื้อเมล็ดด้านนอกมากกว่าในใจกลางเมล็ด เมื่อจำแนกโปรตีนตามลักษณะการละลายในสารละลายต่างๆ (Osborn classification) แบ่งออกได้ 4 ชนิด คือ โปรตีนที่ละลายในน้ำ (albumin) โปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือ (globulin) โปรตีนที่ละลายในแอลกอฮอล์ (prolamin) และโปรตีนที่ละลายในสารละลายด่าง (glutelin หรือ oryzanin) ซึ่งเป็นโปรตีนหลักในข้าวมีปริมาณร้อยละ 70-80 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Cagampang *et al.*, 1966) โมเลกุลของโปรตีนที่รวมกันเป็นรูปร่างโปรตีน (protein bodies) มี 3 รูปแบบ คือ แบบผลึก (crystalline) แบบรูปร่างกลมขนาดเล็ก และรูปร่างกลมขนาดใหญ่ ซึ่งโปรตีนที่กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อเมล็ดจะเป็นโปรตีนรูปร่างกลมขนาดเล็ก (อรอนงค์, 2550) โปรตีนในข้าวมีปริมาณน้อยแต่เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของข้าว ข้าวที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะดูดซึมน้ำได้ช้ากว่าข้าวที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ เนื่องจากโปรตีนที่อยู่รอบๆ โมเลกุลของสตาร์ชขัดขวางการดูดซึมน้ำ มีผลให้อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชสูงขึ้น นอกจากนี้ข้าวที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกที่แข็งกว่าข้าวที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ (งามชื่น, 2536)



ภาพที่ 5 โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช

ก คือ โครงสร้างของแอมิโลเพกทิน

ข คือ ลักษณะโครงสร้างแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐาน

ค คือ ภาพตัดขวางของเม็ดสตาร์ชแสดงการจัดโมเลกุลแอมิโลเพกทิน

ง คือ การเกิดเกลียวคู่ของสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชใกล้เคียง

ที่มา: Oates (1997)

3. ไขมัน

ข้าวมีปริมาณไขมันประมาณร้อยละ 3 อยู่ในส่วนด้านนอกของเมล็ดข้าวมากกว่าในใจกลางเมล็ด ประเภทของไขมันในข้าวส่วนใหญ่ คือ ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) รองลงมา คือ ฟอสโฟลิพิด (phospholipids) ไกลโคลิพิด (glycolipid) และเทอร์พีนอยด์ (terpenoids) ทั้งไขมันภายนอกและภายในเม็ดสตาร์ชเป็นไขมันประเภทสารประกอบมอโนแอซิล (monoacyl) ซึ่งกลุ่มของมอโนแอซิลจะเป็นกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว

มากกว่า ไขมันมีความสัมพันธ์กับเม็ดสตาร์ช 3 ลักษณะ ลักษณะที่หนึ่งคือ ไขมันอยู่ชิดกันกับโปรตีนบริเวณผิวของเม็ดสตาร์ช หรืออาจอยู่ร่วมกับโครงสร้างของแอมิโลเพกทินสายนอก เช่น สาย A บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ช ลักษณะที่สอง ไขมันอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชโดยเกาะเกี่ยวกับสตาร์ช และลักษณะที่สาม ไขมันอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชแต่ไม่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (อรอนงค์, 2550) ไขมันสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลแอมิโลส โดยโมเลกุลแอมิโลสพันเกลียวรอบ โมเลกุลไขมันส่งผลให้ความสามารถในการพองตัวของเม็ดสตาร์ชลดลง (Tester and Karkalas, 1996)



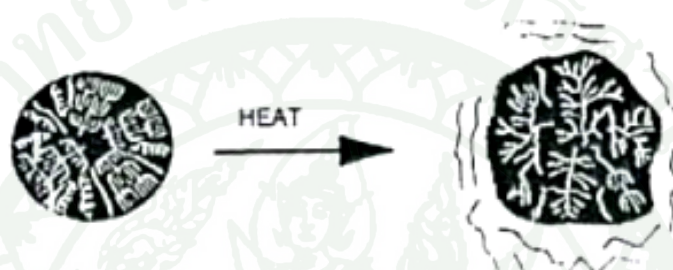
ภาพที่ 6 ภาพจำลองการจับตัวของแอมิโลสและไขมัน

ที่มา: อรอนงค์ (2550)

การเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ช

การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) เป็นการทำลายโครงสร้างที่เป็นระเบียบภายในเม็ดสตาร์ชโดยให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชในสถานะที่มีน้ำเพียงพอ โมเลกุลของน้ำสามารถแพร่เข้าไปในส่วนออสติฐานของเม็ดสตาร์ชได้ก่อน ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลสตาร์ชในส่วนออสติฐานอ่อนแอลง (Kaletunc and Breslauer, 2003) เม็ดสตาร์ชเริ่มเกิดการพองตัว การพองตัวของส่วนออสติฐานนี้ทำให้โครงร่างผลึกเกิดความเครียด (stress) (Tester and Morrison, 1990) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโมเลกุลในโครงร่างผลึกอ่อนแอลง โมเลกุลของน้ำจึงสามารถเข้าไปในส่วนโครงร่างผลึกทำให้เม็ดสตาร์ชดูดน้ำได้มากขึ้นพร้อมกับพองตัวขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งโครงร่างผลึกของเม็ดสตาร์ชสลายไปเกิดเป็นการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ พร้อมกับสายโมเลกุลแอมิโลสแพร่

ออกมานอกเมื่อดาว (Whistler and Bemiller, 1999) โดยอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันของ ดาวเคราะห์ในช่วง 58-74 องศาเซลเซียส (Matz, 1991) ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลาตินในเซชันของ ดาวเคราะห์มีด้วยกันหลายปัจจัย เช่น ขนาดและรูปร่างของเม็ดดาวเคราะห์ ปริมาณแอมิโลส ความเป็นผลึก ของเม็ดดาวเคราะห์ ปริมาณโปรตีนและไขมัน (Hamaker and Griffin, 1993) โครงสร้างของโมเลกุล แอมิโลเพกทิน ได้แก่ ความยาว น้ำหนัก และความเป็นกิ่งก้านของโมเลกุล และอัตราส่วนระหว่าง แอมิโลสและแอมิโลเพกทิน (Tester, 1997)



ภาพที่ 7 การเกิดเจลาตินในเซชันของดาว

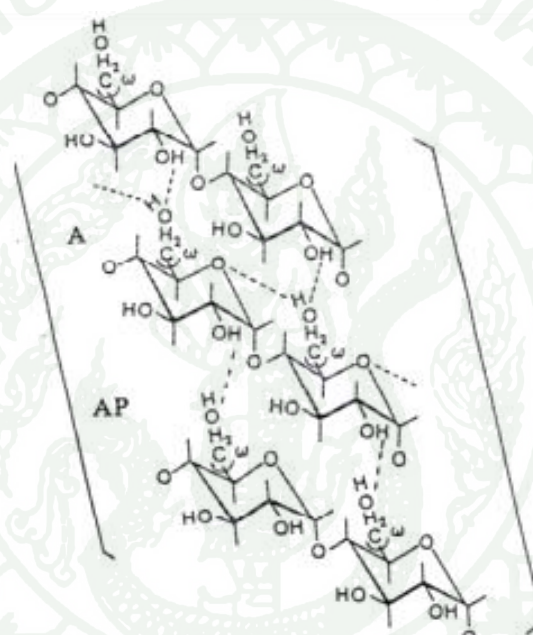
ที่มา: Murphy (2000)

การเกิดรีโทรเกรเดชันของดาว

เมื่อเม็ดดาวได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาตินในเซชัน และมีการให้ความร้อน ต่อไปจะทำให้เม็ดดาวพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และเกิดการแตกออก โมเลกุลของ ดาวเคราะห์จะจัดกระจายอยู่กันอย่างอิสระและไม่เสถียร เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงหรือเก็บรักษา เพื่อทำ ให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินจึงพยายามจัดเรียงตัวกัน ใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hoseney, 1998; Sasaki *et al.*, 2000) โดยการพันกันเป็นเกลียวคู่ สาย เกลียวคู่สามารถรวมตัวกันจนเป็นโครงร่างผลึกสามมิติ (Klucinec and Tompson, 1999) เรียก ปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การเกิดนิวเคลียส (nucleation) การเรียงต่อกันของโมเลกุล (propagation of crystal growth) และการเกิดโครงสร้าง คล้ายผลึกที่สมบูรณ์ (crystal perfection) การเกิดรีโทรเกรเดชันแบ่งออกได้เป็น 2 ระยะ คือ ระยะที่

1 เป็นการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลแอมิโลสซึ่งจะใช้เวลาไม่กี่ชั่วโมงหลังการเก็บรักษา เนื่องจากโครงสร้างของแอมิโลสเป็นเส้นตรง เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลได้ง่ายกว่าโครงสร้างเป็นกึ่งก้านของแอมิโลเพกทิน และระยะที่ 2 คือ การเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทิน ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิการเก็บรักษาเท่ากับอุณหภูมิห้อง (Miles *et al.*, 1985; Soest *et al.*, 1994) ในธรรมชาติพบว่า แอมิโลสและแอมิโลเพกทินอยู่ร่วมกัน ดังนั้นการเกิดรีโทรเกรเดชันในธรรมชาติเป็นการเกิดผลึกร่วมกัน (co-crystalline) ระหว่างแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน (Gudmundsson, 1994)



ภาพที่ 8 การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (A คือ แอมิโลส, AP คือ แอมิโลเพกทิน)

ที่มา: Tako and Hizukuri (2002)

การเปลี่ยนแปลงสมบัติของเมล็ดข้าวระหว่างเก็บรักษา

การเปลี่ยนแปลงสมบัติของเมล็ดข้าวเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาตั้งแต่การเก็บเกี่ยวจนถึงผู้บริโภค โดยขึ้นอยู่กับสภาวะของการเก็บรักษา เช่น ระยะเวลา อุณหภูมิ และความชื้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ของเมล็ดข้าวจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้าว

1. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

เมล็ดข้าวมีการสูญเสียน้ำหนักซึ่งอาจเกิดจากการระเหยของความชื้นในเมล็ดข้าว การสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการหายใจและการระเหยของสารที่ระเหยได้ เช่น กรดแอลกอฮอล์ เป็นต้น (ภัทรพร, 2540) นอกจากนี้การเก็บรักษาเมล็ดข้าวยังมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านสี คือ ข้าวที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลานานมีสีของเมล็ดข้าวเหลืองมากขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงของสีมากขึ้นเมื่อเก็บรักษาข้าวที่อุณหภูมิสูง (เพลงพิน, 2541; ละมุล, 2541; Barber, 1972; Holcomb, 1997; Park *et al.*, 2012)

2. การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเมล็ดข้าวในระหว่างการเก็บรักษาพบว่า ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (Chrastil, 1990; Sodhi *et al.*, 2003) อย่างไรก็ตาม เพลงพิน (2541) พบว่า ปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวลดลงเมื่อเก็บรักษาเมล็ดข้าวไว้ที่อุณหภูมิสูง (37 องศาเซลเซียส) เนื่องจากเมล็ดข้าวมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนความชื้นกับอากาศที่อยู่รอบๆ ได้ ทำให้เกิดการถ่ายเทความชื้นจากเมล็ดข้าวสู่บรรยากาศ ในระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดข้าวปริมาณสารด้วยรวม และปริมาณแอมิโลสซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวหุงสุกมีคุณสมบัติแตกต่างกันนั้นพบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (เพลงพิน, 2541; Barber 1972; Villareal *et al.* 1976; Shoji and Kurusawa, 1981) อย่างไรก็ตามในปี 1990 Cheastil พบว่า ปริมาณแอมิโลสเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเก็บรักษาข้าวเป็นระยะเวลา 12 เดือน

ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติในระหว่างการเก็บรักษา (Juliano, 1985; Indudhara Swamy *et al.* 1978; Noomhorm, 1997) แต่มีการลดลงของแอลบูมิน (โปรตีนที่ละลายน้ำได้) (Zhou *et al.*, 2002) และ โกลบูมิน (Pomeranz *et al.*, 1968) ส่วนโปรตีนที่สำคัญในข้าว คือ ออริซานิน (oryzanin) ซึ่งโมเลกุลของออริซานินสามารถเชื่อมโยงกันได้ทั้งแบบภายในโมเลกุลเดียวกัน (intra-molecular bonding) และระหว่างโมเลกุล (inter-molecular bonding) ในระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดข้าว Zhou *et al.* (2003) พบว่า น้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนออริซานินเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของพันธะไดซัลไฟด์ (disulphide bond) มีผลทำให้การละลายได้ของโปรตีนออริซานินลดลง เม็ดสตาร์ชสามารถพองตัวได้ลดลง ทำให้ความเหนียวของข้าวหุงสุกลดลง (Martin and Fitzgerald, 2002) นอกจากนี้ในระหว่างการเก็บรักษาข้าว

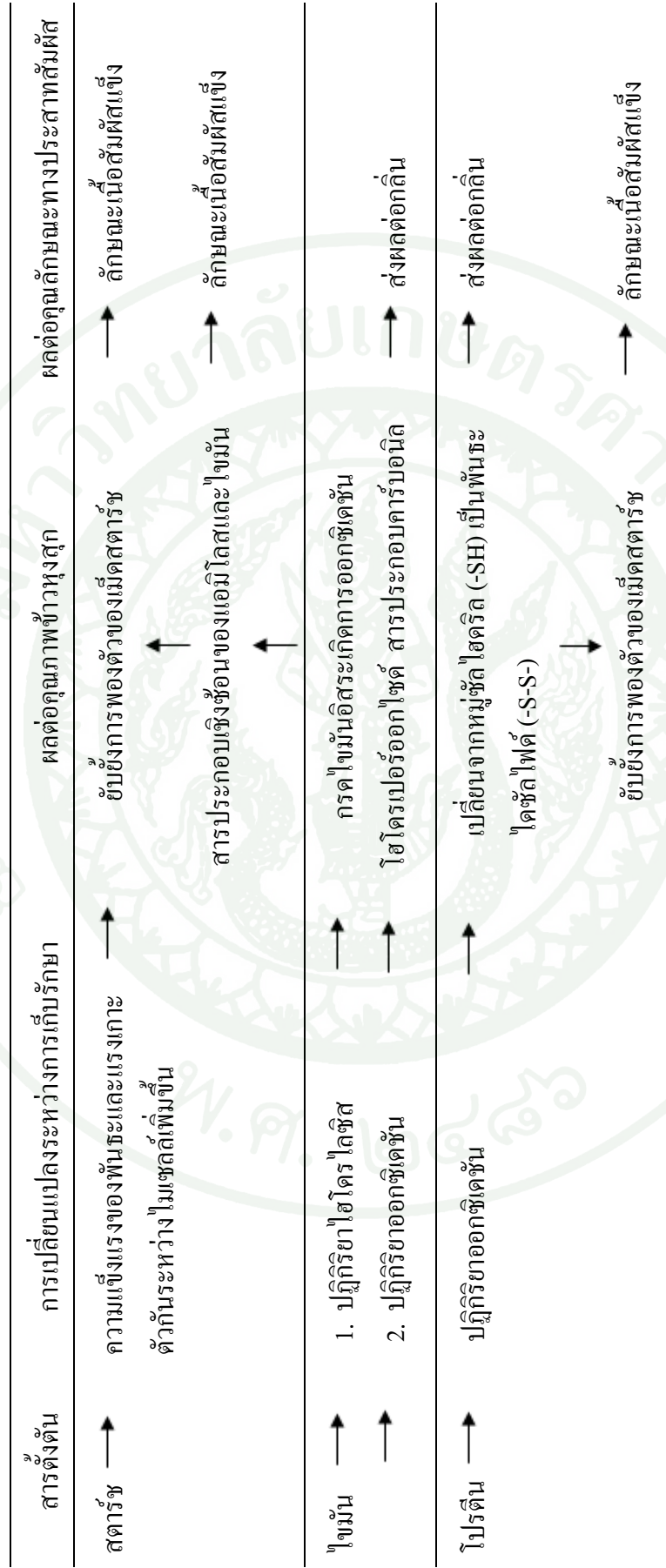
โมเลกุลของโปรตีนมีการเชื่อมต่อกับโมเลกุลของสตาร์ช (Villareal *et al.*, 1976) โดยในการทดลองของ Chrastil (1990) พบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นการเชื่อมต่อกันระหว่างโปรตีน ออริซานินและสตาร์ชในเมล็ดข้าวลดลง

ในระหว่างการเก็บรักษาข้าวพบว่า กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) มีปริมาณเพิ่มขึ้น (Bolling *et al.*, 1978; Zhou *et al.*, 2002; Sodhi *et al.*, 2003) เนื่องจากเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส โดยเอนไซม์ไลเปสย่อยพันธะเอสเทอร์ได้กรดไขมันอิสระ กรดไขมันอิสระเหล่านี้จะไปเกิดเป็น สารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของแอมิโลส (amylose-lipid complex) มีผลทำให้ข้าวมีความแข็ง (hardness) มากขึ้น (Bolling *et al.*, 1978; Sodhi *et al.*, 2003) นอกจากนี้ยังพบว่า ในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเกิดกระบวนการออกซิเดชันของไขมัน โดยกรดไขมันไม่อิ่มตัวถูกเปลี่ยนเป็นสารเปอร์ออกไซด์ (peroxide) และสารประกอบคาร์บอนิลหลายชนิด เช่น อะเซทอลดีไฮด์ (acetaldehyde) โพรพานอล (propanal) เพนทานอล (pentanal) และเฮกซานอล (hexanal) การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระและสารประกอบคาร์บอนิลนี้ทำให้เกิดกลิ่นและรสที่ผิดปกติ (off-flavor) (สุภาวดี, 2542)

3. การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเชิงฟิสิกส์

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของเมล็ดข้าวขณะเก็บรักษามีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ช โปรตีนและไขมันในเมล็ดข้าว โดยการเก็บรักษาข้าวมีผลต่อสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของเมล็ดข้าวด้านความหนืด (pasting properties) คือ มีผลให้ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และความหนืดลดลง (breakdown) ของแป้งข้าวมีค่าลดลง (Noomhorm *et al.*, 1997; Zhou *et al.*, 2002; Tulyathan and Leecharatanaluk, 2007) นอกจากนี้ยังมิผลทำให้แป้งข้าวมีอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชันเพิ่มมากขึ้นเมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น (Bolling *et al.*, 1978; Teo *et al.*, 2000) การเก็บรักษาข้าวยังมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก โดยทำให้ข้าวหุงสุกมีความแข็ง (hardness) มากขึ้นและมีความเหนียว (stickiness) น้อยลง

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของข้าระหว่างการศึกษา



ที่มา: ดัดแปลงจาก Zhou *et al.* (2002)

การแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งอาหารเป็นกระบวนการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อให้มีอายุการเก็บรักษานานขึ้น โดยการทำให้อาหารแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำมากๆ เพื่อให้มีน้ำที่มีอยู่ในอาหารกลายเป็นผลึกน้ำแข็งด้วยการกำจัดความร้อนออกจากอาหาร นอกจากนั้นหากมีการดำเนินการแช่เยือกแข็งอย่างถูกต้องและเหมาะสมจะช่วยรักษาคุณภาพทั้งในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น สี และคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้สูง (สายสนม, 2546)

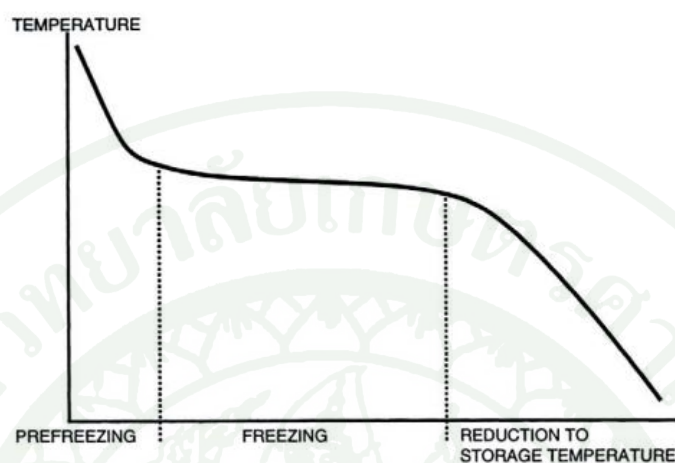
1. กระบวนการแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็ง คือ การลดอุณหภูมิของอาหารหรือผลิตภัณฑ์นั้นให้ต่ำลงจนถึงระดับที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำเนินปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่อไปได้ โดยทั่วไปมักเป็นที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า ซึ่งหลักสำคัญคือ การเปลี่ยนสถานะของน้ำในอาหารที่เป็นของเหลวให้เป็นน้ำแข็ง เพื่อไม่ให้น้ำนั้นสามารถทำหน้าที่ต่างๆ ในปฏิกิริยาเคมี (สายสนม, 2546)

กระบวนการแช่เยือกแข็งแบ่งออกเป็น 3 ขั้น ดังภาพที่ 9 ดังนี้ ขั้นที่ 1 คือ ขั้นก่อนการแช่เยือกแข็ง (prefreezing stage) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะลดลงเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิการเกิดผลึกน้ำแข็ง (freezing point) ขั้นที่ 2 คือ ขั้นการแช่เยือกแข็ง (freezing stage) ในขั้นนี้ความร้อนถูกดึงออกจากระบบ ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะไปเป็นผลึกน้ำแข็ง และขั้นที่ 3 คือ ขั้นการลดอุณหภูมิไปจนถึงอุณหภูมิในการเก็บรักษา (reduction to storage temperature) ซึ่งจะเริ่มต้นตั้งแต่อุณหภูมิที่เกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุดไปจนถึงอุณหภูมิที่ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานความร้อน (Persson and Londahl, 1993)

การแช่เยือกแข็งประกอบด้วยกระบวนการที่ต่อเนื่องกัน 2 กระบวนการ คือ การก่อผลึกนิวเคลียส (nucleation) และการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (propagation or crystal growth) (Fennema *et al.*, 1976; Hartel, 2001) ซึ่งกระบวนการแช่เยือกแข็งเริ่มขึ้นเมื่อชิ้นอาหารสัมผัสกับตัวกลางในการทำควมเย็น ซึ่งอาจเป็นของแข็ง เช่น แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอุณหภูมิ -30 ถึง -40 องศาเซลเซียส ของเหลว เช่น ไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส หรือแก๊ส เช่น แก๊สไนโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ (Maynard, 1948) การเปลี่ยนแปลงระหว่างการแช่เยือกแข็งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างสภาวะอสัณฐาน (amorphous state) ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่สมดุล (non equilibrium state) กับสภาวะกลาส (glassy state) ซึ่งเป็นสภาวะที่ระบบมีความ

หนืดสูง โมเลกุลต่างๆ ภายในระบบสามารถเคลื่อนที่และเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ลดลง (Roos and Karel, 1991; Goff, 1997)



ภาพที่ 9 แผนภาพกระบวนการแช่เยือกแข็ง

ที่มา: Heldman and Taylor (1997)

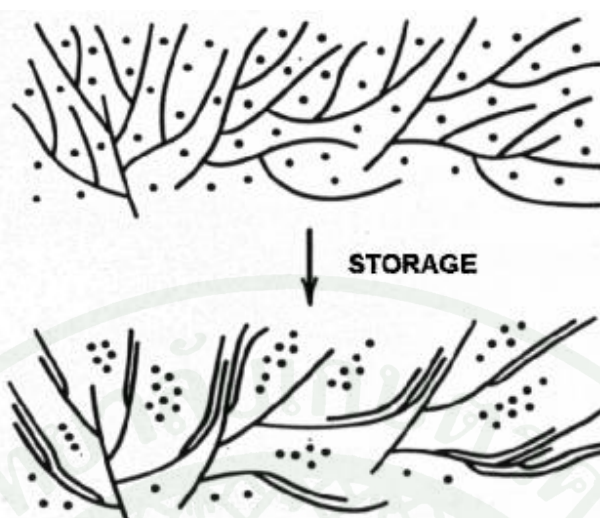
2. การแช่เยือกแข็งข้าวหุงสุก

เมื่อนำข้าวหุงสุกมาแช่เยือกแข็งพบว่า โครงสร้างของข้าวสูญเสียได้เนื่องจากการเกิดผลึกน้ำแข็ง ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการแช่เยือกแข็ง เมื่อนำข้าวมาหุงสุก สตาร์ชที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวเกิดการเจลาไทไนซ์ และเมื่อนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำหรือแช่เยือกแข็ง โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแห 3 มิติ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลสตาร์ชจากเดิมที่เป็นอสัณฐานไปเป็นผลึก (Eliasson and Gudmundsson, 1996) เรียกว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน ในระหว่างการเก็บรักษาข้าวหุงสุกแบบแช่เยือกแข็ง หากมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (temperature fluctuation) โมเลกุลของสตาร์ชภายในเมล็ดข้าวบางส่วนเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากขึ้น เนื่องจากผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้สายโซ่ของโมเลกุลสตาร์ชมาบีบตัวอัดกันแน่น จึงเกิดรีโทรเกรเดชันมากขึ้น ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้แก่ ความทึบแสง และความมันวาวของผลิตภัณฑ์ลดลงทำให้ข้าวมีลักษณะสีขาวขุ่น เนื้อสัมผัสหยาบ มีลักษณะแห้งแตกเป็นเกล็ด (flaky) (Lima and Singh, 1993) ข้าวจะไม่สามารถอุ้มน้ำได้ มีผลให้เนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแน่น และแข็ง

กระด้างมากขึ้น มีความเหนียวน้อยลง และการเกาะตัวของเมล็ดข้าวลดลง (Donoid *et al.*, 1968)

3. เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

ในระหว่างการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่พึงประสงค์ขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้ประกอบด้วย เจลสตาร์ชมีความชุ่มและความแข็งเพิ่มขึ้น และเกิดการแยกตัวของน้ำ (syneresis) ออกจากเจล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชเคลื่อนที่ มาจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน หรือการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยที่โมเลกุลของสตาร์ชเชิงเส้นจะมี แนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันได้สูงกว่าโมเลกุลของสตาร์ชเชิงกิ่ง นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชเชิงเส้นพบว่า มีความสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของสตาร์ช ถ้าระบบ สตาร์ชมีความเข้มข้นต่ำ สตาร์ชเชิงเส้นจะจัดเรียงตัวกันช้า ตกตะกอนรวมกัน ทำให้เกิดการเรียงตัว กันแน่น และเกิดเป็นเพสต์ (paste) ในขณะที่ระบบสตาร์ชที่มีความเข้มข้นสูง สตาร์ชจะจัดเรียงตัว กันอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดลักษณะเป็นเจล การแช่เยือกแข็งมีผลให้โครงสร้างของเจลสตาร์ชสูญเสีย ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของน้ำออกจากเจล (syneresis) และทำให้เกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ (spongy structure) ขึ้น (ภาพที่ 10) ระบบเจล สตาร์ชมีเสถียรภาพไม่แน่นอนและเป็นระบบที่ไม่สมดุล ดังนั้นโครงสร้างของเจลสตาร์ชจึงมีการ เปลี่ยนแปลงในระหว่างการแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษา (Schoch, 1968)



ภาพที่ 10 โครงสร้างแบบฟองน้ำของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษา

ที่มา: Schoch (1968)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อสมบัติของข้าวและข้าวหุงสุก

Bolling *et al.* (1978) ได้ศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวต่อสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าว โดยทำการเก็บรักษาข้าวพันธุ์ต่างๆ จำนวน 6 พันธุ์เป็นระยะเวลา 7 ปีที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวมากขึ้นมีผลทำให้เม็ดสตาร์ชของข้าวพองตัวได้น้อยลง และเมื่อทดสอบสมบัติด้านความหนืด โดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์ (brabender) พบว่า อุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชัน (gelatinization temperature) ของข้าวมีค่าสูงขึ้น โดยอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชันของข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นมากในช่วงการเก็บรักษาข้าว 1 และ 2 ปีแรก ส่วนในปีถัดไปมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเกิดเจลาทิไนเซชันเพียงเล็กน้อย

Chrastil and Zarin (1992) ได้ศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนออริซานินในข้าว โดยใช้ข้าว 2 พันธุ์ที่มีลักษณะเมล็ดยาวและเมล็ดสั้นเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 12 เดือน จากนั้นสกัดโปรตีนออริซานินจากตัวอย่างแป้งข้าวนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเจลอิเล็กโทรโฟรีซิส (sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis; SDS-PAGE)

ผลการทดลองพบว่า โปรตีนอริซานินของข้าวทั้ง 2 พันธุ์มีขนาดมวลงโมเลกุลเท่ากับ 12.3, 14.2, 22-23, 32-37, 56, 79.2, 83, 91.3, 104, 141, 169, 181 และ 202 กิโลดาลตัน เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของขนาดมวลงโมเลกุลโปรตีนของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนพบว่า ร้อยละของโปรตีนอริซานินที่มีมวลงโมเลกุลขนาดเล็กมีปริมาณลดลง ในขณะที่ร้อยละของโปรตีนอริซานินที่มีมวลงโมเลกุลขนาดใหญ่มีปริมาณเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า โปรตีนอริซานินในข้าวพันธุ์เมลิคตันก่อนการเก็บรักษาประกอบด้วยซิสเตอีน (cysteine; -SH) ร้อยละ 0.2 แต่เมื่อข้าวผ่านการเก็บรักษาพบว่า ปริมาณซิสเตอีนลดลงเหลือร้อยละ 0.14 ในขณะที่ปริมาณซิสตีน (cystine; -S-S-) มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 0.12 เป็นร้อยละ 0.22 ในทำนองเดียวกัน ข้าวพันธุ์เมลิคตันพบว่า ปริมาณซิสเตอีนลดลงหลังข้าวผ่านการเก็บรักษาจากร้อยละ 0.17 เป็นร้อยละ 0.14 ในขณะที่ซิสตีนมีปริมาณมากขึ้นจากร้อยละ 0.15 เป็นร้อยละ 0.18

Noomhorm *et al.* (1997) ได้ศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวต่อสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวเหนียวของไทย 2 พันธุ์ คือ กข 6 และ กข 8 โดยเก็บรักษาข้าวที่อุณหภูมิห้อง (28-30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 8 เดือน ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณแอมิโลสและปริมาณโปรตีนของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผลการศึกษาอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ในระหว่างการเก็บรักษาระยะเวลา 0-8 เดือนพบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีการเกิดเจลลิตีในเซชันของข้าวพันธุ์ กข 6 และ 8 เท่ากับ 60.79 และ 62.21 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนั้นผลการศึกษาสมบัติด้านความหนืดของข้าวพันธุ์ กข 6 พบว่า เมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นมีผลทำให้ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ความหนืดต่ำสุด (though) และความหนืดลดลง (breakdown) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนข้าวพันธุ์ กข 8 พบว่า ความหนืดสูงสุดและความหนืดลดลงมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เช่นเดียวกับข้าวพันธุ์ กข 6 อย่างไรก็ตามความหนืดสุดท้ายและเซตแบค (setback) พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยได้สรุปว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวนานขึ้นมีผลทำให้เม็ดสตาร์ชของข้าวพองตัวได้น้อยลง ความหนืดสูงสุดจึงมีค่าลดลง อีกทั้งเม็ดสตาร์ชมีความทนทานต่อแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น ความหนืดลดลงจึงมีค่าลดลง

Fan and Marks (1999) ได้ศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าว 2 พันธุ์คือ เบนกอล (Bengal) และเคบอนเนต (Kaybonnet) โดยเก็บรักษาข้าวเป็นระยะเวลา 0, 3, 9 และ 16 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า ค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (gelatinization enthalpy) ของแป้งข้าวมีค่ามาก

ขึ้นเมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น จากนั้นนำตัวอย่างแป้งข้าวที่เกิดการเจลาติไนเซชัน แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 7 วันพบว่า แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาเก็บรักษา 16 สัปดาห์ มีค่าพลังงานในการสลายผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation enthalpy) มากกว่าแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 9 และ 3 สัปดาห์ตามลำดับ

Teo *et al.* (2000) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี (chemical properties) ความหนืด (pasting properties) และความร้อน (thermal properties) ของแป้งข้าวเจ้า (non-waxy rice) และสตาร์ชข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 0-14 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า การเก็บรักษาแป้งข้าวและสตาร์ชข้าวเป็นระยะเวลา 14 สัปดาห์ที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมิโลส โปรตีนและไขมัน เมื่อศึกษาสมบัติด้านความหนืดพบว่า ความหนืดสูงสุดของสตาร์ชข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 14 สัปดาห์ที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในขณะที่ความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแป้งข้าวผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง เมื่อศึกษาสมบัติด้านความร้อนของแป้งข้าวและสตาร์ชข้าวพบว่า แป้งข้าวใหม่ (fresh rice flour) มีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันอยู่ในช่วง 47 ถึง 66 องศาเซลเซียส เมื่อแป้งข้าวและสตาร์ชข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวขยับไปที่อุณหภูมิสูงขึ้นและมีช่วงกว้างขึ้น ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวเพิ่มมากขึ้นแต่ไม่แตกต่างจากแป้งข้าวใหม่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวไม่มีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังพบว่า การเก็บรักษาแป้งข้าวที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวขยับไปที่อุณหภูมิสูงขึ้นเช่นกัน จากผลการทดลองผู้วิจัยได้สรุปว่าระยะเวลาและอุณหภูมิในการเก็บรักษาส่งผลต่อสมบัติด้านความหนืดและความร้อนของแป้งข้าวมากกว่าสตาร์ชข้าว นอกจากนั้นได้มีการศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวและสตาร์ชข้าวด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (nuclear magnetic resonance; NMR) พบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาแป้งข้าวและสตาร์ชข้าวไม่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวและสตาร์ชข้าว

Sodhi *et al.* (2003) ได้ศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าว 2 พันธุ์ คือ บาสมาทิ-370 (Basmati-370) และชาร์บาติ (Sharbati) โดยเก็บรักษาข้าวเป็นระยะเวลา 1 และ 2 ปี ในถุงพอลิเอทิลีน (polyethylene) ที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองพบว่า ข้าวทั้ง 2 พันธุ์ที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาข้าว 2 ปีมีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่าข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 1 ปี เนื่องมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน สำหรับสมบัติด้านความร้อน ของข้าวพบว่า ข้าวทั้ง 2

พันธุ์มีค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature) และค่าพลังงานในการเกิดเจลในเซชันลดลงเมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น โดยผู้วิจัยได้ให้เหตุผลไว้ว่าในระหว่างการเก็บรักษาข้าว อันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชกับออริซานิน (starch-oryzenin interaction) ในข้าวลดลง มีผลให้โครงสร้างภายในโมเลกุลของสตาร์ชสามารถถูกสลายได้ที่อุณหภูมิต่ำ ค่าอุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลในเซชันของข้าวจึงลดลง นอกจากนั้นได้ศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกด้านความแข็งพบว่า ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 2 ปีมีค่าความแข็งมากกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาเก็บรักษา 1 ปี ซึ่งผู้วิจัยได้ให้เหตุผลไว้ว่าความแข็งของข้าวหุงสุกที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวมากขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันภายในเมล็ดข้าว

Zhou *et al.* (2003) ได้ศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าว โดยเก็บรักษาข้าวเป็นระยะเวลา 16 เดือนที่อุณหภูมิ 4 และ 37 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า ความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวจากข้าวที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 16 เดือนที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวใหม่ แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในขณะที่ความหนืดสูงสุดและความหนืดลดลงของแป้งข้าวจากข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผู้วิจัยได้สรุปว่าการเก็บรักษาข้าวที่อุณหภูมิต่ำสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงในเมล็ดข้าวที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษาได้ เมื่อวิเคราะห์การเกิดเจลในเซชันของแป้งข้าวจากข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสพบว่า มีอุณหภูมิและพลังงานงานที่ใช้ในการเกิดเจลในเซชันมากกว่าแป้งข้าวจากข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นผลขององค์ประกอบอื่นที่มีอยู่ในเมล็ดข้าว เช่น ไขมันและโปรตีนต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวพบว่า แป้งข้าวเก่า (native flour) กับแป้งข้าวเก่าที่มีการสกัดไขมันออก (defatted flour) มีค่าความหนืดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังพบว่า แป้งข้าวเก่าที่ผ่านการแช่ในเอนไซม์เฮมิเซลลูเลส (hemicellulase) มีค่าความหนืดไม่แตกต่างจากแป้งข้าวเก่าดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในขณะที่แป้งข้าวเก่าที่ผ่านการแช่ในเอนไซม์เซลลูเลส (cellulose) มีค่าความหนืดใกล้เคียงกับแป้งข้าวใหม่ แสดงให้เห็นว่าเอนไซม์เซลลูเลสมีผลต่อโครงสร้างผนังเซลล์ของแป้งข้าวเก่า ทำให้แป้งข้าวสามารถดูดน้ำและพองตัวได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า แป้งข้าวเก่าที่ผ่านการแช่ในเอนไซม์โปรติเอส (protease) มีค่าความหนืดใกล้เคียงกับแป้งข้าวใหม่มากกว่าแป้งข้าวเก่าที่ผ่านการแช่ในเอนไซม์เซลลูเลส และเมื่อเติมสารบีตา-เมอร์แคปโทเอทานอล (β -mercaptoethanol) ลงไปในสารละลายน้ำแป้ง ความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพันธะไดซัลไฟด์ถูกทำลาย เม็ดสตาร์ชจึงสามารถดูดน้ำและพอง

ตัวได้มากขึ้น ผู้วิจัยจึงได้สรุปว่า การเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลของโปรตีนในระหว่างการเก็บรักษาข้าวมีผลต่อสมบัติด้านความเหนียวของแป้งข้าว

Ohno and Ohisa (2005) ได้ศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเก่าและข้าวใหม่เมื่อนำมาหุงสุก โดยข้าวเก่าเป็นข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 เดือน ผลการศึกษาพบว่า ข้าวเก่าเมื่อนำมาหุงสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งมากกว่าข้าวใหม่หุงสุกและอัตราส่วนของค่าความเหนียวต่อค่าความแข็ง (S/H ratio) ของข้าวเก่ามีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวใหม่ และเมื่อนำเมล็ดข้าวมาขัดสีเพื่อเอาชั้นนอก (external layer) ออกในระดับร้อยละ 7 พบว่า อัตราส่วนของค่าความเหนียวต่อค่าความแข็งของข้าวเก่าหุงสุกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความแข็งของข้าวมีค่าลดลง ผลจากการวิเคราะห์โปรตีนที่สกัดมาจากผิวชั้นนอกของข้าวด้วยเทคนิคเจลอิเล็กโทรโฟเรซิสพบว่า โปรตีนที่อยู่บริเวณชั้นนอกของข้าวเก่าเกิดการออกซิเดชันมากกว่าในข้าวใหม่ นอกจากนั้นการเติมสารรีดิวซิง (reducing agent) คือ โซเดียมซัลไฟต์ (sodium sulfite) ความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ลงในน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวเพื่อทำลายพันธะไดซัลไฟด์ของโปรตีนพบว่า อัตราส่วนของค่าความเหนียวต่อค่าความแข็งของข้าวเก่าหุงสุกมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับข้าวใหม่หุงสุก

Tulyathan and Leecharatanaluk (2007) ได้ศึกษาสมบัติด้านความเหนียวของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยเก็บรักษาข้าวสารเป็นระยะเวลา 0-8 เดือน ในถุงพอลิโพรพิลีน (polypropylene) ที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30-35 องศาเซลเซียส) จากนั้นวิเคราะห์ความเหนียวของแป้งข้าวโดยเครื่องวิเคราะห์ความเหนียวอย่างรวดเร็ว (rapid visco analyzer) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อข้าวมีการเก็บรักษาระยะเวลานานขึ้น มีผลทำให้ความเหนียวสูงสุด และความเหนียวลดลงของแป้งข้าวมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ช ทำให้ความสามารถในการพองตัวของเม็ดสตาร์ชลดลง และเม็ดสตาร์ชมีความทนทานต่อแรงเฉือนมากขึ้น ส่งผลให้ความเหนียวสูงสุดและความเหนียวลดลงมีค่าลดลงตามลำดับ ส่วนความเหนียวสุดท้ายพบว่า มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวมากขึ้น นอกจากนี้ได้ศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0-8 เดือนหลังนำมาหุงสุกพบว่า ข้าวที่มีระยะเวลาในการเก็บรักษานานเมื่อนำมาหุงสุกมีค่าความแข็งของข้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผู้วิจัยสันนิษฐานว่าเนื่องมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเอมิโลสและไขมัน ในขณะที่ความเหนียวมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สันนิษฐานว่าเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างเอมิโลสและโปรตีนออริซานินในข้าวลดลง นอกจากนั้นได้มีการศึกษารูปแบบของโปรตีน

ด้วยเทคนิคเจลอิลเล็กโทรฟอเรซิสแบบมิตติเดียว โดยใช้ตัวอย่างโปรตีนจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0, 5 และ 8 เดือน ผลการทดลองพบว่า รูปแบบโปรตีนของตัวอย่างทั้ง 3 ไม่มีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามแถบของโปรตีนที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 8 และ 5 เดือนมีความเข้มของแถบมากกว่าข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0 เดือน แสดงให้เห็นว่าเมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนคือ โปรตีนที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

Teerarat and Hongprabhas (2010) ได้ศึกษาผลของโปรตีนต่อสมบัติด้านความหนืดของข้าวไทย ใช้วิธีเร่งความเก่าของข้าวโดยเก็บรักษาข้าวที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ร้อยละ 70 เป็นระยะเวลา 5 วัน ใช้ตัวอย่างข้าว 3 พันธุ์คือ พันธุ์สันป่าตอง 1 พันธุ์ปทุมธานี 1 และเหลืองประทิว 123 ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกันคือ ร้อยละ 1.3, 14.1 และ 28.6 ตามลำดับ หลังจากเร่งข้าวให้เก่าพบว่า ปริมาณโปรตีนของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อนำแป้งข้าวเก่าและใหม่มาสกัดเอาส่วนโปรตีนออกพบว่า โปรตีนในแป้งข้าวเก่าถูกสกัดออกได้ยากกว่าแป้งข้าวใหม่ ทั้งนี้เนื่องมาจากในระหว่างการเร่งข้าวให้เก่า เกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับโปรตีนและโปรตีนกับสตาร์ช ทำให้โปรตีนในแป้งข้าวถูกสกัดออกได้ยากขึ้น การศึกษารูปแบบของโปรตีนด้วยเทคนิคเจลอิลเล็กโทรฟอเรซิสพบว่า โปรตีนกลูเตลินที่สกัดมาจากแป้งข้าวทั้ง 3 พันธุ์มีรูปแบบที่ไม่แตกต่างกันโดยมีขนาดมวลโมเลกุลประมาณ 20, 30 และ 50 กิโลดาลตัน นอกจากนี้พบว่า ข้าวที่ผ่านการเร่งให้เก่าและข้าวใหม่มีรูปแบบของโปรตีนกลูเตลินไม่แตกต่างกัน สำหรับการทดลองเจลอิลเล็กโทรฟอเรซิสที่มีการเติมสารรีดิวซิง คือ บีตา-เมอร์แคปโทเอทานอลพบว่า สายพอลิเพปไทด์ที่มีมวลโมเลกุลมากกว่า 225 และ 50 กิโลดาลตัน ถูกรีดิวซ์ให้มีมวลโมเลกุลขนาดเล็กลง แสดงให้เห็นว่าโปรตีน กลูเตลินในข้าวเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ เมื่อศึกษาสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวจากข้าวที่ผ่านการเร่งให้เก่าพบว่า อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของแป้งข้าวพันธุ์สันป่าตอง 1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญร้อยละ 95 อย่างไรก็ตามพบว่า แป้งข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และเหลืองประทิว 123 มีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดมากขึ้น ความหนืดสูงสุดและความหนืดลดลงมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า ความหนืดสูงสุดและความหนืดลดลงของแป้งข้าวใหม่และเก่าทั้ง 3 พันธุ์หลังผ่านการสกัดโปรตีนออกมีค่ามากกว่าแป้งข้าวที่ไม่ผ่านการสกัดโปรตีนออก ผู้วิจัยได้สรุปว่าโปรตีนในข้าวมีอิทธิพลต่อการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและความสามารถในการทนต่อแรงเฉือนที่อุณหภูมิสูงของเม็ดสตาร์ช

2. ผลของการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง

Taylor (1994) ได้ศึกษารูปแบบของการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวหุงสุก โดยเก็บรักษาข้าวหุงสุกเป็นเวลาทั้งหมด 50 วัน ที่อุณหภูมิ -12 และ -20 องศาเซลเซียส วัดค่าการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์พบว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน และความเหนียวของข้าวขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการเกิดผลึกน้ำแข็ง และขนาดของผลึกน้ำแข็งซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเก็บรักษาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา

Choi and Rhee (1995) ได้ศึกษาการแช่เยือกแข็งข้าวสุกที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3, 5, 7 และ 12 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 และ -70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า การแช่เยือกแข็งทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งจำนวนมาก และมีการเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น โดยการเก็บรักษาข้าวที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส มีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันมากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส เนื่องจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็ว (-70 องศาเซลเซียส) ทำให้โมเลกุลสตาร์ชผ่านช่วงการเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็ว

Perdon *et al.* (1999) เปรียบเทียบการเก็บรักษาข้าวหุงสุกที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ข้าว 2 พันธุ์คือ พันธุ์เบนกอล (Bengal) และไซเปรส (cypress) ซึ่งแต่ละพันธุ์มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 16 และ 25 ตามลำดับ เมื่อเก็บรักษาข้าวหุงสุกที่อุณหภูมิ -13, 3, 20 และ 36 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมงพบว่า ข้าวหุงสุกทั้ง 2 พันธุ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -13 และ 3 องศาเซลเซียสมีค่าความแข็งมากกว่าข้าวที่มีการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 และ 36 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามพบว่า ข้าวหุงสุกจากข้าวพันธุ์ไซเปรสมีค่าความแข็งมากกว่าและความเหนียวน้อยกว่าข้าวพันธุ์เบนกอล ทุกอุณหภูมิในการเก็บรักษา สอดคล้องกับการตรวจวัดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชภายในเมล็ดข้าวหุงสุกด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ซึ่งพบว่า ข้าวพันธุ์ไซเปรสมีการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชมากกว่าข้าวพันธุ์เบนกอล

Sitachitta *et al.* (2006) ได้ศึกษาวิธีการผลิตข้าวหนึ่งแช่เยือกแข็ง โดยใช้วิธีการแช่เยือกแข็ง 2 วิธี คือ การจุ่มในไนโตรเจนเหลว และแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งที่มีอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บรักษาข้าวหนึ่งแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่า ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งทั้ง 2 วิธี มีค่าความแข็งมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหนึ่งที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็ง จากการเปรียบเทียบวิธีการแช่เยือกแข็งแบบจุ่มในไนโตรเจนเหลว และแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งพบว่า ข้าวหนึ่งที่แช่เยือกแข็งแบบจุ่มลงใน

ในโตรเจนเหลวมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าข้าวหนึ่งที่แช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็ง เนื่องจากการแช่เยือกแบบจุ่มลงในในโตรเจนเหลวเป็นวิธีการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว จึงเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กแพร่กระจายทั่วในเมล็ดข้าว ส่วนการแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งเป็นการแช่เยือกแข็งที่มีอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า จึงเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่กว่า ทำให้โครงสร้างของเมล็ดข้าวถูกทำลาย ค่าความแข็งของข้าวจึงมากกว่าข้าวที่แช่เยือกแข็งแบบจุ่มลงในในโตรเจนเหลว

Yu *et al.* (2010) ได้ศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช และลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกหลังการเก็บรักษาแบบแช่เย็น (4 องศาเซลเซียส) ระยะเวลา 14 วัน และแช่เยือกแข็ง (-18 องศาเซลเซียส) ระยะเวลา 7 เดือน โดยทำการศึกษ้อัตราการแช่เยือกแข็ง 4 สภาวะ คือ 0.09 , 0.33 , 0.53 และ 1.45 องศาเซลเซียสต่อนาที จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ พบว่า ข้าวที่เก็บรักษาแบบแช่เย็นหลังผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแตกต่างกัน มีค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชันแตกต่างกัน ข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (1.45 องศาเซลเซียสต่อนาที) มีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำกว่าข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (0.09 องศาเซลเซียสต่อนาที) เนื่องจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ทำให้โมเลกุลสตาร์ชผ่านช่วงการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงสุด (maximum retrogradation) ได้เร็ว และทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กภายในเมล็ดข้าว ระหว่างการทำละลายผลึกน้ำแข็งสามารถละลายได้เร็วจึงผ่านช่วงของการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงสุดได้เร็วกว่าการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการแช่เยือกแข็งมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในช่วงแรกของการเก็บรักษาแบบแช่เย็น (3 วัน) แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานาน (14 วัน) ผลการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียวติดกัน (adhesiveness) ของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่มีการเก็บรักษาแบบแช่เย็น พบว่า ข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีค่าความแข็งของข้าวน้อยกว่าข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยความแข็งของข้าวหุงสุกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 วัน หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ สำหรับค่าความเหนียวติดกันของข้าวพบว่า ข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีค่าความเหนียวติดกันของข้าวมากกว่าข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยความเหนียวติดกันมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรกของการเก็บรักษา และลดลงอย่างช้าๆ ในช่วง 7 ถึง 14 วัน สำหรับข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่มีเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 7 เดือนพบว่า ข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง

แบบเร็วมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าและค่าความเหนียวติดกันมากกว่าข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า นอกจากนี้พบว่า ข้าวหุงสุกหลังผ่านการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 7 เดือนมีค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกเอมิโลเพกทินรีโทรเกรดมากขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกเอมิโลเพกทินรีโทรเกรดของข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีค่าน้อยกว่าข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า นอกจากนี้ยังพบว่า ข้าวหุงสุกเมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วร่วมกับการเก็บรักษาแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสสามารถชะลอการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชและช่วยรักษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกได้

พรพิสาข์ (2555) ได้ตรวจสอบผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็งพบว่า ข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (3.227 องศาเซลเซียสต่อนาที) มีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าและมีความเหนียวมากกว่าข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (1.821 องศาเซลเซียสต่อนาที) และช้า (0.082 องศาเซลเซียสต่อนาที) นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 ผสมในข้าวขณะหุงสุกร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (3.227 องศาเซลเซียสต่อนาที) สามารถช่วยรักษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส โครงสร้างระดับจุลภาค และลดการเกิดรีโทรเกรดชันของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้

3. ผลของการแช่เยือกแข็งต่อเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

Jacobson and Bemiller (1998) ได้ศึกษาผลของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 2.5 ต่อการเกิดรีโทรเกรดชันด้วยวิธีการวัดความบ่มพบว่า อัตราการเกิดรีโทรเกรดชันขึ้นอยู่กับอัตราการแช่เยือกแข็ง หากใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้เกิดการรีโทรเกรดชันมากกว่าอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว เมื่อนำเจลสตาร์ชไปเร่งการเกิดรีโทรเกรดชันด้วยวิธีคั้นรูปจากเยือกแข็ง จากนั้นหมุนเหวี่ยงแยกส่วนใสด้านบนไปวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่เหลืออยู่เพื่อประเมินการเกิดรีโทรเกรดชันพบว่า การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่เหลืออยู่ในส่วนใสที่แยกได้จากส่วนของเจลสตาร์ชมากกว่าแบบช้าแสดงให้เห็นว่า การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้โมเลกุลเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันหรือเกิดรีโทรเกรดชันได้มากกว่าการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

Varavinit *et al.* (2002) ได้ศึกษาการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าวด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง 2 ระดับ คือ อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว โดยนำเจลสตาร์ชข้าวจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นระยะเวลา 3.5 นาที ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง และอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยนำเจลสตาร์ชไปแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปคืนรูปจากเยือกแข็งในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า เจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วให้ค่าร้อยละการแยกตัวของน้ำต่ำกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

Arunyanart and Charoenrein (2008) ได้ศึกษาผลของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งพบว่า การแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าวด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถลดร้อยละการแยกตัวของน้ำ การเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ (spongy structure) และค่าความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวได้ดีกว่าการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

Muadklay and Charoenrein (2008) ได้ศึกษาความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง (freeze-thaw stability) ของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังผสมแซนแทนกัมร้อยละ 0, 0.25 และ 0.50 ที่ความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับร้อยละ 5 โดยใช้อัตราการแช่เยือกแข็งเท่ากับ 0.06, 0.09 และ 2.30 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลการทดลองพบว่า การแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าวด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (2.30 องศาเซลเซียสต่อนาที) สามารถลดร้อยละการแยกตัวของน้ำได้มากกว่าการแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (0.09 องศาเซลเซียสต่อนาที) และแบบช้า (0.06 องศาเซลเซียสต่อนาที)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการขัดสีแล้วจาก ห.จ.ก. โรงสีไฟฟ้าพลังงานชุมชน 3 อ.กมลพิสัย จ.กาฬสินธุ์ เก็บเกี่ยวในเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2552

1.2 ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการขัดสีแล้วจาก ห.จ.ก. โรงสีไฟฟ้าพลังงานชุมชน 3 อ.กมลพิสัย จ.กาฬสินธุ์ เก็บเกี่ยวในเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2553

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

2.1.1 หม้อหุงข้าวไฟฟ้า ความจุ 1.8 ลิตร (Hitachi รุ่น R2-PM18)

2.1.2 เครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิกแบบพ่นไนโตรเจนเหลว (Cryogenic cabinet freezer รุ่น Mini Batch Freezer 1000L, Bangkok Industrial Gas Co., Ltd.)

2.1.3 ตู้แช่เยือกแข็ง (Chest freezer) (Sanyo รุ่น SF-C1495)

2.1.4 สายเทอร์โมคอปเปิล (Thermocouple) และเครื่องบันทึกข้อมูล (Data-logger)

2.1.5 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (Sartorius รุ่น BP 3100S, Germany)

2.1.6 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Tempest รุ่น HB 25, Thailand)

2.1.7 ถุงพลาสติกไนลอน (Nylon/Linear low density polyethylene bags, NY/LLDPE)

2.1.8 เครื่องปิดผนึกถุง (Impulse sealer รุ่น PFS-300)

2.1.9 กล้องโฟม

2.1.10 เครื่องปั่นแห้ง (Moulinex รุ่น Y46, France)

2.1.11 ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช (Retsch, Germany)

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ

- 2.2.1 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot Air Oven, Memmert รุ่น ULE500, Germany)
- 2.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, JEOL รุ่น JMS-5600LV, England)
- 2.2.3 เครื่องทำแห้งจุดวิกฤต (Critical Point Dryer, CPD, Energy Beam Sciences รุ่น K850, USA)
- 2.2.4 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC, Pyris-1, perkin Elmer, Norwalk, CT, USA)
- 2.2.5 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA3D, Newport Scientific Instruments & Engineering, Australia)
- 2.2.6 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, Stable Micro System รุ่น TA-Xtplus, UK)
- 2.2.7 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (Kjeldahl Apparatus, Buchi รุ่น B-324, Switzerland)
- 2.2.8 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Tecator รุ่น Soxtec™ Systems HT6 1043, Sweden)
- 2.2.9 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, Thermo Electron Corporation รุ่น GENESYS™10, USA)
- 2.2.10 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace, Gallenkamp รุ่น FSE-261-210D, UK)
- 2.2.11 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Ohaus รุ่น AP210-0, Switzerland)
- 2.2.12 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 กรดแอซิติกล้วน (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

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

3.2.2 คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulphate, Analytical grade, Carlo Erba Reagent, Italy)

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

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

3.2.5 โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulphate, Analytical grade, Carlo Erba Reagent, Italy)

3.2.6 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, Analytical grade, Merck, Germany)

3.2.7 เมทิลเรด (Methyl red, Ajax Finechem, Australia)

3.2.8 โบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol green, Ajax Finechem, Australia)

3.3 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ไขมัน

3.3.1 ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether, Analytical grade, J.T. Baker, USA)

3.4 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ค่าการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายเบส

3.4.1 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, Analytical grade, Merck, Germany)

4. เครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณ และวิเคราะห์ผลทางสถิติ

4.1 โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 12

วิธีการ

1. การเก็บรักษาข้าว

ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ซึ่งเก็บเกี่ยวในเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2553 ถูกเก็บรักษาในรูปของข้าวเปลือกเป็นระยะเวลา 20 วัน หรือ 0.7 เดือน จากนั้นผ่านการขัดสีเป็นข้าวสารจาก ห.จ.ก. โรงสีไฟฟ้าผลิตข้าวรุ่งเรือง 3 อ.กมลพิสัย จ.กาฬสินธุ์ นำข้าวสารที่ได้มาบรรจุแบบสุญญากาศลงในถุงพลาสติกชนิด NY/LLDPE จากนั้นแบ่งข้าวออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 นำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 ± 2 องศาเซลเซียส เพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นภายในเมล็ดข้าวระหว่างการร่อนนำข้าวมาวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆ ข้าวส่วนนี้เป็นตัวอย่างข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือน และส่วนที่ 2 นำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) จนกระทั่งข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือน แล้วจึงนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 ± 2 องศาเซลเซียส ข้าวส่วนนี้เป็นตัวอย่างข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือน สำหรับข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน คือ ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ซึ่งเก็บเกี่ยวในเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2552 ถูกเก็บรักษาในรูปของข้าวเปลือกเป็นระยะเวลา 12 เดือนจึงนำมาขัดสีเป็นข้าวสาร นำข้าวสารที่ได้มาบรรจุแบบสุญญากาศในถุงพลาสติกชนิด NY/LLDPE เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 ± 2 องศาเซลเซียส จนกระทั่งนำมาวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆ ของข้าวเช่นกัน ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำข้าวที่เก็บเกี่ยวในเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2552 และเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2553 มาทำการศึกษา เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลาทำให้ไม่สามารถเก็บรักษาข้าวจนมีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนได้ อย่างไรก็ตามข้าวที่นำมาศึกษาเป็นข้าวที่มาจากพื้นที่การเพาะปลูกเดียวกัน คือ ในบริเวณจังหวัดกาฬสินธุ์ และจังหวัดใกล้เคียง

2. ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อสมบัติทางเคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

2.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเมล็ดข้าว รายละเอียดตามภาคผนวก ก

2.1.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AOAC (2000)

2.1.2 ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีการของ Juliano (1971)

2.1.3 ปริมาณโปรตีน ตามวิธีการของ AOAC (2000)

2.1.4 ปริมาณไขมัน ตามวิธีการของ AOAC (2000)

2.1.5 ปริมาณเถ้า ตามวิธีการของ AOAC (2000)

2.2 ค่าการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายเบส ตามวิธีการของ Juliano and Villareal (1993)

แช่เมล็ดข้าวจำนวน 8 เมล็ดลงในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) ความเข้มข้น 1.7 โมลาร์ ปริมาตร 27 มิลลิลิตร ตั้งที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) นาน 23 ชั่วโมง ค่าการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายเบสสามารถวัดเป็นระดับคะแนน 1 ถึง 7 ดังนี้ คะแนน 1 คือ เมล็ดข้าวยังสมบูรณ์ 2 คือ เมล็ดข้าวเริ่มพองตัว 3 คือ เมล็ดข้าวพองตัวและมีโครงร่างเมล็ดอยู่บ้าง 4 คือ เมล็ดข้าวพองตัวเต็มที่และไม่เห็นโครงร่างเมล็ด 5 คือ เมล็ดข้าวแยกจากกัน 6 คือ เมล็ดข้าวสลายตัวแต่ยังเห็นเนื้อเมล็ดข้าว 7 คือ เมล็ดข้าวสลายตัวหมดโดยไม่เห็นลักษณะเมล็ดข้าวเหลืออยู่ และสามารถแบ่งประเภทข้าวตามระดับอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันได้ 3 ประเภท คือ ระดับคะแนน 6-7 หมายถึง เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำประมาณ 65 องศาเซลเซียส คะแนน 4-5 หมายถึง เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันปานกลางประมาณ 70-74 องศาเซลเซียส และคะแนน 1-3 หมายถึง เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันสูงประมาณ 74.5-79 องศาเซลเซียส (อรอนงค์, 2550)

2.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งข้าว

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าว ด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว (rapid visco analyzer) ตามวิธีการของ AACC (2000) รายละเอียดตามภาคผนวก ข

2.3.2 การเกิดเจลาตินในเซชันด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimetry) คัดแปลงจากวิธีการของ Thirathumthavorn and Charoenrein (2005)

ชั่งตัวอย่างแป้งข้าว 6.0 มิลลิกรัม (โดยน้ำหนักแห้ง) และเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาณร้อยละ 70 ลงในถ้วยใส่ตัวอย่างชนิดสแตนเลส (stainless steel pan) ที่ชั่งน้ำหนักแล้ว ปิดฝาให้สนิท และวางตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์การเกิดเจลาตินในเซชันด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ ให้อุณหภูมิจาก 25 ไปจนถึง 140 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และลดอุณหภูมิของตัวอย่างด้วยอัตรา 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ถ้วยสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอย่างอ้างอิง วิเคราะห์การเกิด

เวลาที่ในเซชันจากอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, T_c) และพลังงานเอนทาลปี (enthalpy, ΔH)

3. ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง

หุงข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีการเก็บรักษา 0.7, 3 และ 12 เดือน ในหม้อหุงข้าวไฟฟ้า โดยใช้อัตราส่วนข้าว : น้ำ เท่ากับ 1 : 1.5 จากนั้นตักข้าวใส่ภาชนะปิดตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลง จนถึงระดับอุณหภูมิห้อง บรรจุข้าวหุงสุก 50 กรัมลงในถุงพลาสติกชนิด NY/LLDPE นำไปแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอเจนิกที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอุณหภูมิใจกลางเมล็ดข้าวเท่ากับ -20 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง ทำการคืนรูปโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 1.5 ชั่วโมง โดยทำซ้ำทั้งหมด 5 รอบ (5 freeze-thaw cycle) นำมาตรวจสอบคุณภาพ ดังนี้

3.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AOAC (2000) รายละเอียดตามภาคผนวก ก

3.2 วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส โดยใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analyzer) โดยการวัดค่าความแข็ง (hardness) และค่าความเหนียว (stickiness) คัดแปลงจากวิธีการของ พรพิสาข์ (2555)

วิธีการวัดแบบเอกซ์ทรูชัน ใช้หัวกดชนิด A/OTC ที่มีขนาดหน้าตัด 49 ตารางเซนติเมตร ใส่ตัวอย่างข้าวจำนวน 50 กรัมลงในเอกซ์ทรูชันเซลล์ จากนั้นเกลี่ยให้เสมอกัน โดยมีสถานะในการวัด ดังนี้

- หัววัดกดลงบนตัวอย่างเป็นระยะทางร้อยละ 70 ของความสูงตัวอย่าง
- ความเร็วก่อนวัด 1 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ความเร็วขณะวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ความเร็วหลังวัด 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

ค่าแรงสูงสุดที่หัววัดกดลงบนตัวอย่างเป็นระยะทางร้อยละ 70 ของความสูงตัวอย่าง คือ ค่าความแข็งและค่าแรงสูงสุดในการถอนหัววัดออกจากฐานคือ ค่าความเหนียว

3.3 ประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสโดยประเมินผลจากการวิเคราะห์แบบเชิงพรรณนา (Quantitative Descriptive Analysis; QDA) โดยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน (trained panels) จำนวน 9 คน และทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบ (preference test) โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน

3.4 ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) คัดแปลงจากวิธีการของ Charoenrein and Preechathamwong (2010)

นำตัวอย่างมาจัดน้ำออกด้วยการนำไปแช่ในเอซิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 50, 70, 90 และเอซิลแอลกอฮอล์ส่วนที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ โดยการแช่ตัวอย่างในแต่ละความเข้มข้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นตัวอย่างไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งจุดวิกฤต (critical point dryer) จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยตรวจสอบพิกัดข้างของเมล็ดข้าวที่กำลังขยาย 35 เท่า

3.5 ตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชัน ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ ตามวิธีการของ Yu *et al.* (2010)

นำตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งแล้วมาแช่ในสารละลายเอทานอลร้อยละ 99 (1: 4 ปริมาตรต่อปริมาตร) เพื่อดึงน้ำออกจากตัวอย่างเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นเทตัวอย่างผ่านกรวยบุชเนอร์ (buchner funnel) อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างข้าวที่แห้งแล้วมาบดแห้งและร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช ซึ่งตัวอย่างแบ่งข้าว 6.0 มิลลิกรัม (โดยน้ำหนักแห้ง) เติมน้ำกลั่น (1: 2 น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ลงในถ้วยใส่ตัวอย่างชนิดสแตนเลสที่ชั่งน้ำหนักแล้ว ปิดฝาให้สนิท และวางตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ โดยให้อุณหภูมิแก่ตัวอย่างคงที่ที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 20 ไปจนถึง 140 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ถ้วยสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอย่างอ้างอิง วิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันจากอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิสุดท้าย และพลังงานเอนทาลปี

4. ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อความคงตัวจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง (freeze-thaw stability) ของเจลแป้งข้าวแช่เยือกแข็ง

นำข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7, 3 และ 12 เดือน โม่แบบแห้งจากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช นำแป้งที่ได้เตรียมเป็นเจลแป้งข้าวความเข้มข้นร้อยละ 11 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) โดยกวนสารแขวนลอยของแป้งข้าว (rice flour suspension) ด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกวนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที นำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที บรรจุเจลแป้งข้าวลงในหลอดฉีดยาปริมาณ 10 มิลลิลิตร สำหรับการวัดร้อยละการแยกตัวของน้ำ และบรรจุลงในถ้วยอะลูมิเนียม (aluminium can) ปริมาณ 60 มิลลิลิตร สำหรับการวัดค่าความแข็งของเจลแป้งข้าว จากนั้นนำไปนึ่งในหม้อนึ่ง เป็นเวลา 9 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งแบบรวดเร็วระบบไครโอจินิก จนกระทั่งอุณหภูมิใจกลางเจลแป้งข้าวที่บรรจุในภาชนะต่างๆ เท่ากับ -20 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง และทำละลายที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) นาน 2 ชั่วโมง โดยทำซ้ำทั้งหมด 5 รอบ (5 freeze-thaw cycle) นำมาตรวจสอบคุณภาพ ดังนี้

4.1 วิเคราะห์ร้อยละการแยกตัวของน้ำของเจลแป้งข้าวที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 ถึง 5 รอบ ตามวิธีการของ Charoenrein *et al.* (2008)

นำเจลแป้งข้าวที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งแล้วออกจากหลอดฉีดยา จากนั้นใส่ลงในหลอดที่มีกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 41 อยู่ข้างใน เพื่อใช้แยกส่วนที่เป็นของเหลวออกจากเจลแป้งข้าว นำหลอดไปหมุนเหวี่ยงในเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 100 xg เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักของเหลวที่แยกออกมาจากเจลแป้งข้าว คำนวณร้อยละการแยกตัวของน้ำ ตามสูตร

$$\text{ค่าร้อยละการแยกของของเหลว} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำที่ถูกเหวี่ยงแยกออกมา} \times 100}{\text{น้ำหนักของเจลแป้งข้าวเริ่มต้น}}$$

4.2 วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส โดยใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส วัดค่าความแข็งของเจลแข็งขาวที่ไม่ได้ผ่านการแช่เยือกแข็งและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบ ตามวิธีการของพิณทิพย์ (2547)

วิธีการวัดแบบกด โดยใช้หัววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 มิลลิเมตร (P25) โดยมีสภาวะในการวัด ดังนี้

- หัววัดกดลงบนตัวอย่างเป็นระยะทางร้อยละ 40 ของความสูงตัวอย่าง
- ความเร็วก่อนวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ความเร็วขณะวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ความเร็วหลังวัด 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

4.3 ตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ของเจลแข็งขาวที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 และ 5 รอบ

นำตัวอย่างที่ผ่านการวิเคราะห์การเกิดเจลในเซชัน (ข้อ 2.3.2) เก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ - 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นทำละลายที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) นาน 2 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ โดยให้อุณหภูมิจาก 25 ไปจนถึง 140 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ถ้วยสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอย่างอ้างอิง วิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันจากอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิสุดท้าย และพลังงานเอนทัลปี

4.4 ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดัดแปลงตามวิธีการของ Charoenrein and Preechathamwong (2010) รายละเอียดดังข้อ 3.4 ที่กำลังขยาย 250 เท่า

5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทุกการทดลอง สิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance;

ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างตัวอย่างด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 12

6. สถานที่ทำการทดลอง

2.4 ห้องปฏิบัติการและอาคารแปรรูปภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.5 หน่วยงานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. ระยะเวลาการทดลอง

ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2554 ถึง เดือนสิงหาคม 2555

8. แหล่งทุนสนับสนุน

ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

1. ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อสมบัติทางเคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าว

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาระยะเวลาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์พบว่า ปริมาณแอมิโลสของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7, 3 และ 12 เดือนมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Villareal *et al.* (1976) และ Noomhorm *et al.* (1997) ส่วนปริมาณองค์ประกอบอื่นๆ คือ โปรตีน พบว่า แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีปริมาณโปรตีนน้อยที่สุด และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับตัวอย่างอื่นๆ อย่างไรก็ตาม แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือนมีปริมาณโปรตีนแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือน ซึ่งผลการทดลองนี้มีความแตกต่างจากการทดลองของ Juliano (1985), Indudhara Swamy *et al.* (1978) และ Noomhorm *et al.* (1997) ที่พบว่า ในระหว่างการเก็บรักษาข้าว ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวมีการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทดลองนี้ ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนเป็นข้าวคนละชุดกับข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 และ 3 เดือน สำหรับปริมาณไขมันในข้าวพบว่า ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 12 เดือนมีปริมาณไขมันมากกว่าและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือน สันนิษฐานว่าเนื่องจาก ในการวิเคราะห์ปริมาณไขมันใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์ในการวิเคราะห์ ซึ่งปิโตรเลียมอีเทอร์มีประสิทธิภาพในการสกัดไขมันส่วนที่เป็นไขมันอิสระ (free lipid) (Finney *et al.*, 1976) ในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมัน ทำให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น (Dhaliwal *et al.*, 1991; Nishiba *et al.*, 2000) ดังนั้นจึงวิเคราะห์ปริมาณไขมันในตัวอย่างข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 12 เดือนได้มากกว่าข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือน ส่วนปริมาณเถ้าพบว่า ข้าวทุกตัวอย่างมีปริมาณเถ้าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ

(หน่วย: ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)

ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าว (เดือน)	ความชื้น*	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	แอมิโลส
0.7	12.56 ^b ± 0.04	7.24 ^a ± 0.09	0.33 ^a ± 0.04	0.35 ^a ± 0.02	21.96 ^a ± 0.20
3	12.77 ^c ± 0.02	7.34 ^a ± 0.03	0.46 ^b ± 0.03	0.35 ^a ± 0.00	21.89 ^a ± 0.81
12	12.29 ^a ± 0.00	7.04 ^b ± 0.03	0.42 ^b ± 0.03	0.33 ^a ± 0.03	20.60 ^a ± 0.56

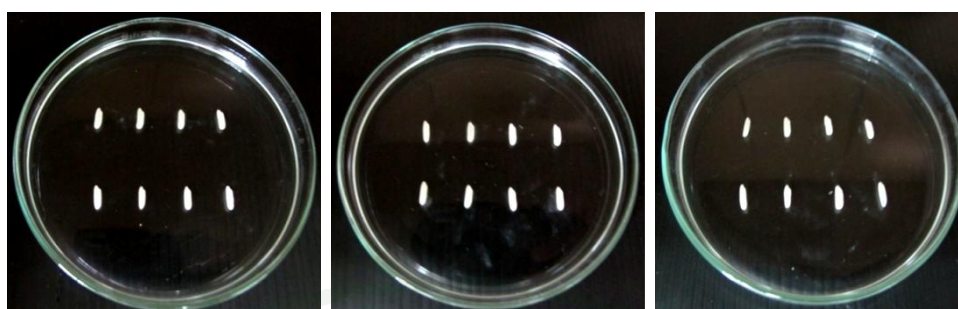
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* หน่วย: ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างในแนวตั้ง หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

1.2 การสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายเบส

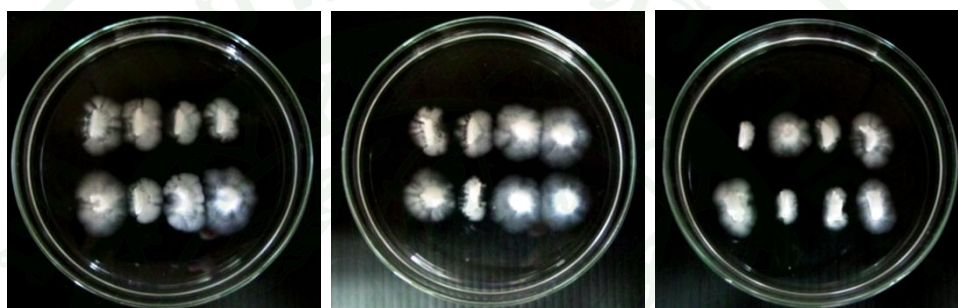
การสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายเบส เป็นวิธีหาอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของข้าวทางอ้อม หลังการแช่ในสารละลายเบสหากเมล็ดข้าวมีการสลายตัวมากแสดงว่ามีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันที่ต่ำกว่าเมล็ดข้าวที่มีการสลายตัวน้อย จากผลการทดลอง (ภาพที่ 11) พบว่า ลักษณะเมล็ดข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือนหลังแช่ในสารละลายเบสมีลักษณะเมล็ดที่พองตัวและสลายตัวมากที่สุด (ภาพที่ 11ง) แต่มีลักษณะไม่แตกต่างจากลักษณะของเมล็ดข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือนมากนัก (ภาพที่ 11จ) อย่างไรก็ตามลักษณะของเมล็ดข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน (ภาพที่ 11ฉ) พบว่า มีลักษณะเมล็ดข้าวที่พองตัวและสลายตัวได้น้อยกว่าเมล็ดข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน แสดงให้เห็นว่าข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงกว่าข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (onset temperature) ของแป้งข้าวเมื่อมีระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวนานขึ้น ซึ่งได้อธิบายไว้ในข้อ 1.3.2



(ก) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
0.7 เดือน ก่อนแช่ในสารละลาย

(ข) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
3 เดือน ก่อนแช่ในสารละลาย

(ค) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
12 เดือน ก่อนแช่ในสารละลาย



(ง) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
0.7 เดือน หลังแช่ในสารละลาย

(จ) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
3 เดือน หลังแช่ในสารละลาย

(ฉ) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
12 เดือน หลังแช่ในสารละลาย

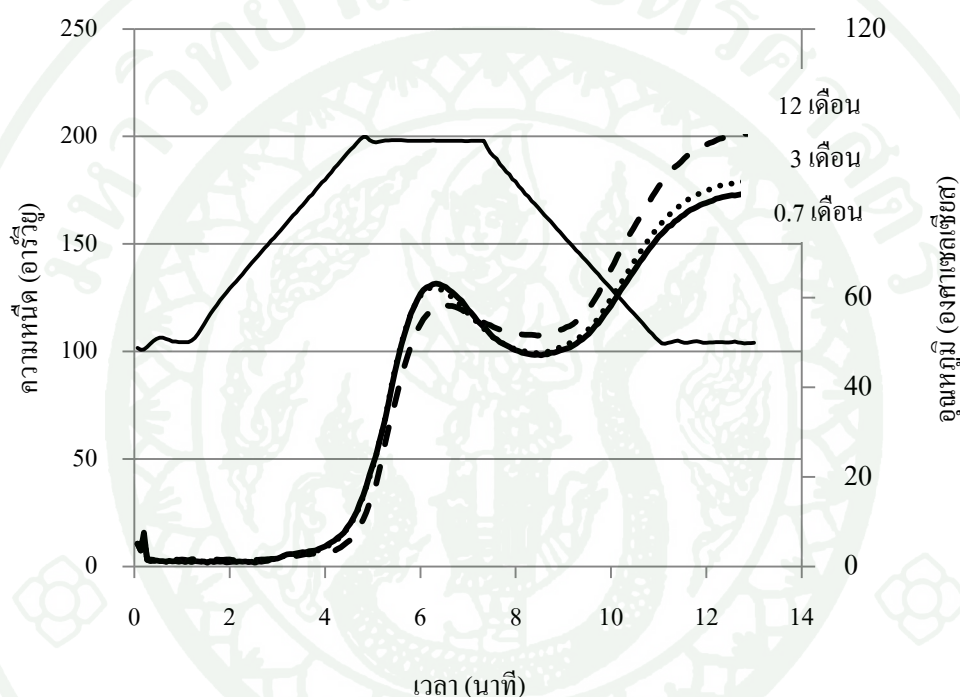
ภาพที่ 11 ลักษณะของเมล็ดข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ ก่อน (ก ข และ ค) และหลังแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.7 โมลาร์เป็นระยะเวลา 23 ชั่วโมง (ง จ และ ฉ)

1.3 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งข้าว

1.3.1 สมบัติด้านความหนืด

การเปลี่ยนแปลงความหนืดเป็นสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ที่สำคัญของแป้ง สามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว ซึ่งวิเคราะห์ค่าต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดลดลง (breakdown) ซึ่งหาได้จากผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และเซตแบค (setback) ซึ่งหาได้จากผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด แสดงดังภาพที่ 12 และตารางที่ 3 จากการวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ พบว่า ในช่วงแรกของการให้ความร้อน

กับส่วนผสมของแป้งและน้ำทั้ง 3 ตัวอย่างไม่มีความหนืดเกิดขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่เมล็ดสตรัซเริ่มดูดน้ำ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดพบว่า แป้งข้าวจากข้าวที่มีอายุการเก็บรักษา 0.7 เดือน มีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 รองลงมาคือ แป้งข้าวจากข้าวที่มีอายุการเก็บรักษา 3 และ 12 เดือนตามลำดับ เนื่องจากเมื่อข้าวถูกเก็บรักษาไว้ระยะเวลานาน เม็ดสตรัซของข้าวจะสามารถดูดน้ำและพองตัวได้ยากขึ้น (Noomhorm *et al.*, 1997; Zhou *et al.*, 2003; Tulyathan and Lecharatanaluk, 2007)



ภาพที่ 12 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ

ตารางที่ 3 ค่าความหนาแน่นของแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว

ระยะเวลาการเก็บรักษา ข้าว (เดือน)	ความหนืด (อาร์วียู)				อุณหภูมิที่เริ่มเกิด ความหนืด (องศาเซลเซียส)
	ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง	ความหนืดสุดท้าย	
0.7	133.36 ^c ± 1.00	96.69 ^a ± 2.54	36.67 ^c ± 1.59	171.64 ^a ± 1.40	87.43 ^a ± 1.92
3	130.06 ^b ± 0.80	97.64 ^a ± 3.08	33.42 ^b ± 1.92	179.25 ^b ± 2.16	89.43 ^{ab} ± 1.30
12	120.22 ^a ± 0.77	104.97 ^b ± 0.34	15.25 ^a ± 0.43	201.25 ^c ± 1.30	91.92 ^b ± 0.98

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่าความหนืดสูงสุด เป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถในการพองตัวอย่างอิสระของ เม็ดสตาร์ชก่อนที่จะแตก (Singh *et al.*, 2003) เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้ง (จาก 50 ถึง 95 องศาเซลเซียส) เม็ดสตาร์ชดูดน้ำและพองตัวเพิ่มขึ้น น้ำบริเวณรอบๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชพองตัวเสียดสีกับเม็ดสตาร์ชข้างเคียง ทำให้ความหนืดของน้ำแป้งเพิ่มขึ้น และเมื่อเม็ดสตาร์ชดูดน้ำและพองตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เกิดการพองตัวได้มากขึ้นจนเกิดความหนืดสูงสุด จากการทดลองพบว่า แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาแตกต่างกันทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าความหนืดสูงสุดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือนมีค่าความหนืดสูงสุดมากที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 12 เดือน ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Tulyathan and Leeharatanaluk (2007) ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยเก็บรักษาข้าวเป็นระยะเวลา 0 ถึง 8 เดือนที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30-35 องศาเซลเซียส) ซึ่งพบว่า เมื่อข้าวผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานมีผลทำให้แป้งข้าวมีค่าความหนืดสูงสุดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงในเมล็ดข้าวระหว่างการเก็บรักษา 2 ประการ คือ 1. การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเอมิโลสและไขมัน ซึ่งจะไปขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนนี้ไปอุดรูบริเวณผิวของเม็ดสตาร์ช ทำให้น้ำไม่สามารถเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชได้ เม็ดสตาร์ชของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษานานจึงพองตัวได้ยากขึ้น และ 2. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโปรตีน ทำให้เกิดพันธะไคซัลไฟด์เชื่อมโยงโมเลกุลของโปรตีนที่อยู่บริเวณรอบเม็ดสตาร์ช ทำให้โปรตีนที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เม็ดสตาร์ชของข้าวจึงพองตัวได้ยากกว่าเม็ดสตาร์ชของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาน้อย

ความหนืดต่ำสุด เป็นความหนืดที่เกิดขึ้นภายหลังการให้ความร้อนและแรงกวน ส่งผลทำให้เม็ดสตาร์ชที่เกิดการเจลาไทไนซ์แล้วแตกออก ความหนืดของเพสต์จึงค่อยๆ ลดลง จากผลการทดลองพบว่า แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 และ 3 เดือน มีค่าความหนืดต่ำสุดมากกว่าแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน เนื่องจากแป้งข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษานานเม็ดสตาร์ชของข้าวมีความแข็งแรง สามารถทนต่อแรงเฉือนได้มากกว่าข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาน้อย (Noomhorm *et al.*, 1997; Zhou *et al.*, 2003; Tulyathan and Leeharatanaluk, 2007)

ความหนืดลดลง การลดลงของความหนืดนี้แสดงถึงความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชต่อการให้ความร้อนและแรงกวนที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างกันขึ้นกับความแข็งแรงหรือ

ความอ่อนแอของเมล็ดสาร์ชที่เกิดการพองตัว (Han and Hamaker, 2001) จากผลการทดลองพบว่า แป้งข้าวทั้ง 3 ตัวอย่างมีความหนืดลดลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยความหนืดลดลงของแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน มีค่าน้อยที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมล็ดสาร์ชของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษานานสามารถทนต่อแรงเฉือนได้มากกว่าเมล็ดสาร์ชของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tulyathan and Lecharatanaluk (2007) ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยเก็บรักษาข้าวเป็นระยะเวลา 0 ถึง 8 เดือนที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30-35 องศาเซลเซียส) ผลการทดลองพบว่า เมื่อข้าวผ่านการเก็บรักษาระยะเวลานานขึ้นมีผลทำให้ความหนืดลดลงของแป้งข้าวมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ความหนืดสุดท้าย เป็นค่าความหนืดที่วัดได้เมื่อเพสท์แป้งผ่านการทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งบ่งบอกถึงความแข็งแรงของเจลที่ได้ จากผลการทดลองพบว่า แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือนมีค่าความหนืดสุดท้ายต่ำกว่าแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 12 เดือน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Noombhorn *et al.* (1997) ที่ได้ศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวต่อสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวเหนียวของไทย 2 พันธุ์ คือ กข 6 และ กข 8 โดยเก็บรักษาข้าวที่อุณหภูมิห้อง (28-30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 8 เดือน ผลการศึกษาพบว่า ข้าวพันธุ์ กข 6 มีค่าความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวที่มากขึ้น สาเหตุที่ความหนืดสุดท้ายของแป้งข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นสันนิษฐานว่ามีความเกี่ยวข้องกับพันธะไดซัลไฟด์ในโมเลกุลโปรตีนที่มีปริมาณมากขึ้นเมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานาน ทั้งนี้เนื่องจาก Hamaker and Griffin (1990) ได้ศึกษาผลของโปรตีนต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวพบว่า การทำลายพันธะไดซัลไฟด์ในเมล็ดสาร์ชข้าวโดยใช้สารไดไธโอไธเรทอล (dithiothreitol) มีผลทำให้ความหนืดสุดท้ายของแป้งข้าวมีค่าลดลง

เซตแบค แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเพสท์แป้งที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลเอมิโลสกลายเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง เป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดรีโทร-เกรเดชันของเอมิโลส จากผลการทดลองพบว่า แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน มีค่าเซตแบคสูงกว่าแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน

1.3.2 การเกิดเจลลิตีในเซชัน

การเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งข้าวเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ โดยแสดงค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (onset temperature; T_o) อุณหภูมิที่เกิดการเจลลิตีในเซชันสูงสุด (peak temperature; T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature; T_c) และค่าพลังงานทั้งหมดในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (enthalpy; ΔH) (ตารางที่ 4 และภาพภาคผนวกที่ 1) ผลการทดลองพบว่า ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 62-78 องศาเซลเซียส และค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชันประมาณ 9-10 จูลต่อกรัมน้ำหนักแป้งแห้ง สอดคล้องกับผลการทดลองของ Yoshihashi *et al.* (2005) ที่พบว่า อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เท่ากับ 63.7 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองพบว่า แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือนมีค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 63-75 องศาเซลเซียส และมีค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชันของข้าวเท่ากับ 9.4 จูลต่อกรัมน้ำหนักแป้งแห้ง ผลการทดลองที่ได้แตกต่างจากการศึกษาของไกรสิทธิ์และคณะ (2554) เล็กน้อย ซึ่งพบว่า อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 57-72 องศาเซลเซียส และมีค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชันของข้าวเท่ากับ 7.79 จูลต่อกรัม ค่าอุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งข้าวที่ต่างกัน สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากข้าวมีอายุการเก็บรักษาแตกต่างกัน ในการทดลองของ Pisithkul *et al.* (2011) ใช้ข้าวใหม่หลังการเก็บเกี่ยวในการศึกษา แต่ในงานวิจัยนี้ข้าวที่นำมาศึกษามีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือน และอาจเนื่องมาจากพื้นที่เพาะปลูกข้าวที่ต่างกัน นอกจากนี้พบว่า แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน มีค่าอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายและค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชันมากกว่าแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bolling *et al.* (1978) และ Teo *et al.* (2000) ที่พบว่า ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษานานมีอุณหภูมิและค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า แป้งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษานาน (12 เดือน) สามารถเกิดการเจลลิตีในเซชันได้ยากกว่าแป้งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาน้อย (0.7 และ 3 เดือน) สันนิษฐานว่าเนื่องจากโมเลกุลโปรตีนที่อยู่รอบเมล็ดสตาร์ชของข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา คือสายโมเลกุลโปรตีนออริซานินซึ่งเป็นโปรตีนหลักในข้าว เกิดการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ทำให้โปรตีนออริซานินที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นและโปรตีนออริซานินที่มีมวลโมเลกุลขนาดเล็กมีปริมาณ

ลดลง (Chrastil and Zarin, 1992; Tulyathan and Leecharatanaluk, 2007) มีผลให้เม็ดสตาร์ชดูดน้ำและพองตัวได้ยากขึ้น การเกิดเจลลิตีในเซชันของเม็ดสตาร์ชในแป้งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษานานจึงเกิดเจลลิตีในเซชันได้ยากกว่าแป้งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาน้อย ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืด คือ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของแป้งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่ามากกว่าแป้งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน ตามลำดับ และสอดคล้องกับค่าการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายเบส ซึ่งข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนสามารถสลายตัวในสารละลายเบสได้น้อยกว่าข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน

ตารางที่ 4 การเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ

ระยะเวลาการเก็บ รักษาข้าว (เดือน)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			ΔH (จุลต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)
	T_o	T_p	T_c	
0.7	$63.3^a \pm 0.8$	$69.0^a \pm 0.2$	$75.4^a \pm 0.2$	$9.4^a \pm 0.4$
3	$62.3^a \pm 0.0$	$68.4^a \pm 0.3$	$75.2^a \pm 0.6$	$9.4^a \pm 0.3$
12	$65.1^b \pm 0.7$	$72.0^b \pm 0.5$	$78.3^b \pm 0.2$	$10.6^b \pm 0.4$

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

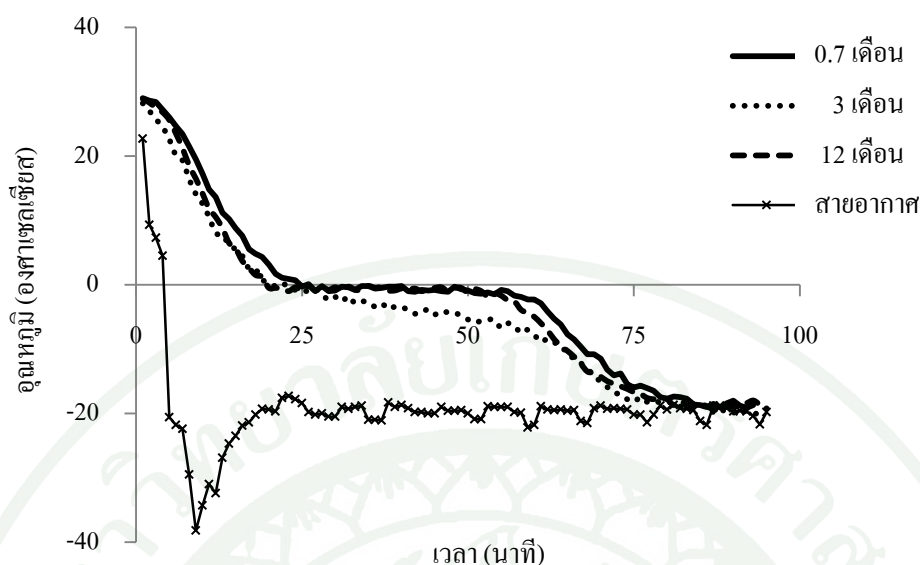
T_o , T_p , T_c และ ΔH คือ อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิสุดท้าย และค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน ตามลำดับ

2. ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง

งานวิจัยในส่วนนี้ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง โดยแช่เยือกแข็งข้าวหุงสุกด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิกที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อไม่ให้เกิดสภาพเย็นยวดยิ่ง (undercooling phenomenon) ซึ่งคือปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิของตัวอย่างลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็งแต่ยังไม่เกิดผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมีโครงสร้างภายในที่ไม่สม่ำเสมอ (Charoenrein and Preechathamwong, 2010)

จากนั้นนำข้าวหุงสุกไปเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง ทำการคืนรูปโดยใช้อ่างน้ำความคมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1.5 ชั่วโมง โดยทำซ้ำทั้งหมด 5 รอบ (5 freeze-thaw cycles) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใจกลางของ ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ ขณะที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิกแสดงดังภาพที่ 13 ซึ่งรูปแบบกราฟของตัวอย่างทั้ง 3 มีลักษณะไม่แตกต่างกัน

การแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็ง เป็นวิธีการที่ทำให้ให้น้ำในอาหารเกิดการตกผลึกเป็นผลึกน้ำแข็งแล้วหลอมละลาย และเกิดเป็นผลึกใหม่ขึ้นอีก เป็นสภาวะจริงที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในระยะเวลาการเก็บรักษา และการขนส่งผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ช่วยเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของระบบที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก (Biliaderis, 1998; Jacobson and BeMiller, 1998; Brennan *et al.*, 2004) เนื่องจากการเกิดอิทธิฤทธิ์ระหว่างโมเลกุลของสตาร์ช และการเกิดการตกผลึกของน้ำแข็งใหม่ (ice recrystallization) (Bevilacqua and Zaritzky, 1982) โดยการเกิดการตกผลึกของน้ำแข็งใหม่ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อทำละลายน้ำแข็งจะเกิดการแยกตัวของน้ำออกจากตัวอย่างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลของสตาร์ชมีโอกาสอยู่ใกล้กันมากขึ้นทำให้สามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากขึ้น มีผลทำให้ตัวอย่างมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งมากขึ้น โดยปริมาณการแยกตัวของน้ำและค่าความแข็งของตัวอย่างที่เพิ่มมากขึ้นเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงแนวโน้มการเกิด รีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (Karim *et al.*, 2000) ในงานวิจัยส่วนนี้ไม่ได้วิเคราะห์ปริมาณการแยกตัวของน้ำในข้าวหุงสุกหลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง เนื่องจากการทดลองเบื้องต้นแล้วว่าวิธีการหมุนเหวี่ยงร่วมกับการกรอง (centrifugation-filtration method) ตามวิธีการของ Charoenrein *et al.* (2008) ไม่สามารถวิเคราะห์การแยกตัวของน้ำได้ เนื่องจากปริมาณน้ำที่อยู่ในข้าวหุงสุกมีน้อยเกินไปจึงทำให้ไม่เกิดการแยกตัวของน้ำออกมาชัดเจน แต่ได้ศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงแนวโน้มของการเกิดรีโทรเกรเดชันได้



ภาพที่ 13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใจกลางของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ ขณะที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิก

2.1 ปริมาณความชื้นของข้าวหุงสุก

ปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1 ถึง 5 รอบแสดงดังตารางที่ 5 ผลการทดลองพบว่า ร้อยละปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวหุงสุกทุกทั้งก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังคั้นรูปจากเยือกแข็งมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 60 ถึง 63 อย่างไรก็ตามพบว่า ร้อยละปริมาณความชื้นของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่าน้อยกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือนทั้งก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังคั้นรูปจากเยือกแข็ง เนื่องมาจากความสามารถในการควบแน่นที่ลดลงของเม็ดสตาร์ชของข้าวเมื่อข้าวมีระยะเวลาในการเก็บรักษานาน (Noomhorm *et al.*, 1997; Zhou *et al.*, 2003; Tulyathan and Leeharatanaluk, 2007) เป็นผลให้ปริมาณความชื้นในข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างอื่น เมื่อข้าวหุงสุกผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งไม่พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการทำละลายข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งใช้อุณหภูมิในการทำละลายไม่สูงมาก คือ 30 องศาเซลเซียส จึงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละปริมาณความชื้นของข้าวหุงสุกหลังผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งไม่ชัดเจน

ตารางที่ 5 ร้อยละปริมาณความชื้นของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังการคั่วรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ

ระยะเวลาการเก็บรักษา ข้าว (เดือน)	การคั่วรูปจากเยือกแข็งรอบที่				
	1	2	3	4	5
0.7	61.69 ^{aA} ± 0.34	62.65 ^{aA} ± 0.36	62.80 ^{aA} ± 1.10	62.31 ^{aA} ± 1.07	62.48 ^{bA} ± 0.46
3	61.99 ^{aA} ± 0.48	62.69 ^{aA} ± 0.62	61.96 ^{aA} ± 0.31	62.02 ^{aA} ± 0.55	61.64 ^{abA} ± 0.41
12	60.71 ^{aA} ± 0.55	61.94 ^{aA} ± 0.88	61.54 ^{aA} ± 0.32	61.48 ^{aA} ± 0.43	61.15 ^{aA} ± 0.20

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2.2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก

ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จัดอยู่ในข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำถึงปานกลาง คือ ปริมาณแอมิโลสร้อยละ 12-20 (Juliano, 1992; Prathepha *et al.*, 2005) เมื่อนำข้าวขาวดอกมะลิ 105 มาหุงสุกจึงให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกที่นุ่มและเหนียว จากงานวิจัยนี้ปริมาณแอมิโลสของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 อยู่ในช่วงร้อยละ 20-22 โดยข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7, 3 และ 12 เดือนมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 21.96, 21.89 และ 20.60 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ปริมาณแอมิโลสที่วิเคราะห์ได้นี้มีความแตกต่างจากการศึกษาของ Chaichaw *et al.* (2011) ที่พบว่า ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 17.35 สันนิษฐานว่าอาจเนื่องมาจากพื้นที่การเพาะปลูกข้าวที่ต่างกัน

ค่าความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังคืนรูปจากแช่เยือกแข็งแสดงดังตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ก่อนการแช่เยือกแข็ง ตัวอย่างทั้ง 3 มีค่าความแข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน มีค่าความแข็งมากที่สุด รองลงมาคือ ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน ตามลำดับ ด้านความเหนียวของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งพบว่า ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 และ 3 เดือนมีค่าความเหนียวแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อย่างไรก็ตามพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากค่าความเหนียวของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน แสดงให้เห็นว่าข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือนยังคงมีคุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัส โดยเฉพาะความเหนียวของข้าวใกล้เคียงกับข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือน จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกคือ ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษานานจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งมากกว่า และเหนียน้อยกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลโปรตีนในข้าวระหว่างการเก็บรักษา คือ มีปริมาณพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มมากขึ้น ทำให้โปรตีนที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น (Chrastil and Zarin, 1992; Tulyathan and Leecharatanaluk, 2007) ซึ่งเป็นไปได้ว่าจำนวนพันธะไดซัลไฟด์ที่เพิ่มมากขึ้น และโปรตีนที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ขัดขวางการควบแน่นของเม็ดสตาร์ช มีผลให้ข้าวหุงสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็ง (Hamaker and Griffin, 1993; Zhou *et al.*, 2002) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ohno and Ohisa (2005) ซึ่งวิเคราะห์โปรตีนที่สกัดมาจากผิวชั้นนอกของข้าวด้วยเทคนิคเจลอิเล็กโตรโฟเรซิส พบว่า โปรตีนที่อยู่บริเวณชั้นนอกของเมล็ดข้าวเก่าเกิดการออกซิเดชันมากกว่าข้าวใหม่ และ

Tulyathan and Leecharatanaluk (2007) ได้วิเคราะห์รูปแบบโปรตีนของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0, 5 และ 8 เดือนด้วยเทคนิคเจลอิเล็กโทรโฟเรซิสพบว่า แถบของโปรตีนที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 8 และ 5 เดือนมีความเข้มของแถบมากกว่าข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0 เดือน แสดงให้เห็นว่าเมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น โปรตีนที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเอมิโลสและไขมันในระหว่างการเก็บรักษาข้าว มีผลทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกมีความแข็งเช่นกัน (Sodhi *et al.*, 2003)

เมื่อตัวอย่างข้าวหุงสุกผ่านการแช่เยือกแข็งและคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ พบว่าทุกตัวอย่างมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านจำนวนรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น โดยตัวอย่างข้าวหุงสุกเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบ มีค่าความแข็งมากกว่าตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งแต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อข้าวหุงสุกผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 และ 2 พบว่า ค่าความแข็งของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่ามากกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งของข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 3 ถึง 5 รอบพบว่า ค่าความแข็งของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่ามากกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน แต่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญร้อยละ 95 สำหรับค่าความเหนียวของข้าวหุงสุกหลังผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งพบว่า ค่าความเหนียวของข้าวหุงสุกทุกตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อมีจำนวนรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็งเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ในการคั้นรูปข้าวหุงสุกจากแช่เยือกแข็งจำนวน 1 ถึง 5 รอบ ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7, 3 และ 12 เดือนมีค่าความเหนียวแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มจำนวนรอบของการคั้นรูปจากแช่เยือกแข็งมีผลทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลของสตาร์ชมากขึ้น โดยเฉพาะเอมิโลสซึ่งสายโซ่เอมิโลสมีลักษณะเป็นเชิงเส้นโมเลกุลจึงสามารถรวมตัวกันใหม่ได้ง่าย ส่วนสายโซ่เอมิโลเพกทินมีลักษณะเป็นเชิงกิ่งทำให้เกิดการรวมตัวกันได้ยากกว่า (Taub and Singh, 1998) การเกิดรีโทรเกรเดชันของเอมิโลสส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก โดยทำให้ข้าวหุงสุกมีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นส่วนความเหนียวมีค่าลดลง

ตารางที่ 6 ค่าความแข็ง (นิวตัน) ของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ

ระยะเวลาการเก็บรักษา ข้าว (เดือน)	การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่				
	1	2	3	4	5
0.7	120.53 ^{aA} ± 5.33	142.11 ^{aA} ± 11.51	181.45 ^{aB} ± 7.11	217.30 ^{aC} ± 16.78	238.63 ^{aC} ± 13.32
3	140.75 ^{bA} ± 0.53	146.74 ^{bA} ± 2.60	196.24 ^{aBB} ± 13.55	228.18 ^{aBC} ± 11.90	239.91 ^{aC} ± 21.15
12	152.93 ^{cA} ± 3.37	176.72 ^{bA} ± 13.40	221.37 ^{bB} ± 6.37	235.67 ^{aB} ± 12.28	276.53 ^{aC} ± 15.80

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละตัว หมายถึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละตัว หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 7 ค่าความเหนียว (นิวตัน) ของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ

ระยะเวลาการเก็บรักษา ข้าว (เดือน)	การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่					
	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	1	2	3	4	5
0.7	38.43 ^{aD} ± 2.19	45.59 ^{aE} ± 3.14	33.08 ^{aC} ± 2.07	16.84 ^{aB} ± 1.41	2.63 ^{aA} ± 0.70	1.21 ^{aA} ± 0.55
3	39.94 ^{aC} ± 3.03	37.86 ^{aC} ± 4.93	28.28 ^{aB} ± 3.91	6.94 ^{aA} ± 5.30	3.56 ^{bA} ± 0.96	1.10 ^{aA} ± 0.40
12	35.42 ^{bB} ± 0.59	37.16 ^{aB} ± 8.81	27.11 ^{aB} ± 5.13	7.77 ^{aA} ± 4.83	0.84 ^{aA} ± 0.40	0.63 ^{aA} ± 0.11

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแนวตั้ง หมายความว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันแนวนอน หมายความว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2.3 ประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัส

ผลการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1-3 รอบ จากผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 9 คน อายุระหว่าง 23-55 ปี แสดงดังตารางที่ 8 เมื่อพิจารณาค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งพบว่า ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญร้อยละ 95 โดยความแข็งของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือนและ 0.7 เดือน ตามลำดับ ส่วนค่าความเหนียวของข้าวหุงสุกพบว่า ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่าความเหนียวน้อยที่สุด รองลงมาคือ ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือนและ 0.7 เดือน ตามลำดับ และเมื่อข้าวหุงสุกผ่านการแช่เยือกแข็งและคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1-3 รอบพบว่า ข้าวหุงสุกทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นส่วนความเหนียวมีค่าลดลงตามจำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกทั้ง 3 ตัวอย่างหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบมีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง และในทุกๆ รอบของการคืนรูปจากเยือกแข็ง ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่าความแข็งมากกว่าและความเหนียวน้อยกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน ตามลำดับ ซึ่งผลการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสจากผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนมีความสอดคล้องกับค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกที่ทดสอบด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส

ผลการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1-3 รอบด้านความแข็งและความเหนียวจากผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน อายุระหว่าง 23-55 ปี แสดงดังตารางที่ 9 จากผลการทดสอบพบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกลดลงเมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นและมีจำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น กล่าวคือ ผู้ทดสอบชอบข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือนมากกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 12 เดือน และเมื่อข้าวหุงสุกผ่านรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้นมีผลทำให้ผู้ทดสอบมีความชอบลดลง อย่างไรก็ตามพบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกทุกตัวอย่างหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากตัวอย่างข้าวหุงสุก

ก่อนการแช่เยือกแข็ง แสดงว่าผู้บริโภครยังสามารยยอมรับข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบได้ แต่หากข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งผ่านรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็งมากกว่า 1 รอบอาจส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคได้

ตารางที่ 8 การประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1 ถึง 3 รอบ

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าว (เดือน)	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่		
			1	2	3
ความแข็ง	0.7	2.2 ^{aA} ± 1.5	2.4 ^{aA} ± 1.6	4.3 ^{aB} ± 1.5	5.9 ^{aC} ± 2.3
	3	2.8 ^{bA} ± 1.7	3.8 ^{bA} ± 2.2	5.4 ^{bB} ± 2.5	6.7 ^{bC} ± 2.8
	12	3.4 ^{cA} ± 1.6	4.7 ^{bAB} ± 2.5	5.6 ^{bBC} ± 2.9	6.7 ^{bC} ± 3.1
ความเหนียว	0.7	8.1 ^{cC} ± 1.3	7.4 ^{cC} ± 1.3	5.4 ^{cB} ± 2.0	3.8 ^{bA} ± 1.5
	3	7.0 ^{bC} ± 1.3	6.1 ^{bC} ± 1.8	4.0 ^{bB} ± 1.5	2.8 ^{abA} ± 1.3
	12	5.7 ^{aB} ± 1.8	5.0 ^{aB} ± 2.2	2.6 ^{aA} ± 1.1	2.4 ^{aA} ± 1.2

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวในแต่ละคุณลักษณะ หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละแถวในแต่ละคุณลักษณะ หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สเกลคะแนน 0 - 15 โดยคะแนนต่ำ หมายถึง ตัวอย่างมีความแข็งและความเหนียวน้อย และคะแนนสูง หมายถึง ตัวอย่างมีความแข็งและความเหนียวมาก

ตารางที่ 9 การประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของข้าวหุงสุกก่อนการแช่
เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 ถึง 3 รอบ

คุณภาพทาง ประสาท สัมผัส	ระยะเวลาการ เก็บรักษาข้าว (เดือน)	ก่อนการ แช่เยือกแข็ง	การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่		
			1	2	3
ความแข็ง	0.7	7.5 ^{bc} ± 1.3	6.8 ^{bb} ± 1.6	6.2 ^{bb} ± 2.0	4.5 ^{ba} ± 1.8
	3	6.7 ^{abc} ± 1.6	7.0 ^{bc} ± 1.3	5.9 ^{bb} ± 2.2	4.0 ^{abA} ± 1.7
	12	6.2 ^{aC} ± 1.9	6.0 ^{aC} ± 1.9	4.5 ^{aB} ± 2.1	3.4 ^{aA} ± 1.4
ความเหนียว	0.7	7.2 ^{bc} ± 1.5	6.7 ^{abc} ± 1.9	6.3 ^{bb} ± 1.5	4.4 ^{ba} ± 1.7
	3	6.8 ^{abc} ± 1.7	7.1 ^{aC} ± 1.3	6.0 ^{bb} ± 1.8	4.1 ^{abA} ± 1.6
	12	6.4 ^{aC} ± 1.4	6.6 ^{aC} ± 1.7	4.7 ^{aB} ± 2.0	3.8 ^{aA} ± 1.5

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวในแต่ละคุณลักษณะ หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละแถวในแต่ละคุณลักษณะ หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

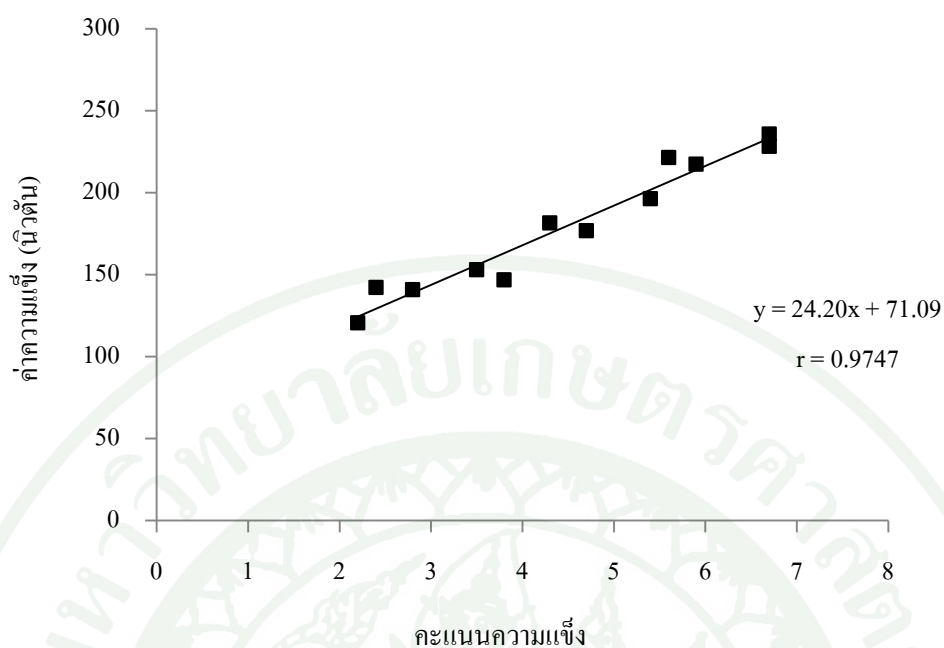
คะแนน 1-9 โดย 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 คือ ชอบมากที่สุด

2.4 ความสัมพันธ์ของลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียวที่ได้จากเครื่องวัด
ลักษณะเนื้อสัมผัสและจากการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบเชิงพรรณนา

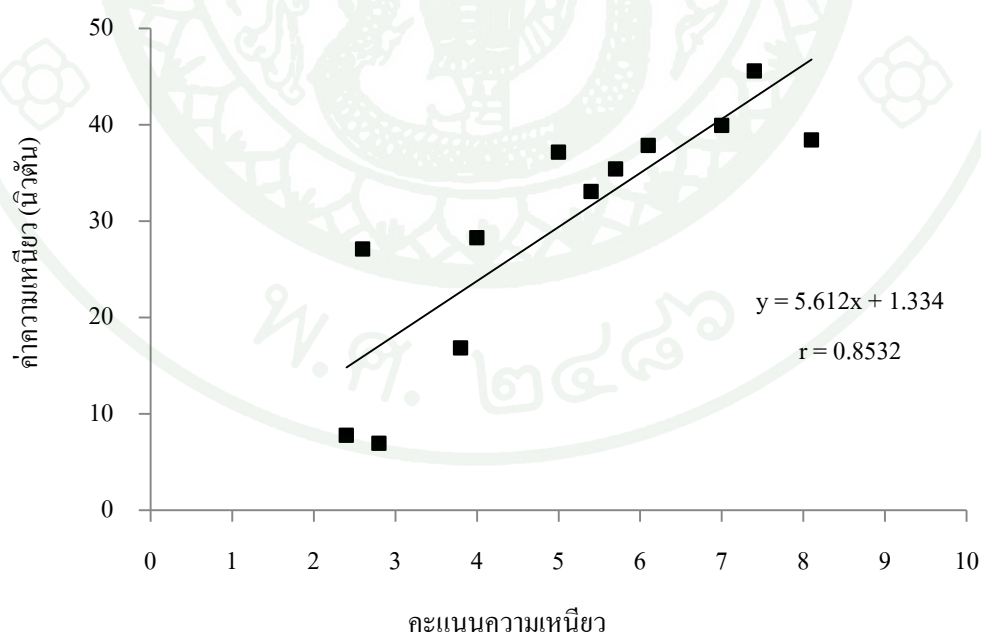
วิธีการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารแบ่งได้ 2 แบบ คือ การวัดด้วยเครื่องมือและการประเมินทางประสาทสัมผัส การวัดด้วยเครื่องมือมีข้อดี คือ สามารถบันทึกผลเป็นตัวเลขได้และวัดซ้ำได้โดยให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน มีความผิดพลาดน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการประเมินทางประสาทสัมผัส อย่างไรก็ตาม การวัดด้วยเครื่องมือมีข้อเสียหลายประการ คือ เครื่องมือมีราคาแพงและไม่สามารถวัดได้ทุกลักษณะเนื้อสัมผัส เนื่องจากลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารเป็นลักษณะผสมร่างกายเท่านั้นจะสามารถสัมผัสกับลักษณะผสมได้ ด้วยเหตุนี้การวัดด้วยเครื่องมือมักทำควบคู่กับการประเมินทางประสาทสัมผัส และนำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์กัน อย่างไรก็ตาม การประเมิน

ทางประสาทสัมผัสมีข้อจำกัดที่เกิดจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อม สภาพร่างกาย และความไม่แน่นอนของสิ่งที่ผู้ทดสอบถือเป็นมาตรฐาน นอกจากนี้ความลำเอียงก็มีส่วนทำให้ผลการประเมินมีความผิดพลาดมาก การฝึกฝนผู้ทดสอบด้วยวิธีการที่เหมาะสม และมีหลักการประเมินที่ดีจะช่วยให้การประเมินทางประสาทสัมผัสมีความแม่นยำขึ้น (ณรงค์, 2537)

ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส และการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบเชิงพรรณนาของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งและข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-3 รอบ แสดงเป็นกราฟเส้นตรง ดังภาพที่ 14 และ 15 ตามลำดับ โดยภาพที่ 14 แกน x แสดงถึง คะแนนความแข็งที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบเชิงพรรณนา และแกน y แสดงถึง ค่าความแข็งที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส ส่วนภาพที่ 15 แกน x แสดงถึง คะแนนความเหนียวที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบเชิงพรรณนา และแกน y แสดงถึง ค่าความเหนียวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส จากการวิเคราะห์หาค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งและข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-3 รอบ พบว่า ลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส และการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบเชิงพรรณนามีความสัมพันธ์กันอย่างสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.9747 และ 0.8532 ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งและความเหนียวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัสแปรผันตามกับคะแนนความแข็งและความเหนียวที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบเชิงพรรณนา กล่าวคือ เมื่อคะแนนความแข็งที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบเชิงพรรณนาหลังจากตัวอย่างข้าวหุงสุกผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัสก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ตามสมการเส้นตรง $y = 24.20x + 71.09$ และเมื่อคะแนนความเหนียวที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบเชิงพรรณนาหลังจากตัวอย่างข้าวหุงสุกผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งลดลง ค่าความเหนียวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัสก็ลดลงเช่นกัน ตามสมการเส้นตรง $y = 5.612x + 1.334$ ความสัมพันธ์ที่ได้นี้สามารถยืนยันผลของการคืนรูปจากเยือกแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส และคะแนนความแข็งจากการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบเชิงพรรณนา

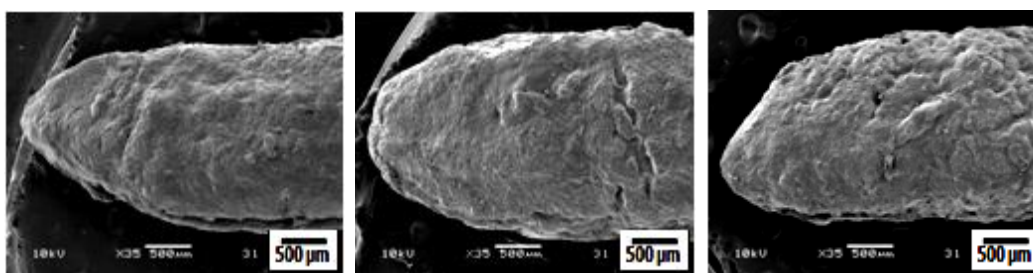


ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส และคะแนนความเหนียวจากการประเมินทางประสาทสัมผัสแบบเชิงพรรณนา

2.5 โครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวหุงสุก

การทดลองนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกกับโครงสร้างระดับจุลภาค (microstructure) ของข้าวหุงสุกหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งจะทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างของข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและคืนรูปจากเยือกแข็ง

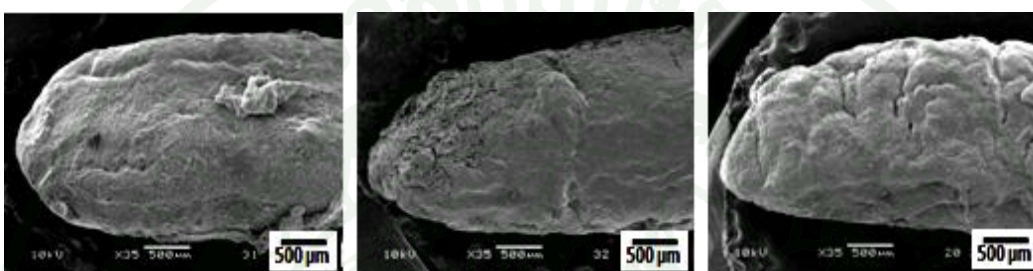
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 และ 5 รอบ แสดงดังภาพที่ 16 จากภาพแสดงให้เห็นว่า ก่อนการแช่เยือกแข็งตัวอย่างข้าวหุงสุกมีลักษณะผิวที่ค่อนข้างเรียบ อย่างไรก็ตาม ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาเก็บรักษา 12 เดือนพบว่า มีลักษณะผิวที่ขรุขระมากกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน (ภาพที่ 16ค) หลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 บริเวณผิวของตัวอย่างข้าวหุงสุกทุกตัวอย่างมีลักษณะขรุขระเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาเก็บรักษา 12 เดือนพบว่า มีลักษณะผิวดังที่ขรุขระมากกว่าตัวอย่างอื่น (ภาพที่ 16ค) นอกจากนี้จากภาพที่ 16 ช-ญ ซึ่งเป็นภาพบริเวณผิวของข้าวหุงสุกหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ จะเห็นได้ว่าลักษณะผิวของตัวอย่างข้าวหุงสุกมีความขรุขระมากยิ่งขึ้น โดยข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน มีลักษณะผิวที่ขรุขระมากกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือนและ 0.7 เดือนอย่างเห็นได้ชัด ลักษณะผิวของข้าวหุงสุกที่ขรุขระ สันนิษฐานว่ามาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชจึงทำให้เกิดลักษณะดังกล่าวขึ้น ลักษณะผิวของข้าวหุงสุกที่ขรุขระมาก อาจเนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชที่มากขึ้น ซึ่งภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวตัวอย่างข้าวหุงสุกมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งคือ ข้าวหุงสุกที่ผ่านรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้นจะเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชมากขึ้นส่งผลให้ข้าวหุงสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความแข็งมากขึ้นและมีความเหนียวน้อยลง



(ก) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
0.7 เดือน ก่อนการแช่เยือกแข็ง

(ข) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
3 เดือน ก่อนการแช่เยือกแข็ง

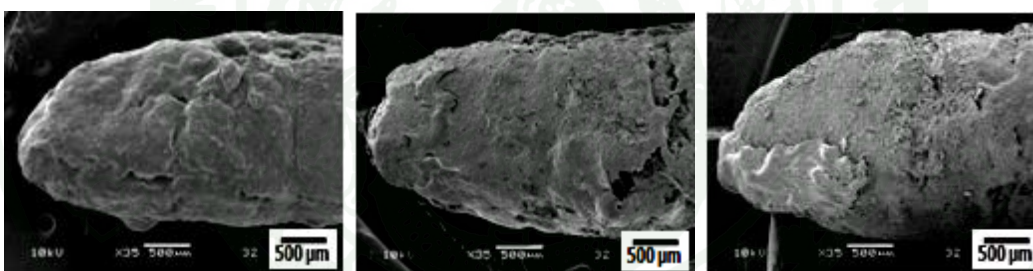
(ค) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
12 เดือน ก่อนการแช่เยือกแข็ง



(ง) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
0.7 เดือน หลังการคั้นรูปจาก
เยือกแข็งรอบที่ 1

(จ) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
3 เดือน หลังการคั้นรูปจาก
เยือกแข็งรอบที่ 1

(ฉ) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
12 เดือน หลังการคั้นรูปจาก
เยือกแข็งรอบที่ 1



(ช) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
0.7 เดือน หลังการคั้นรูปจาก
เยือกแข็งรอบที่ 5

(ฌ) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
3 เดือน หลังการคั้นรูปจาก
เยือกแข็งรอบที่ 5

(ญ) ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา
12 เดือน หลังการคั้นรูปจาก
เยือกแข็งรอบที่ 5

ภาพที่ 16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง (ก-ค) หลังผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบ (ง-ฉ) และ 5 รอบ (ช-ญ) ของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือน 3 เดือน และ 12 เดือน ตามลำดับ (กำลังขยาย 35 เท่า, สเกล = 500 ไมโครเมตร)

2.6 การเกิดรีโทรเกรดชันของข้าวหุงสุก

การเกิดรีโทรเกรดชันของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ แสดงดังตารางที่ 10 และภาพภาคผนวกที่ 2-25 โดยแสดงค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายผลึกรีโทรเกรด (onset temperature; T_o) อุณหภูมิที่เกิดการสลายผลึกรีโทรเกรดสูงสุด (peak temperature; T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการสลายผลึกรีโทรเกรด (conclusion temperature; T_c) และค่าพลังงานในการสลายผลึกรีโทรเกรด (enthalpy; ΔH) จากผลการทดลองพบว่า ช่วงอุณหภูมิในการสลายผลึกรีโทรเกรดอยู่ในช่วงประมาณ 49-62 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงของการเกิดรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกทิน (Biliaderis, 1992; Alonso and Escriing, 1999) สอดคล้องกับการทดลองของพรพิสาข์ (2555) ที่ได้ศึกษาการเกิดรีโทรเกรดชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง และคืนรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบ พบว่า ช่วงอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกทินอยู่ในช่วงประมาณ 49-65 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่าช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายผลึกที่เกิดจากรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกทินมีช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างจากการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชซึ่งมีช่วงประมาณ 62-78 องศาเซลเซียส เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่เกิดจากรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกทินมีความแตกต่างจากโครงสร้างผลึกที่มีอยู่เดิมในเม็ดสตาร์ช (Karim *et al.*, 2000) และการสลายผลึกที่เกิดจากรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกทินเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าการเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชเนื่องมาจากโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นใหม่จากการเกิดรีโทรเกรดชันมีการจัดเรียงกันของโมเลกุลเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้ความเป็นผลึกและความเสถียรลดลง โครงสร้างผลึกไม่แข็งแรงจึงสามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า (Yuan *et al.*, 1993; Ward *et al.*, 1994; Sasaki *et al.*, 2000; Sodhi and Singh, 2003)

จากการวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรดชันของตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบพบว่า ไม่ปรากฏผลการเกิดรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกทินในตัวอย่างข้าวหุงสุกทุกตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบ อาจเนื่องมาจากระยะเวลาการเก็บรักษาไม่ยาวนานเพียงพอสำหรับการเกิดรีโทรเกรดชันของแอมิโลเพกทิน อย่างไรก็ตามได้ตรวจพบการเกิดรีโทรเกรดชันเมื่อตัวอย่างข้าวหุงสุกผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 3 และ 5 รอบ โดยเมื่อข้าวหุงสุกผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3 พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายผลึกแอมิโลเพกทินรีโทรเกรดของข้าวหุงสุกทุกตัวอย่าง

แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เกิดการการสลายผลึกเอมิโลเพกทินรีโทรเกรดสูงสุดพบว่า ตัวอย่างข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีอุณหภูมิที่เกิดการการสลายผลึกเอมิโลเพกทินรีโทรเกรดสูงสุดสูงกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นอกจากนี้ในตัวอย่างข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนยังพบว่า มีค่าพลังงานในการสลายผลึกเอมิโลเพกทินรีโทรเกรดมากกว่าในตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงให้เห็นว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษานานเกิดรีโทรเกรดเด่นจากการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็งได้มากกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาน้อย เมื่อข้าวหุงสุกผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบพบว่า ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการสลายผลึกเอมิโลเพกทินรีโทรเกรดมากกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือน อย่างไรก็ตาม ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการสลายผลึกเอมิโลเพกทินรีโทรเกรดของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือน

เมื่อเปรียบเทียบการเกิดรีโทรเกรดเด่นของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 3 และ 5 รอบพบว่า ตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบมีค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายผลึกเอมิโลเพกทินรีโทรเกรดมากกว่าตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 3 รอบ แสดงให้เห็นว่าเมื่อตัวอย่างผ่านรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้นมีผลให้ตัวอย่างเกิดรีโทรเกรดเด่นมากขึ้น สอดคล้องกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวตัวอย่างข้าวหุงสุก (ภาพที่ 16) ซึ่งพบว่า ข้าวหุงสุกมีลักษณะผิวที่ขรุขระมากขึ้นเมื่อผ่านจำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น นอกจากนี้ผลการทดลองยังมีความสอดคล้องกับลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกที่มีความแข็งเพิ่มมากขึ้นเมื่อตัวอย่างผ่านรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น

ตารางที่ 10 การเกิดรีโทรเกรดชันของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบ

การคืนรูป จากเยือกแข็ง รอบที่	ระยะเวลาการ เก็บรักษาข้าว (เดือน)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			ΔH (จุลต่อ กรัม น้ำหนัก แห้ง)
		T_o	T_p	T_c	
ก่อนการ แช่เยือกแข็ง	0.7	nd	nd	nd	nd
	3	nd	nd	nd	nd
	12	nd	nd	nd	nd
1	0.7	nd	nd	nd	nd
	3	nd	nd	nd	nd
	12	nd	nd	nd	nd
3	0.7	$49.6^a \pm 0.3$	$54.7^a \pm 0.0$	$59.7^a \pm 0.0$	$1.7^a \pm 0.2$
	3	$49.8^a \pm 0.1$	$54.8^a \pm 0.1$	$59.6^a \pm 0.4$	$1.7^a \pm 0.1$
	12	$50.0^a \pm 0.4$	$55.9^b \pm 0.2$	$61.6^b \pm 0.0$	$3.4^b \pm 0.0$
5	0.7	$50.3^a \pm 0.1$	$56.4^{bc} \pm 0.0$	$62.4^{bc} \pm 0.1$	$4.3^c \pm 0.1$
	3	$50.4^a \pm 0.5$	$56.8^c \pm 0.6$	$63.1^c \pm 1.0$	$4.4^{cd} \pm 0.2$
	12	$50.1^a \pm 0.2$	$56.1^b \pm 0.2$	$61.9^b \pm 0.3$	$4.8^d \pm 0.2$

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

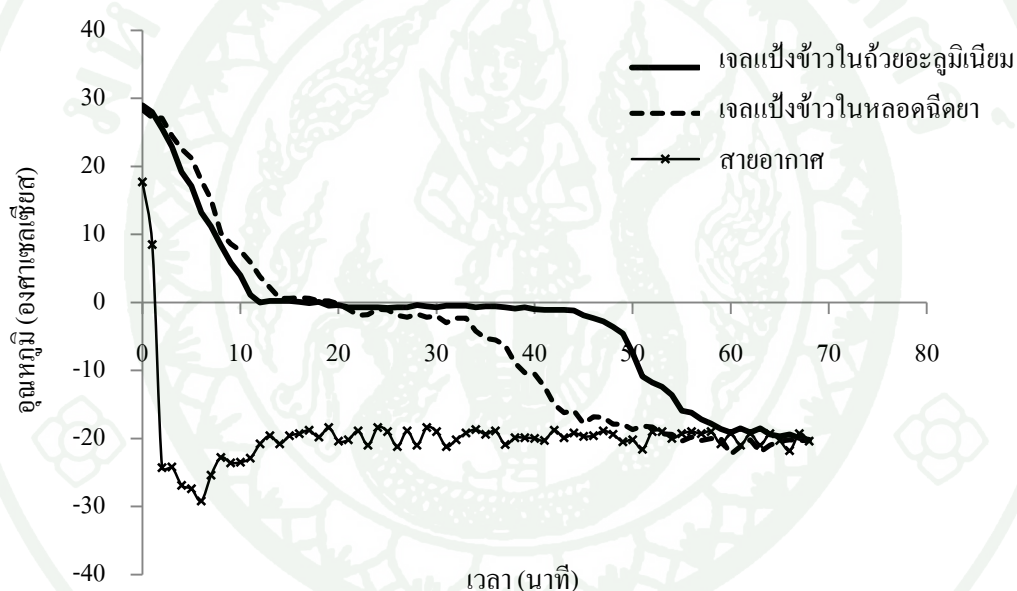
ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

T_o , T_p , T_c และ ΔH คือ อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิสุดท้าย และค่าพลังงานในการสลายผลึกแอมิโลเพกทินรีโทรเกรด ตามลำดับ

nd คือ ไม่ปรากฏผลการเกิดรีโทรเกรดชัน

3. ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อความคงตัวจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง (freeze-thaw stability) ของเจลแป้งข้าว

งานวิจัยในส่วนนี้ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อความคงตัวจากการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลแป้งข้าว โดยนำแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ มาเตรียมเป็นเจล ความเข้มข้นร้อยละ 11 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) จากนั้นแช่เยือกแข็งเจลแป้งข้าวด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิกที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส นำไปเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง ทำการคืนรูปโดยตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยทำซ้ำทั้งหมด 5 รอบ (5 freeze-thaw cycles)



ภาพที่ 17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใจกลางของเจลแป้งข้าวที่เตรียมจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ ขณะผ่านการแช่เยือกแข็ง

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใจกลางของเจลแป้งข้าวที่เตรียมจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ ขณะผ่านการแช่เยือกแข็งแสดงดังภาพที่ 15 โดยเจลแป้งข้าวที่บรรจุในหลอดฉีดยาคือ ตัวอย่างที่จะนำไปศึกษาการแยกตัวของน้ำหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง ส่วนเจลแป้งข้าวที่บรรจุในถ้วยอะลูมิเนียมคือ ตัวอย่างที่จะนำไปศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง สาเหตุที่ต้องบรรจุเจลแป้งข้าวลงในภาชนะ 2 แบบ เนื่องมาจากการวิเคราะห์การแยกตัวของน้ำตามวิธีการของ Charoenrein *et al.* (2008) เป็นวิธีหมุนเหวี่ยงร่วมกับการกรอง วิธีนี้

เหมาะสมกับตัวอย่างที่ถูกบรรจุไว้ในหลอดนิตยา ในขณะที่การตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งของเจลแข็งก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง ทำได้โดยใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส ตรวจสอบความแข็งของตัวอย่างด้วยวิธีการกดตัวอย่าง (compression test) และเพื่อให้การตรวจสอบค่าความแข็งของเจลแข็งซ้ำมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างที่ตั้งอยู่บนแท่นวางตัวอย่างต้องมีลักษณะผิวหน้าที่เรียบ และมีความสูงของตัวอย่างเท่าๆ กัน แต่เจลแข็งซ้ำที่เตรียมได้นั้นมีลักษณะเป็นเจลที่ข้นหนืดไม่มีรูปทรงที่แน่นอนทำให้ไม่สามารถวัดค่าความแข็งของเจลแข็งซ้ำที่ยังไม่ได้ผ่านการแช่เยือกแข็งได้ ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดบรรจุเจลแข็งซ้ำในถ้วยอลูมิเนียม เพื่อให้สามารถวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแข็งซ้ำได้

ภาพที่ 17 เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใจกลางของเจลแข็งซ้ำที่เตรียมจากซ้ำที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ ขณะที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง สามารถคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็ง (freezing time) เจลแข็งซ้ำ จากจุดอุณหภูมิเริ่มต้นของเจลแข็งซ้ำจนถึงอุณหภูมิสุดท้าย (-20 องศาเซลเซียส) ขณะแช่เยือกแข็ง โดยพบว่า เจลแข็งซ้ำที่บรรจุในหลอดนิตยาใช้ระยะเวลาการแช่เยือกแข็งประมาณ 45 นาที ส่วนเจลแข็งซ้ำที่บรรจุด้วยอลูมิเนียมใช้ระยะเวลาการแช่เยือกแข็งประมาณ 56 นาที สาเหตุที่เจลแข็งซ้ำซึ่งบรรจุในหลอดนิตยามีระยะเวลาการแช่เยือกแข็งเร็วกว่าเจลแข็งซ้ำที่บรรจุในถ้วยอลูมิเนียม เนื่องจากหลอดนิตยามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าถ้วยอลูมิเนียม โดยหลอดนิตยามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 เซนติเมตร ในขณะที่ถ้วยอลูมิเนียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 เซนติเมตร

3.1 ร้อยละการแยกตัวของน้ำของเจลแข็งซ้ำที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง

ร้อยละการแยกตัวของน้ำ (% syneresis) ของเจลแข็งซ้ำที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการแช่เยือกแข็งและทำละลาย (Charoenrein and Preechathamwong, 2010) การแยกตัวของน้ำของเจลที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและทำละลายมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโมเลกุลสตาร์ช โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส (Morris, 1990) ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกตัวของน้ำออกจากโครงสร้างของเจล (Saartratra *et al.*, 2005) ดังนั้นปริมาณของน้ำที่แยกตัวออกมาสามารถเป็นดัชนีที่บ่งบอกแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ช (Karim *et al.*, 2000)

ร้อยละการแยกตัวของน้ำของเจลแข็งซ้ำที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 ถึง 5 รอบ แสดงดังตารางที่ 11 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเจลแข็งซ้ำผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 และ 2

รอบ ร้อยละการแยกตัวของน้ำในทุกตัวอย่างมีค่าน้อยมาก ประมาณร้อยละ 0.4 ถึง 2.0 สาเหตุอาจมาจากขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ยังคงมีขนาดเล็ก จึงยังไม่ทำลายโครงสร้างของเจลแป้งข้าวมากนัก การแยกตัวของน้ำจึงมีปริมาณน้อย เมื่อเจลแป้งข้าวผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 3 รอบ ร้อยละการแยกตัวของน้ำของเจลแป้งข้าวทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน มีค่าร้อยละการแยกตัวของน้ำมากกว่าเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน แต่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อย่างไรก็ตามเมื่อเจลแป้งข้าวทุกตัวอย่างผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 4 และ 5 ร้อยละการแยกตัวของน้ำของเจลแป้งข้าวทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มมากขึ้นและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 4 เจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีร้อยละการแยกตัวของน้ำเท่ากับ 27.76 ในขณะที่เจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือนมีร้อยละการแยกตัวของน้ำเท่ากับ 18.03 และ 17.28 ตามลำดับ ร้อยละการแยกตัวของน้ำของเจลแป้งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบเท่ากับ 36.38 ส่วนเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือนมีร้อยละการแยกตัวของน้ำเท่ากับ 29.97 และ 29.08 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีจำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น ส่งผลให้เจลแป้งข้าวมีความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งลดลง เนื่องจากจำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ขึ้นไปทำลายโครงสร้างของเจลแป้งข้าวได้มากขึ้น และยังส่งผลให้โมเลกุลของสตาร์ชอยู่ใกล้กันมากขึ้น จึงเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมากขึ้น ทำให้น้ำแยกตัวออกมาจากเจลแป้งข้าวได้ง่ายขึ้น (Yuan and Thomson, 1998; Bao and Bergman, 2004; Arunyanart and Charoenrein, 2008) ในการศึกษาความคงตัวต่อการคืนรูปจากแช่เยือกแข็งของเจลแป้งข้าวนั้น นอกจากจะศึกษาถึงร้อยละการแยกตัวของน้ำแล้ว ยังได้มีการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัส โครงสร้างระดับจุลภาคและการเกิดรีโทรเกรเดชันของของเจลแป้งข้าวเมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งซึ่งได้อธิบายไว้ในส่วนถัดไป

ตารางที่ 11 ร้อยละการแยกตัวของน้ำของเจลแบ่งข้าวหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 ถึง 5 รอบ

ระยะเวลา การเก็บรักษา	การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่				
ข้าว (เดือน)	1	2	3	4	5
0.7	$0.44^{aA} \pm 0.04$	$0.83^{aA} \pm 0.20$	$7.71^{aB} \pm 1.42$	$17.28^{aC} \pm 1.10$	$29.08^{aD} \pm 0.67$
3	$0.54^{aA} \pm 0.18$	$1.45^{bA} \pm 0.08$	$7.12^{aB} \pm 0.66$	$18.03^{aC} \pm 0.13$	$29.97^{aD} \pm 1.39$
12	$0.56^{aA} \pm 0.17$	$2.02^{cA} \pm 0.20$	$10.76^{aB} \pm 1.72$	$27.76^{bC} \pm 1.01$	$36.38^{bD} \pm 0.43$

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวหมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแบ่งข้าว

ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแบ่งข้าวก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบแสดงดังตารางที่ 12 จากผลการทดลองพบว่า ก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 และ 3 รอบ ความแข็งของเจลแบ่งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7, 3 และ 12 เดือนมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญร้อยละ 95 อย่างไรก็ตามเมื่อเจลแบ่งข้าวผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ เจลแบ่งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่าความแข็งมากที่สุดและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับเจลแบ่งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือน และ 0.7 เดือน นอกจากนี้ยังพบว่า ความแข็งของเจลแบ่งข้าวทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเจลแบ่งข้าวผ่านรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามความแข็งของเจลแบ่งข้าวทุกตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับค่าร้อยละการแยกตัวของน้ำที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นคือ เจลแบ่งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่าร้อยละการแยกตัวของน้ำมากกว่าตัวอย่างอื่นและค่าร้อยละการแยกตัวของน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเจลแบ่งข้าวผ่านรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น นอกจากนี้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ส่วนที่ 3.3)

แสดงให้เห็นว่าเมื่อเจลแข็งตัวผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบส่วนของเมทริกซ์รอบๆ รูพรุนภายในโครงสร้างของเจลแข็งตัวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีความหนาแน่นกว่าเจลแข็งตัวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน แสดงให้เห็นถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชที่เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับความแข็งแรงของเจลแข็งตัวที่มีค่ามากขึ้นเมื่อข้าวมีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นและผ่านรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น

ตารางที่ 12 ค่าความแข็ง (นิวตัน) ของเจลแข็งตัวก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบ

ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าว (เดือน)	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่		
		1	3	5
0.7	$0.99^{aA} \pm 0.01$	$0.96^{aA} \pm 0.05$	$1.87^{aB} \pm 0.35$	$2.84^{aC} \pm 0.06$
3	$1.04^{aA} \pm 0.02$	$0.92^{aA} \pm 0.02$	$1.70^{aB} \pm 0.24$	$2.90^{aC} \pm 0.16$
12	$1.05^{aA} \pm 0.05$	$1.02^{aA} \pm 0.09$	$1.89^{aB} \pm 0.25$	$3.75^{bC} \pm 0.07$

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวหมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

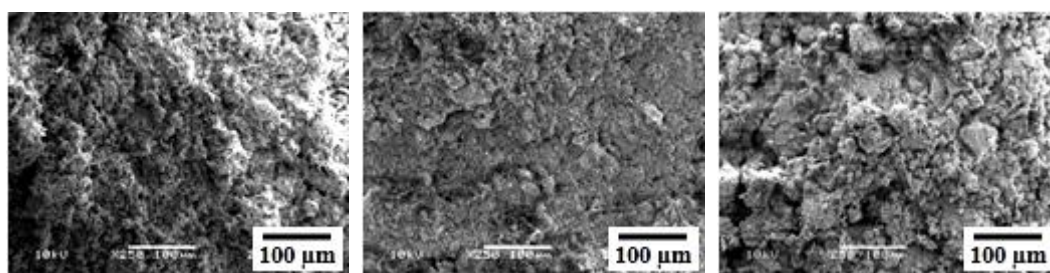
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์หมายความว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลแข็งตัว

โครงสร้างระดับจุลภาคของเจลแข็งตัวหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างของเจลแข็งตัวที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ซึ่งสามารถนำไปอธิบายผลร้อยละการแยกตัวของน้ำ และลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแข็งตัวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ

จากภาพที่ 18 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลแข็งตัวก่อนการแช่เยือกแข็งและหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ จะเห็นได้ว่าเจลแข็งตัวหลัง

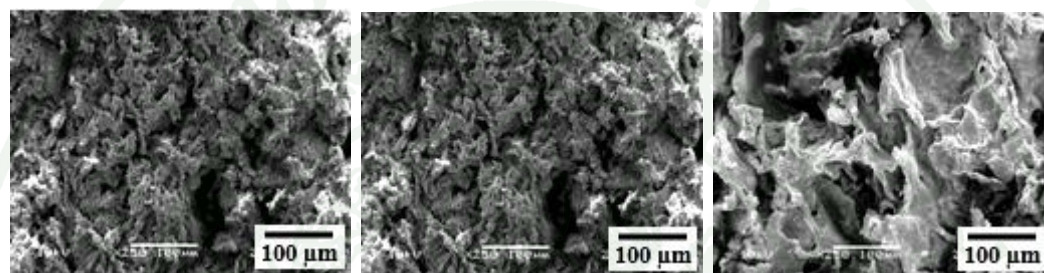
ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบทั้ง 3 ตัวอย่าง มีโครงสร้างแบบฟองน้ำ (spongy structure) เกิดขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่อนำเจลแข็งเข้ามาแช่เยือกแข็ง น้ำภายในโครงสร้างของเจลกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง เมื่อเจลแข็งผ่านรอบการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น ขนาดของผลึกน้ำแข็งใหญ่ขึ้น ทำให้ขนาดรูพรุนภายในโครงสร้างของเจลใหญ่ขึ้น ส่วนที่ไม่แข็งตัวขณะแช่เยือกแข็งหรือที่เรียกว่า เมทริกซ์ (matrix) มีความหนาขึ้น เนื่องจากสายโซ่ของโมเลกุลสตาร์ชมาบีบตัวอัดกันแน่น เกิดรีโทรเกรเดชันมากขึ้น โดยเฉพาะการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส กระบวนการที่เกิดขึ้นทำให้เห็นโครงสร้างแบบฟองน้ำชัดเจนมากขึ้น และเกิดการแยกตัวของน้ำออกจากเจล (Ferrero *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 2002) จากผลการทดลองพบว่า โครงสร้างของเจลแข็งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือนมีรูพรุนขนาดเล็กล้อมรอบด้วยส่วนของเมทริกซ์ที่บาง (ภาพที่ 18ง) สำหรับโครงสร้างของเจลแข็งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือน (ภาพที่ 18จ) พบว่า ขนาดรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นและส่วนของเมทริกซ์รอบๆ รูพรุนมีความหนาแน่นมากขึ้นกว่าเจลแข็งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือน นอกจากนี้โครงสร้างของเจลแข็งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนแสดงให้เห็นลักษณะรูพรุนขนาดใหญ่และส่วนของเมทริกซ์มีความหนาแน่นกว่าตัวอย่างอื่น (ภาพที่ 18ฉ) การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเจลแข็งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนเมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งและทำละลาย เนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ช ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละการแยกตัวของน้ำและค่าความแข็งของเจลแข็งจากข้าวหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง



(ก) เจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลา
การเก็บรักษา 0.7 เดือน
ก่อนการแช่เยือกแข็ง

(ข) เจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลา
การเก็บรักษา 3 เดือน
ก่อนการแช่เยือกแข็ง

(ค) เจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลา
การเก็บรักษา 12 เดือน
ก่อนการแช่เยือกแข็ง



(ง) เจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลา
การเก็บรักษา 0.7 เดือน หลังผ่านการ
คืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ

(จ) เจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลา
การเก็บรักษา 3 เดือน หลังผ่านการ
คืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ

(ฉ) เจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลา
การเก็บรักษา 12 เดือน หลังผ่านการ
คืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ

ภาพที่ 18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างเจลแป้งข้าวก่อนการแช่เยือกแข็ง (ก-ค) และหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ (ง-ฉ) ของข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 เดือน 3 เดือน และ 12 เดือน ตามลำดับ (กำลังขยาย 250 เท่า, สเกล = 100 ไมโครเมตร)

3.4 การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งข้าว

การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งข้าวหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 และ 5 รอบ วิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ แสดงดังตารางที่ 13 และภาพภาคผนวกที่ 6 และ 7 โดยแสดงค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายผลึกรีโทรเกรด (onset temperature; T_o) อุณหภูมิที่เกิดการสลายผลึกรีโทรเกรดสูงสุด (peak temperature; T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการสลายผลึกรีโทรเกรด (conclusion temperature; T_c) และค่าพลังงานในการสลายผลึกรีโทรเกรด (enthalpy; ΔH) จากผลการทดลองพบว่า ไม่ปรากฏพีคการสลายผลึกเอมิโลเพกทินรีโทรเกรด ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากระยะเวลาของการคืนรูปจากเยือกแข็งเป็นช่วงที่ไม่ยาวนานเพียงพอที่จะเกิดรีโทรเกรเดชันของเอมิโลเพกทิน อย่างไรก็ตาม ได้วิเคราะห์พบช่วงอุณหภูมิในการสลายผลึกรีโทรเกรด

อยู่ในช่วงประมาณ 90 ถึง 109 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงของการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน (Vandeputte *et al.*, 2003)

จากตารางที่ 13 จะเห็นได้ว่าเจลแป้งข้าวทูกตัวอย่างเมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 และ 5 รอบมีอุณหภูมิที่ใช้สลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อย่างไรก็ตามเจลแป้งข้าวทูกตัวอย่างมีค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันเพิ่มมากขึ้นเมื่อตัวอย่างเจลแป้งข้าวผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ ในการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 เจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันเท่ากับ 2.2 จูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันของเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou *et al.* (2003) ซึ่งพบว่า ในระหว่างการเก็บรักษาข้าว สารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันมีปริมาณเพิ่มขึ้น สาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมันจากการทำงานของเอนไซม์ไลเปส ส่งผลให้กรดไขมันอิสระมีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลแอมิโลสได้มากขึ้น (Dhaliwal *et al.*, 1991; Nishiba *et al.*, 2000) ดังนั้นค่าพลังงานในการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมันในตัวอย่างเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนจึงมีค่ามากกว่าในตัวอย่างอื่น นอกจากนี้ค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันของเจลแป้งข้าวเมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบพบว่า มีค่ามากกว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันของเจลแป้งข้าวเมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขณะที่เจลแป้งข้าวอยู่ระหว่างการแช่เยือกแข็ง ส่วนที่แข็งตัวได้คือโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง ส่วนที่ไม่แข็งตัวมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น สายโซ่ของโมเลกุลสตาร์ชบีบตัวอัดกันแน่นเกิดเป็นเมทริกซ์ที่หนา เมื่อนำเจลแป้งข้าวไปทำละลาย ผลึกน้ำแข็งเกิดการละลายกลายเป็นน้ำแยกตัวออกจากโครงสร้างของเจล ส่งผลให้สายโมเลกุลของแอมิโลสสามารถเข้ามาใกล้กับโมเลกุลของกรดไขมันอิสระมากขึ้น ทำให้ปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จึงต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการสลายสารประกอบเชิงซ้อนนี้

งานวิจัยในส่วนของการศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง ได้ตรวจพบการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลแอมิโลเพกทินหลังจากข้าวหุงสุกทูกตัวอย่างผ่านการแช่เยือกแข็งและคืนรูปจากเยือกแข็ง 3 และ 5 รอบ แต่ไม่พบ

ฟิสิกการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน ในขณะที่การศึกษาการเกิดรีโทรเกรดชันของ เจลแป้งข้าวแช่เยือกแข็ง ตรวจพบฟิสิกการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน แต่ไม่พบฟิสิกการสลายผลึกแอมิโลเพกทินรีโทรเกรด ที่เป็นเช่นนี้สันนิษฐานว่าเนื่องมาจากวิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรดชันที่แตกต่างกัน โดยในการวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรดชันของเจลแป้งข้าวแช่เยือกแข็ง เตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรดชัน โดยนำแป้งข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ วิเคราะห์การเกิดเจลาทีไนเซชัน จากนั้นนำด้วยสแตนด์เลสที่บรรจุตัวอย่างที่ผ่านการวิเคราะห์เจลาทีไนเซชันแล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง นำมาทำละลายที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) นาน 2 ชั่วโมง เป็นไปได้ว่าระยะเวลาการเก็บรักษาตัวอย่างก่อนนำมาทำละลายสั้นเกินไปสำหรับการเกิดแอมิโลเพกทินรีโทรเกรด และส่วนการตรวจพบฟิสิกการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน อาจเนื่องมาจาก ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อยู่ในรูปเพสต์ของแป้งข้าว โมเลกุลแอมิโลสสามารถแพร่ ออกมาจากเม็ดสตาร์ชขณะเกิดเจลาทีไนเซชันได้ง่ายจึงเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมันได้ง่าย ส่วนการวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรดชันของข้าวหุงสุกหลังผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง ไม่พบฟิสิกการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมัน อาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชของข้าวเกาะกลุ่มอยู่รวมกันภายในเมล็ดข้าว เมื่อนำข้าวมาหุงสุก โมเลกุลแอมิโลสในเม็ดสตาร์ชของเมล็ดข้าว อาจแพร่กระจายออกมาได้น้อย จึงเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันได้น้อย

ตารางที่ 13 การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแข็งขาวหลังผ่านการทำรูปจากเยือกแข็ง 1 และ 5 รอบ

การคืนรูปร่างจากเยือกแข็ง รอบที่	ระยะเวลาการเก็บ รักษาขาว (เดือน)	เอมิโลเฟกทิน รีโทรเกรเดชัน	สารประกอบเชิงซ้อนของเอมิโลสและไขมัน			
			T _o (องศาเซลเซียส)	T _p (องศาเซลเซียส)	T _c (องศาเซลเซียส)	ΔH (จุดต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)
1	0.7	nd	94.0 ^b ± 0.3	102.3 ^a ± 0.4	108.9 ^a ± 0.7	1.4 ^a ± 0.1
	3	nd	92.6 ^{ab} ± 0.2	101.0 ^a ± 0.5	108.6 ^a ± 0.7	1.5 ^a ± 0.1
	12	nd	91.9 ^{ab} ± 2.5	101.0 ^a ± 1.6	108.7 ^a ± 2.3	2.2 ^b ± 0.6
5	0.7	nd	93.4 ^{ab} ± 0.1	101.4 ^a ± 0.0	108.3 ^a ± 1.1	2.2 ^b ± 0.0
	3	nd	92.0 ^{ab} ± 0.7	101.8 ^a ± 0.6	107.6 ^a ± 1.2	2.5 ^{bc} ± 0.0
	12	nd	90.9 ^a ± 1.1	101.7 ^a ± 0.5	109.0 ^a ± 0.7	3.0 ^c ± 0.0

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันนี้แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

T_o, T_p, T_c และ ΔH คือ อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิสุดท้าย และค่าพลังงานในการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของเอมิโลสและไขมัน ตามลำดับ

nd หมายถึง ไม่ปรากฏเกิดการเกิดรีโทรเกรเดชัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การเก็บรักษาข้าวมีผลต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวคือ ทำให้แป้งข้าวมีความหนืดสูงสุดและความหนืดลดลงลดลง แต่มีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดลักษณะขึ้นหนืด ค่าความหนืดสุดท้ายและแซตเทรคเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังส่งผลต่อการเกิดเจลลาติในเซชันของแป้งข้าวคือ แป้งข้าวจะสามารถเกิดเจลลาติในเซชันได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นและต้องใช้พลังงานในการเกิดเจลลาติในเซชันมากขึ้น

2. ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนมีค่าความแข็งมากกว่าและความเหนียน้อยกว่าข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน แสดงให้เห็นว่าการเก็บรักษาข้าวมีผลให้ข้าวหุงสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งมากขึ้นและความเหนียวลดลง นอกจากนี้เมื่อข้าวหุงสุกผ่านจำนวนรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น ข้าวหุงสุกจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งมากขึ้น และมีความเหนียวลดลง อีกทั้งมีลักษณะผิวของข้าวหุงสุกที่ขรุขระมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 และ 3 เดือนหลังผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบยังคงมีลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียวใกล้เคียงกับข้าวหุงสุกที่ไม่ได้ผ่านการแช่เยือกแข็ง และผู้บริโภคให้การยอมรับมากกว่าตัวอย่างข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน ดังนั้นหากต้องการผลิตข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งควรเลือกใช้ข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาไม่เกิน 3 เดือน และมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไม่เกิน 1 ครั้ง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่มีคุณภาพดี ผู้บริโภคให้การยอมรับ

3. การเก็บรักษาข้าวมีผลต่อค่าความแข็งและร้อยละการแยกตัวของน้ำของเจลแป้งข้าว เมื่อเจลแป้งข้าวผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 3 ถึง 5 รอบ โดยเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนพบว่า มีค่าความแข็งและร้อยละการแยกตัวของน้ำมากกว่าเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 3 และ 0.7 เดือน แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวและการคั้นรูปจากแช่เยือกแข็งมีผลให้เจลแป้งข้าวมีความคงตัวต่อการคั้นรูปจากแช่เยือกแข็งลดลง สอดคล้องกับโครงสร้างระดับจุลภาคของเจลแป้งจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือนเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบซึ่งพบว่า เกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำชัดเจนกว่าตัวอย่างอื่น นอกจากนี้ยังพบว่า สารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อเจลแป้งข้าวผ่านจำนวนรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า เจลแป้งข้าวทุกตัวอย่างเมื่อผ่าน

การคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบ ยังคงมีค่าความแข็งของเจลใกล้เคียงกับเจลแป้งข้าวที่ไม่ได้ผ่านการแช่เยือกแข็ง และพบว่า ค่าความแข็งและร้อยละการแยกตัวของน้ำของเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 0.7 และ 3 เดือนเมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ มีค่าน้อยกว่าเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษา 12 เดือน ดังนั้นหากต้องการผลิตผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งที่มีส่วนประกอบหลักเป็นเจลแป้งข้าวควรเลือกใช้แป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาไม่เกิน 3 เดือนและมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไม่เกิน 1 ครั้ง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งที่มีคุณภาพดี

ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาครั้งนี้มีการศึกษาระยะเวลาการเก็บรักษาของข้าวเพียง 3 ช่วง คือ 0.7, 3 และ 12 เดือน เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลา ดังนั้นเพื่อให้งานวิจัยมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นควรมีการศึกษาช่วงระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวที่มีความถี่และมีช่วงที่มากกว่านี้
2. ควรมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลโปรตีนในระหว่างการเก็บรักษาข้าวเพื่อใช้ในการอธิบายผลการทดลองได้ดียิ่งขึ้น
3. ควรมีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลโปรตีนในเมล็ดข้าวระหว่างเก็บรักษา กับการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลสตาร์ชว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ หากมีความสัมพันธ์กัน มีความสัมพันธ์กันอย่างไร

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมการค้าภายใน. 2550. ยุทธศาสตร์ข้าวไทย ปี 2550-2554. กระทรวงพาณิชย์, กรุงเทพฯ.

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ไกรสิทธิ์ พิสิทธิ์กุล, ศักดิ์ดา จงแก้ววัฒนา, สุกัญญา วงศ์พรชัย, วรรณา ตูลยธัญ และ สาวิตร์ มีจุ้ย.

2554. ผลของการเร่งอายุต่อการเปลี่ยนแปลงสัณฐานของเมล็ดแป้ง สมบัติทางความร้อนและโปรตีนของแป้งข้าวที่เก็บเกี่ยวใหม่. ว. วิทย. กษ. 42 (1) (พิเศษ): 445-448.

งามชื่น คงเสรี. 2536. คุณภาพเมล็ดทางเคมี, น. 54-70 ใน เอกสารประกอบการบรรยายการฝึกอบรมหลักสูตรวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ณ ศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง, พัทลุง. ฝ่ายฝึกอบรม. สถาบันวิจัยข้าวอบรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

ณรงค์ นิยมวิทย์. 2537. การخمอาหาร ทฤษฎีและวิธีการปฏิบัติ. โรงพิมพ์ วี.บี. บุ๊คเซ็นเตอร์ (เค. ยู.), กรุงเทพฯ.

พรพิสาข์ ประเสริฐไทยเจริญ. 2555. การปรับปรุงคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิณทิพย์ รัมภการณ. 2547. การตัดแปรแป้งข้าวโดยการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เพลงพิน ศิวาพรรักษ์. 2541. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอะไมโลส คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ภัทรพร ัญญูวินิชกุล. 2540. ผลของภาชนะบรรจุและสภาพการเก็บรักษาต่อคุณภาพข้าวสาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ละมุด วิเศษ. 2541. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ

ไขมัน คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สิริกาญจน์ เกียรติชนะไพบูลย์. 2551. ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพทางเคมี กายภาพลักษณะทาง
ประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา และความชอบของข้าวพันธุ์ต่างๆที่หุงต้มด้วยวิธีการต่างกัน.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2546. กระบวนการแช่เยือกแข็งอาหาร, น. 154-186. ใน คณาจารย์ภาควิชา
วิทยาศาสตร์การอาหาร, บรรณาธิการ. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. พิมพ์ครั้งที่
4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุภาวดี ขาวสังข์. 2542. การเปลี่ยนแปลงของไขมันในข้าวเปลือกหอมมะลิเนื่องจากการ
ทำงานของเอนไซม์ไลเปสระหว่างการรักษา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

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

Alonso, G.A. and A.J. Escriing. 1999. Assessment of some parameters involved in the
gelatinization and retrogradation of starch. **Food Chem.** 55: 181-187.

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

- 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
- Bao, J. and C.J. Bergman. 2004. The functionality of rice starch, pp. 258-294. *In* A.C. Eliasson, ed. **Starch in food structure and applications**. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.
- Barber, S. 1972. Milled rice and changes during aging, in Rice: Chemistry and technology. **American Cereal Chemists.** 63: 215.
- 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
- _____. 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.
- Bolling, H., G. Hampel and A.W. Elbaya. 1978. Studies on storage of milled rice for a long period. **Food Chem.** 3: 17-22.
- Brennan, C., C.K. Tan, V. Kuri and C.M. Tudorica. 2004. The pasting behavior and freeze-thaw stability of native starch-xanthan gum pastes. **Int. J. Food Sci. Technol.** 39: 1017-1022.
- Cagampang, G.B., L.J. Curz, S.G. Espiritu, R.G. Santiago and B.O. Juliano. 1966. Studies on the extraction and composition of rich proteins. **Cereal Chem.** 43(2): 145-155.
- Chaichaw, C., O. Naivikul and M. Thongngam. 2011. Effect of heat-moisture treatment on qualities of gluten-free alkaline rice noodles from various flour varieties. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)**. 45: 490 – 499.

- Champagne, E.T. 1996. Rice starch: composition and characteristics. **Cereal Food World**. 41 (1): 833-883.
- Charoenrein, S. and N. Preechathamwong. 2010. Undercooling associated with slow freezing and its influence on the microstructure and properties of rice starch gels. **J. Food Eng.** 100: 310-314.
- _____, O. Tatirat and J. Muadklay. 2008. Use of centrifugation–filtration for determination of syneresis in freeze–thaw starch gels. **Carbohydr Polym.** 73: 143-147.
- _____, _____, K. Rengsutthi and M. Thongngam. 2011. Effect of konjac glucomannan on syneresis, textural properties and the microstructure of frozen rice starch gels. **Carbohydr Polym.** 83: 291-296.
- Choi, S.G. and C. Rhee. 1995. Effect of freezing rate and Storage temperature on the degree of retrogradation, Texture and Microstructure of cook rice. **Korean. J. Food Sci. and Technology**. 27 (5): 783–788.
- Chrastil, J. 1990. Protein-starch interaction in rice grains. Influence of storage on oryzenin and starch. **J. Agric. Food Chem.** 38: 1804-1809.
- _____ and Z.M. Zarins. 1992. Influent of storage on peptide subunit composition of rice oryzenin. **J. Agri. Food Chem.** 40: 927-930.
- Dhaliwal, Y.S., K.S. Sckhon and H.P.S. Nagi. 1991. Enzymatic activities and rheological properties of stored rice. **Cereal Chem.** 68: 18-21.
- Donoid, K.T. and B.V.A. Wallarrce and J.C. Michael. 1968. **The freezing preservation of food vol.4**. AVI publishing company, Icc. U.S.A. 569p.

Eliasson, A.C. and M.P. Gudmundsson. 1996. Starch: Physicochemical and functional aspects. **Carbohydr. Food.** Marcel Dekker, New York.

Fan, J. and B.P. Marks. 1999. Effects of rough rice storage conditions on gelatinization and retrogradation properties of rice flours. **Cereal Chem.** 76: 894-897.

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.** Macel 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.

Finney, K.F., Y. Pomeranz and R.C. Hosney. 1976. Effects of solvent extraction on lipid composition, mixing time and bread loaf volume. **Cereal Chem.** 53 (3): 383-388.

Gailliard, T. and P. Bowler. 1987. Morphology and composition of starch. In T. Gailliard, ed. **Starch: Properties and potential.** John Wiley and Sons., New York.

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.

Gormley, R. 2008. Developing Frozen Products for the Market and the Freezing of Ready-Prepared Meals, pp. 205-223. In J.A. Evans, ed. **Frozen Food Science and Technology** 10. Blackwell Publishing, Oxford.

Gudmundsson, G. 1994. **Retrogradation of starch and the role of its components.** *thermochimica Acta.* 246: 329-341.

- Hamaker, B.R. and V.K. Griffin. 1990. Changing the viscoelastic properties of cooked rice through protein disruption. **Cereal Chem.** 67: 261-267
- _____ and _____. 1993. Effect of disulfide bond containing protein on rice starch gelatinization and pasting. **Cereal Chem.** 70: 377-380.
- Han, X.Z. and B.R. Hamaker. 2001. Amylopectin fine structure and rice starch paste breakdown. **J. Cereal Sci.** 34: 279-284.
- Hartel, R.W. 2001. **Crystallization in Foods.** An Aspen Publication, Maryland.
- 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.
- Holcomb, R.B. 1997. Evaluating the effects of rice quality attributes on consumer preferences and rice demand. **Dissertation Abst. Intern.** 58: 1385.
- Hoseney, C.R. 1998. **Cereal Science and Technology.** 2nd ed. American association of cereal chemists, Inc., Minnesota, USA. 378p.
- Indudhara Swamy, Y.M., C.M. Sowbhagya and K.R. Bhattacharya, 1978. Changes in the physicochemical properties of rice with aging. **J. Sci. Food Agri.** 29: 627-639.
- 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.
- Jane, J.L. 2009. Structural Features of Starch Granules II, pp. 193-236. *In* J.N. BeMiller and R. Whistler, eds. **Starch: Chemistry and Technology.** Academic Press, New York.

- Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. **Cereal Sci. Today** 16: 334-360.
- _____. 1985. Criteria and tests for rice grain qualities, pp. 443-524. In B.O. Juliano, ed. **Rice Chemistry and Technology**. St Pual, MN.
- _____. 1992. Structure, chemistry, and functional of the rice grain and its fractions. **Cereal Foods World**. 37: 772-774.
- _____ and C.P. Villareal. 1993. **Grain Quality Evaluation of World Rices**. International Rice Research Institute, Manila.
- Kaletunc, G. and K.J. Breslauer. 2003. **Characterization of Cereals and Flour**. Marcel Dekker Inc., New York.
- Karim, A.A., M.H. Norziah and C.C. Seow. 2000. Methods for the study of starch retrogradation. **Food Chem.** 71: 9-36.
- Klucinec, J. D. and D.B. Tompson. 1999. Amylose and amylopectin interact in retrogradation of dispersed high-amylose starches. **Cereal Chem.** 76: 282-291.
- Kock, S.D., A. Minnaar, D. Berry and J.R.N. Talor. 1995. The effect of freezing rate on the quality of cellular and non-cellular par-cooked starchy convenience food. **LWT-Food Sci. Technol.** 28: 87-95.
- 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.
- Lima, I and R.P. Singh. 1993. Objective measurement of retrogradation in cooked rice during storage. **J. Food Quality.** 16: 321-337.

- Luh, B.S. 2001. Rice Production, pp. 79-108. *In* G. Owens, eds. **Cereals Processing Technology 5**. CRC Press, New York.
- Martin, M. and M.A. Fitzgerald. 2002. Protein in rice grains influence cooking properties. **J. Cereal Sci.** 36: 285-294.
- Matz, S.A. 1991. **The Chemistry and Technology of Cereal as Food and Feed**. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Maynard, L.A. 1948. **Principles of Food Freezing**. John Wiley & Son, Inc., 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. 1990. Starch gelation and retrogradation. **Trends Food Sci. Tech.** 1: 2-6.
- Muadklay, J. and S. Charoenrein. 2008. Effects of hydrocolloids and freezing rates on freeze-thaw stability of tapioca starch gels. **Food Hydrocoll.** 22: 1268-1272.
- Murphy, P. 2000. Starch, pp. 41-45. *In* G.O. Phillips, and P.A. Williams, eds. **Handbook of Hydrocolloids**. Woodhead Publishing Ltd, New York.
- Nishiba, Y., T. Sato and I. Suda. 2000. Convenient method to determine free fatty acid of rice using thin-layer chromatography and flame-ionization detection system. **Cereal Chem.** 77: 223-229.
- Noomhorm, A., N. Kongseree and M. Apintanapong. 1997. Effect of aging on the quality of glutinous rice crackers. **Cereal Chem.** 74: 12-15.

Oates, C.G. 1997. Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis.

Trends Food Sci. Tech. 8: 375-382.

Ohno, T. and N. Ohisa. 2005. Studies on textural and chemical changes in aged rice grains.

Food Sci. Technol. Res. 11: 385-389.

Park C.E., Y.S. Kim, K.J. Park and B.M. juKim. 2012. Change in physicochemical

characteristics of rice during storage at different temperatures. **J. Stored Prod. Res.** 48: 25-29.

Perdon, A.A., B.P. Marks, T.J. Siebenmorgen and N.B. Reid. 1997. Effect of rough rice storage condition on the amylograph and cooking properties of medium grain cv. Bengal.

Cereal Chem. 74: 864-867.

_____, T.J. Siebenmorgen, R.W. Buescher and E.E. Gbur. 1999. Starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage. **J. Food Sci.** 64 (5): 828-832.

Perez, C.M. and B.O. Juliano. 1981. Texture changes and storage of rice. **J. Texture Stud.** 12: 321-333.

Persson, P.O. and G. Londahl. 1993. Freezing Technology, pp. 20-58. *In* C.P. Mallett, ed.

Frozen Food Technology. Chapman & Hall, Great Britain.

Phimolsiripol, Y., U. Siripatrawan and D. Cleland. 2011. Weight loss of frozen bread dough under isothermal and fluctuation temperature storage conditions. **J. Food Eng.**

106: 134-143.

Pomeranz, Y., R.D. Daftary, M.D. Shogeren, R.C. Hosney and K.F. Finney. 1968. Changes in biochemical and bread-making properties of storage-damaged flour. **J. Agr. Food**

Chem. 16: 92-96.

- Prathepha, P., V. Daipolmak, S. Samappito and V. Baimai. 2005. An assessment of alkali degradation, waxy protein and their relation to amylose content in Thai rice cultivars. **Science Asia**. 31: 69-75.
- Reid, D. S. 1998. Over view of physical/chemical aspect of freezing, pp.10-28. *In* M.C. Erickson, & Y.C. Hung, eds. **Quality of Frozen Foods**. London: Chapman Hall.
- Roos, Y.H. and M. Karel. 1991. Applying state diagrams to food processing and development. **Food Technol.** 1: 66-71.
- Saaratratra, S., C. Puttanlek, V. Rungsardthong and D. Uttapap. 2005. Paste and gel properties of low-substituted acetylated canna starches. **Carbohydr. Polym.** 61: 211-221.
- Saleh, M.I. and J.F. Meullenet. 2007. Effect of protein disruption using proteolytic treatment on cooked rice texture properties. **J. Texture Stud.** 38:423-437.
- Sasaki, T., T. Yasui and J. Matsuki. 2000. Effect of amylose content on gelatinization retrogradation and pasting properties of starches from waxy and non-waxy wheat and their FI seed. **Cereal Chem.** 77: 58-63.
- 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.
- Shoji, I. and H. Kurusawa. 1981. On viscosity characteristics of rice and rice starch against Brabender amylography: Effects of protein and fat on viscosity of glutinous rice starches. **Kaseigaku Zasshi**. 32: 167-171.
- Singh, N., J. Singh, L. Kaur, N.S. Sodhi and B.S. Gill. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chem.** 81: 219-231.

- Sitachitta, N., K. Yamirudeng and O. Naivikul. 2006. Processing of Frozen Parboiled Rice Product. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)**. 40: 688-693.
- Sodhi, N.S., N., Singh, M. Arora and J. Singh. 2003. Changes in physico-chemical, thermal, cooking and textural properties of rice during aging. **J. Food Process Pres.** 27: 387-400.
- 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.
- Tako, M. and S. Hizukuri. 2002. Gelatinization mechanism of potato starch. **Carbohydr. Polym.** 48: 397-401.
- Taub, I.A. and R.P. Singh. 1998. **Food storage stability**. CRC press, USA.
- Taylor, T. A. 1994. **Cooked rice: a food polymer science approach**. Dissertation Abstracts International. USA.
- Teerarat, L. and P. Hongsprabhas. 2010. Effect of storage proteins on pasting properties and microstructure of Thai rice. **Food Res. Int.** 43: 1402-1409.
- Teo, C.H., A.A. Karim, P.B. Cheah, M.H. Norziah and C.C. Seow. 2000. On the roles of protein and starch in the aging of non-waxy rice flour. **Food Chem.** 69: 229-236.
- Tester, F.R. 1997. Starch: polysaccharide fractions, pp. 147-163. In P.L. Frazies, A.M. Donald and P. Richmond, eds. **Starch Structure and Functionality**. The Royal Society of Chemistry, U.K.
- Tester, R.F., and J. Karkalas. 1996. Swelling and gelatinization of oat starches. **Cereal Chem.** 73: 271-277.

_____ and W.R. Morrison. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches I. Effect of amylopectin, amylose and lipid. **Cereal Chem.** 67: 551-557.

Thirathumthavorn, D. and S. Charoenrein. 2005. Thermal and pasting properties of acid-treated rice starches. **Starch/Stärke.** 57: 217-222.

Tulyathan, V. and B., Leeharatanaluk. 2007. Change in quality of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105 during storage. **J. Food Biochem.** 31: 415-425.

Vandeputte, E.G., R. Vermeulen, J. Geeroms and J.A. Delcour. 2003. Rice starch I. structural aspects provide insight into crystallinity characteristics and gelatinization behavior. **J. Cereal Sci.** 38: 61-68.

Varavinit, S., 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.

Villareal, R.M., A.P. Resurreccion, L.P. Suzuki and B.O. Juliano. 1976. Changes in physicochemical properties of rice during storage. **Starch/Stärke.** 28: 88-94.

Ward, J.E.K., R.C. Hosney and P.A. Seiv. 1994. Retrogradation of amylopectin from maize and wheat starches. **Cereal Chem.** 71: 150.

Whistler, R.L. and J.N. BeMiller. 1999. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists.** Eagan Press, St. Paul, MN.

_____. and J.R. Deniel. 1984. Molecular structure of starch, pp. 153-178. In R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E.F. Paschall, eds. **Starch: Chemistry and Technology.** Academic Press, Inc., Florida.

- Yoshihashi, T., N.T.T. Houn, V. Surojanametukul., P. Tungtrakul. and W. Varanyanind. 2005. effect of storage Conditions on 2- acetyl-1-pyrroline content in aromatic rice variety, Khao Dawk Mali 105. **J. Food Sci.** 70: 34-37.
- Yu, S., Y. Ma and D.W. Sun. 2010. Effects of freezing rates on starch retrogradation and textural properties of cooked rice during storage. **LWT-Food Sci. Technol.** 43: 1138-1143.
- Yuan, C.R., D.B. Thompson. 1998. Freeze-thaw stability of three waxy maize starch pastes measured by centrifugation and calorimetry. **Cereal Chem.** 75: 571-573.
- _____, _____ and C.D. Boyer. 1993. Fine structure of amylopectin in relation to gelatinization and retrogradation behavior of maize starches from three wx-containing genotypes in two inbred lines. **Cereal Chem.** 70: 81-89.
- Zhou, Z., K. Robardst, S. Helliwellt and C. Blanchards. 2002. Aging of stored rice: in chemical and physical attributes. **J. Cereal Sci.** 35: 65-78.
- _____, _____, _____ and _____. 2003. Effect of rice storage on pasting properties of rice flour. **Food Res. Int.** 36: 625-634.





1. การหาปริมาณความชื้น (AOAC, 2000 วิธีการที่ 925.10)

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1.1 กระทะปิ้งพร้อมฝาอะลูมิเนียม

1.1.2 ตู้อบลมร้อน

1.1.3 เชชเคเตอร์

1.2 วิธีการวิเคราะห์

นำกระทะปิ้งพร้อมฝาอะลูมิเนียมอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในแชชเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นใส่ตัวอย่างบดละเอียดที่ร้อนผ่านตะแกรง 100 เมช ประมาณ 2-3 กรัม นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเปิดฝาไว้ เมื่อครบกำหนดเวลา ทำการปิดฝาแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในแชชเคเตอร์ จากนั้นนำออกมาชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาร้อยละความชื้นในตัวอย่าง

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}}$$

2. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (AOAC, 2000 วิธีการที่ 979.09)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1.1 เครื่องย่อยสลาย Buchi

2.1.2 หลอด kjeldahl สำหรับย่อย

2.1.3 อุปกรณ์สำหรับย่อย

2.1.4 เครื่องกลั่นอัตโนมัติ Buchi

2.2 สารเคมี

2.2.1 กรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นร้อยละ 95

2.2.2 โพแทสเซียมซัลเฟต

2.2.3 คอปเปอร์ซัลเฟต

2.2.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 35

2.2.5 สารละลายกรดบอริก ความเข้มข้นร้อยละ 4

2.2.6 อินดิเคเตอร์ (ผสมเมทิลเรด 0.02 กรัม และ โบรโมคริสโซลกรีน 0.1 กรัม ในเอทานอล 100 มิลลิลิตร)

2.2.7 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์แมล

2.3 วิธีการวิเคราะห์

2.3.1 ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในหลอดย่อย ระวังไม่ให้ติดข้างหลอด

2.3.2 ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย โพแทสเซียมซัลเฟต 10 กรัม และคอปเปอร์ซัลเฟต 0.5 กรัม

2.3.3 ใส่ลูกแก้วกันเคียด (glass bead) เม็ด และเติมกรดซัลฟิวริก 20-25 มิลลิลิตร

2.3.4 ปิดหลอดย่อยให้แน่น แล้วนำหลอดย่อยต่อเข้ากับชุดเครื่องย่อยทันที ระวังไม่ควรรีไ้ไอกรดระเหยออกจากหลอดย่อย

2.3.5 ปรับให้ความร้อนที่เครื่องย่อย ย่อยจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเขียวใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่น 60-75 มิลลิลิตร (หรือเดิมเป็น 3 เท่าของกรด)

2.3.6 นำหลอดย่อยต่อเข้ากับชุดเครื่องกลั่น แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 35 จนสารละลายในหลอดย่อยเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

2.3.7 รองรับสิ่งกลั่นด้วยขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายกรดบอริกความเข้มข้นร้อยละ 4 จำนวน 25 มิลลิลิตร โดยกลั่นประมาณ 5 นาที

2.3.8 หยดอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ลงในสิ่งกลั่น จากนั้นนำไปไตเตรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์แมล จนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีชมพูไปเป็นสีเทาอ่อน ถือว่าถึงจุดยุติ บันทึกปริมาณกรดที่ใช้ไป แล้วนำมาคำนวณหาร้อยละของปริมาณไนโตรเจน ทำแบบลงค์ควบคู่ไปด้วย โดยไม่มีตัวอย่างในหลอด

2.4 วิธีการคำนวณ

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

ร้อยละของโปรตีน = ร้อยละของปริมาณไนโตรเจน $\times 5.95$

เมื่อ S หมายถึง ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไตเตรตกับสิ่งกลั่น (มิลลิลิตร)

B หมายถึง ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไตเตรตกับแบล็ก (มิลลิลิตร)

N หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มัล)

W หมายถึง น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

3. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 2000 วิธีการที่ 920.39)

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องมือวิเคราะห์ไขมัน (Soxtec System HT2; 1045 Extraction unit)

3.1.2 เครื่องทำความเย็น

3.1.3 ทิมเบิล (thimble)

3.1.4 ถ้วยสกัด (extraction cup)

3.1.5 เดซิเคเตอร์ (desicator)

3.1.6 ตู้อบลมร้อน (hot air oven)

3.2 สารเคมี

ปิโตรเลียมอีเทอร์

3.3 วิธีการวิเคราะห์

3.3.1 อบถ้วยสกัด (extraction cup) และทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (W1)

3.3.2 ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม (W2) ลงบนกระดาษกรอง ห่อให้มิดชิดโดยมีขนาดพอดีที่จะสามารถใส่ลงในทิมเบิล (thimble) จากนั้นใส่ตัวอย่างที่ห่อด้วยกระดาษกรองลงในทิมเบิล

3.3.3 นำทิมเบลใส่ลงในถ้วยสกัด แล้วเติมปิโตรเลียมอีเทอร์ปริมาตร 45 มิลลิลิตร ลงในถ้วยสกัด

3.3.4 นำถ้วยสกัดเข้าเครื่องวิเคราะห์ไขมัน ทำการสกัดเป็นเวลา 20 นาที และทำการชะล้างเป็นเวลา 45 นาที แล้วนำทิมเบลออกจากถ้วยสกัด

3.3.5 นำถ้วยสกัดที่มีไขมันของตัวอย่างไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อระเหยตัวทำละลายออกไป จากนั้นทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (W3)

3.4 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละปริมาณไขมัน} = \frac{(W3-W1) \times 100}{W2}$$

เมื่อ

W1 หมายถึง น้ำหนักถ้วยสกัด (กรัม)

W2 หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างที่วิเคราะห์ (กรัม)

W3 หมายถึง น้ำหนักถ้วยสกัดและไขมันที่สกัดได้ (กรัม)

4. การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโนส (ดัดแปลงตามวิธีการของ Juliano, 1971)

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

4.1.1 สเตปโครโฟโตมิเตอร์

4.1.2 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

4.2 สารเคมี

4.2.1 เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95

4.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์แมล (เตรียมโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1 ลิตร)

4.2.3 กรดแอสซิติคความเข้มข้น 1 นอร์แมล (เตรียมโดยใช้กรดแอสซิติคเข้มข้นปริมาตร 60 มิลลิลิตร ใส่ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1 ลิตร)

4.2.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง

4.2.5 สารละลายไอโอดีน (เตรียมโดยชั่งไอโอดีน 0.2 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2 กรัม ผสมกัน ละลายสารทั้งสองด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วเก็บไว้ในขวดสีชา)

4.3 วิธีการวิเคราะห์

4.3.1 ชั่งตัวอย่างข้าวสารที่บดละเอียดและร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช ปริมาณ 0.1000 กรัม ลงในขวดรูปชมพูนขนาด 50 มิลลิลิตร

4.3.2 เติมน้ำเอทานอล 1 มิลลิลิตร ละลายตัวอย่างให้กระจายออก ระวังอย่าให้ตัวอย่างเกาะที่ข้างขวด

4.3.3 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์แมล จำนวน 9 มิลลิลิตร

4.3.4 นำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

4.3.5 เทตัวอย่างลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วใช้น้ำกลั่นล้าง 2-3 ครั้ง จากนั้นเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้ได้เป็น 100 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน

4.3.6 ควบน้ำแบ่ง 5 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

4.3.7 เติมกรดแอสซิติคความเข้มข้น 1 นอร์แมล จำนวน 1 มิลลิลิตรและสารละลายไอโอดีนจำนวน 2 มิลลิลิตร

4.3.8 เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

4.3.9 เตรียมแบลด์ โดยเติมกรดแอสซิติคความเข้มข้น 1 นอร์แมล จำนวน 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีนจำนวน 2 มิลลิลิตร

4.3.10 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าแบลด์ให้เป็นศูนย์

4.3.11 นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละของปริมาณแอมิโลส โดยเปรียบเทียบจากกราฟมาตรฐานของสารละลายแอมิโลสบริสุทธิ์

4.4 การสร้างกราฟมาตรฐาน

4.4.1 ชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง 0.0400 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และทำตามขั้นตอนที่ 4.3.2 - 4.3.5

4.4.2 ปิเปตสารละลายจากข้อ 4.4.1 ปริมาตร 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดกำหนดปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นจึงเติมเติมกรดอะซีติกความเข้มข้น 1 นอร์แมล ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ เติมน้ำกลั่นจำนวน 2.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

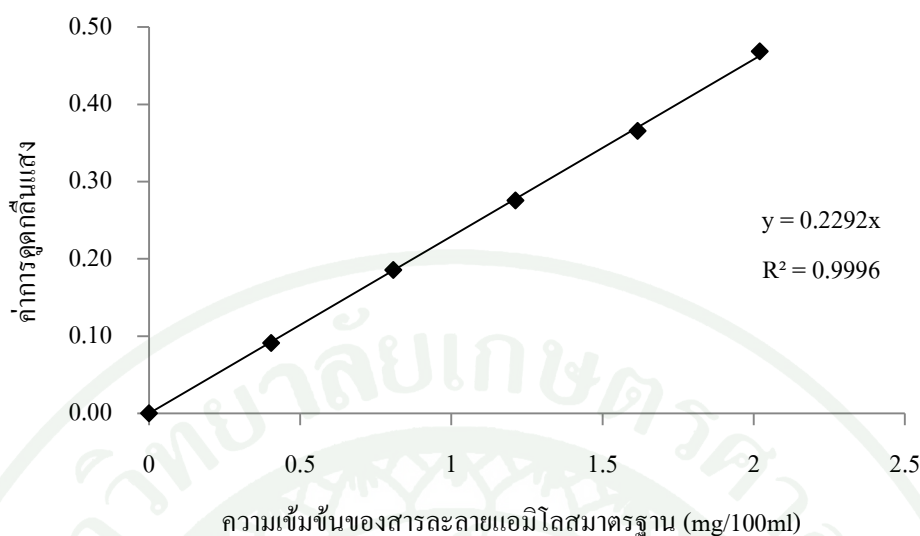
4.4.3 เตรียมแบลด์โดยเติมกรดอะซีติกความเข้มข้น 1 นอร์แมล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีนจำนวน 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

4.4.4 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าแบลด์ให้เป็นศูนย์

4.4.5 สร้างกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายแอมิโลสมมาตรฐาน (แกน X) และค่าการดูดกลืนแสง (Y)

4.5 วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของปริมาณแอมิโลส} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่อ่านได้จากกราฟแอมิโลสมมาตรฐาน (มิลลิกรัม/100 มิลลิลิตร)} \times 10}{5 \times \text{น้ำหนักตัวอย่าง (น้ำหนักแห้ง) (กรัม)}}$$



ภาพผนวกที่ ก1 ปริมาณเอมิโลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเอมิโลสที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

5. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AOAC, 2000 วิธีการที่ 923.03)

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

5.1.1 เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace)

5.1.2 เตาไฟฟ้าให้ความร้อนแบบแผ่นราบ

5.1.3 เป้า (crucible)

5.1.4 เชตริกเคเตอร์

5.2 วิธีการวิเคราะห์

5.2.1 เเผาเป้าในเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นเชตริกเคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก

5.2.2 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในเป้าแล้วนำไปเผาด้วยไฟอ่อน ๆ จนหมดควัน

5.2.3 นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสจนกว่าได้เถ้าเป็นสีขาวหรือสีเทา

5.2.4 นำเป้าออกมาใส่ในเชตริกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

5.3 วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณเก่า (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{(W2 - W0) \times 100}{(W1 - W0)}$$

เมื่อ W0 หมายถึง น้ำหนักของเบ้า หน่วยเป็นกรัม

W1 หมายถึง น้ำหนักของเบ้าและตัวอย่างก่อนเผา หน่วยเป็นกรัม

W2 หมายถึง น้ำหนักของเบ้าและตัวอย่างหลังจากเผา หน่วยเป็นกรัม



1. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

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

1.2 วิธีการวิเคราะห์

1.2.1 ตัวอย่างแป้งข้าวที่ใช้วิเคราะห์ผ่านการบดจนมีอนุภาคเล็กกว่าหรือเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งผ่านการวิเคราะห์หาความชื้นตามวิธี AOAC (2000) ก่อนการวิเคราะห์

1.2.2 ผสมตัวอย่างแป้งข้าวกับน้ำกลั่น ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักแห้ง) ให้มีน้ำหนักรวมเท่ากับ 28 กรัม

1.2.3 ใส่แป้งข้าวลงบนผิวหน้าของน้ำในถ้วยทรงกระบอก ใช้ใบพายเขย่าตัวอย่างในถ้วยทรงกระบอกขึ้นลง 10 ครั้ง อย่างระมัดระวัง

1.2.4 สวมใบพายที่อยู่ในถ้วยทรงกระบอกเข้ากับที่ยึด โดยให้ใบพายอยู่กึ่งกลางถ้วย แล้วเริ่มต้นการวิเคราะห์โดยกดมอเตอร์ของเครื่องลง โดยตั้งสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

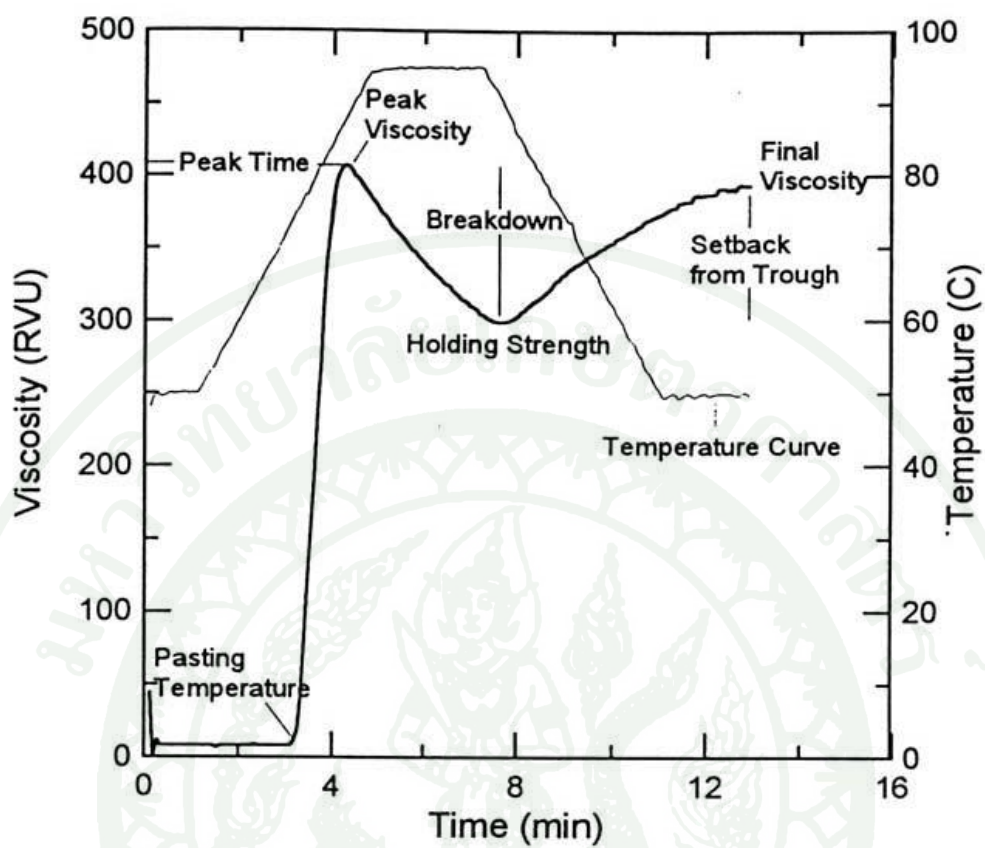
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที: วินาที)
50.0 (อุณหภูมิเริ่มต้น)	
50.0	1: 00
95.0	4: 45
95.0	7: 15
50.0	11: 00
สิ้นสุดการทดสอบ	12: 20

หมายเหตุ ความเร็วรอบเริ่มต้นที่ใช้คือ 960 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 160 รอบต่อนาทีจนกระทั่งตลอดการทดสอบ

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

เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (อาร์วีเอ) ใช้ประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องพิจารณาจากความหนืดของผลิตภัณฑ์นั้นขณะให้ความร้อน โดยสามารถเปลี่ยนระดับอุนหภูมิได้อย่างแม่นยำ แนนอนและสามารถรักษาอุนหภูมิให้คงที่ การประเมินสมบัติความหนืดขึ้น (pasting properties) ด้วยเครื่องอาร์วีเอ สตาร์ชจะเปลี่ยนไปเป็นเจลมีผลทำให้ความหนืดสูงขึ้น โดยการควบคุมให้อยู่ที่สภาวะอุนหภูมิสูงภายใต้แรงเฉือนค่าหนึ่ง ทำให้ทราบความเสถียรของตัวอย่างที่ทดสอบ หลังจากนั้นทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลง เพื่อแสดงถึงค่าเซตแบคระหว่างการเปลี่ยนเป็นเจล ค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว ได้แก่

pasting temperature	คือ อุนหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเป็นลักษณะหนืดขึ้น (paste) (องศาเซลเซียส)
peak viscosity	คือ ความหนืดสูงสุดของการเปลี่ยนเป็นลักษณะหนืดขึ้นในช่วงอุนหภูมิเริ่มต้นถึงอุนหภูมิ 95 องศาเซลเซียส (อาร์วียู)
time to peak	คือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงความหนืดสูงสุด (นาที)
temperature at peak	คือ อุนหภูมิที่ความหนืดสูงสุด(องศาเซลเซียส)
break down	คือ ความหนืดต่ำสุดในช่วงอุนหภูมิ 95 - 50 องศาเซลเซียส
set back	คือ ความหนืดที่สูงขึ้นหลังจากเบรกคาวน์เนื่องจากอุนหภูมิต่ำลงและโมเลกุลของสตาร์ชเริ่มยึดเหนี่ยวกันแข็งแรงขึ้น (อาร์วียู)
final viscosity	คือ ความหนืดสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ (อาร์วียู)



ภาพผนวกที่ ข1 ลักษณะเส้นความหนืดที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว



ภาคผนวก ค

ตัวอย่างอ้างอิงและแบบทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส

ตารางผนวกที่ ค1 แสดงตัวอย่างอ้างอิงที่ใช้ในการประเมินทางประสาทสัมผัสคุณลักษณะด้าน
เนื้อสัมผัสของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง

คุณลักษณะ	ตัวอย่างอ้างอิง	ระดับความเข้ม
1. ความแข็ง (hardness)	เต้าหู้อ่อน ตราเกษตร	0.5
	วุ้น ตรานางเงือก 1.0% ผสมน้ำหวานเข้มข้นกลั่น	1
	สละ ตราเฮลล์ บลูบอย 9%	
	วุ้น ตรานางเงือก 1.5% ผสมน้ำหวานเข้มข้นกลั่น	4.5
	สละ ตราเฮลล์ บลูบอย 9%	
	วุ้น ตรานางเงือก 3% ผสมน้ำหวานเข้มข้นกลั่นสละ ตราเฮลล์ บลูบอย 9%	6
2. ความเหนียว (stickiness)	ถั่วเขียว ตราไรท์พิชย์ ต้มสุก (ถั่ว 170 กรัม แช่ในน้ำ นาน 30 นาที จากนั้นนำไปต้มในน้ำ 600 กรัมที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 25 นาที)	0.5
	ข้าวเหนียว ตราดอกบัว หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า โดยใช้อัตราส่วนข้าว:น้ำ = 1:1	10

ที่มา: คัดแปลงจาก สิริกาญจน์ (2551)

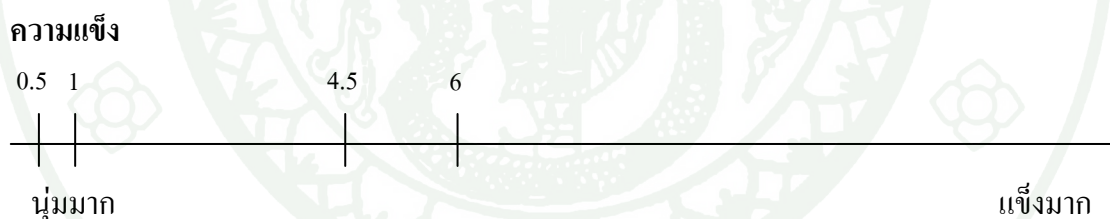
แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ
(Quantitative Descriptive Analysis, QDA)

ผู้ทดสอบभि..... วันที่.....

เพศ ☐ ชาย ☐ หญิง อายุ.....ปี

ผลิตภัณฑ์ ข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง

คำชี้แจง โปรดทำเครื่องหมายเส้นตรงและเขียนรหัสของแต่ละตัวอย่างบนเครื่องหมายเส้นตรงนั้น เพื่อแสดงตำแหน่งที่ท่านได้ให้แก่แต่ละตัวอย่างในด้านความแข็งแรงและความเหนียวของผลิตภัณฑ์ตามที่ท่านคิดว่าเหมาะสมที่สุด สำหรับค่าความแข็งให้ท่านเลี้ยวตัวอย่างด้วยพินกรามเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง ได้แก่ เต้าหู้อ่อน และวุ้นที่มีความเข้มข้น 3 ระดับ ซึ่งแทน 0.5, 1, 4.5 และ 6 คะแนน ตามลำดับ ส่วนค่าความเหนียวให้ท่านใช้นิ้วหัวแม่มือและนิ้วชี้กดตัวอย่างเพื่อประเมินแรงที่ใช้ในการแยกนิ้วมือออกจากกันเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง ได้แก่ ถั่วเขียวคั้นและข้าวเหนียว ซึ่งแทน 0.5 และ 10 คะแนน ตามลำดับ โดยคะแนนอ้างอิงด้านความแข็งแรงและความเหนียวได้ให้ไว้บนเส้นตัวอย่างแล้ว โปรดทำการทดสอบตามลำดับตัวอย่างที่จัดเรียงไว้ให้จากซ้ายไปขวา



รหัสตัวอย่างที่ท่านชอบ (ด้านเนื้อสัมผัส) มากที่สุดคือ.....

คำแนะนำ.....

ขอบคุณค่ะ

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบ (9-point hedonic scale)

ชื่อผู้ทดสอบชิม.....วันที่.....

เพศ ☐ ชาย ☐ หญิง อายุ.....ปี

คำชี้แจง กรุณาทดสอบตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งตามลำดับที่นำเสนอจากซ้ายไปขวา และให้คะแนนความชอบของตัวอย่างด้านเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็งและความเหนียว กรุณاب้วนปากระหว่างตัวอย่าง

- | | | |
|---------------------|--------------------|------------------|
| 1 = ไม่ชอบมากที่สุด | 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย | 7 = ชอบปานกลาง |
| 2 = ไม่ชอบมาก | 5 = เฉยๆ | 8 = ชอบมาก |
| 3 = ไม่ชอบปานกลาง | 6 = ชอบเล็กน้อย | 9 = ชอบมากที่สุด |

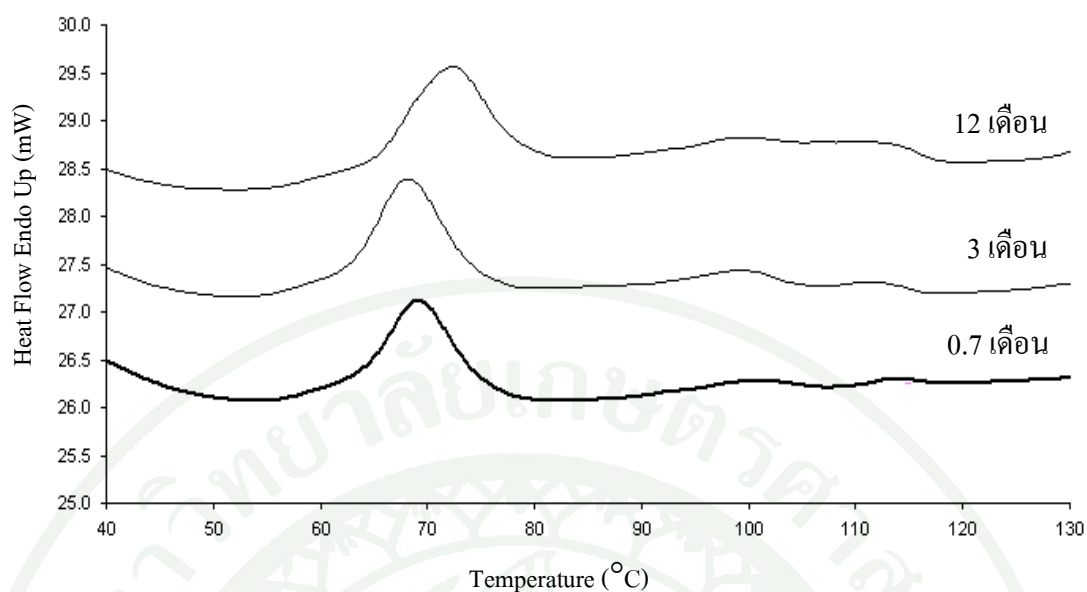
รหัสตัวอย่าง						
คะแนน	ความแข็ง					
	ความเหนียว					

ความคิดเห็น ตัวอย่างที่ชอบที่สุดคือ.....เพราะ.....
ตัวอย่างที่ไม่ชอบที่สุดคือ.....เพราะ.....

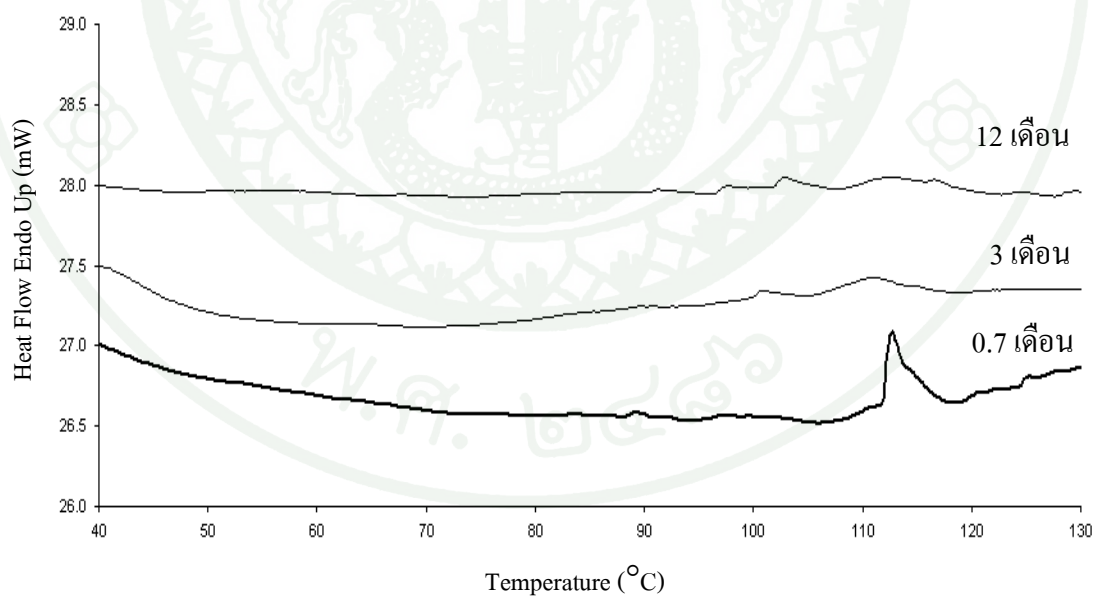
คำแนะนำ.....

ขอบคุณค่ะ

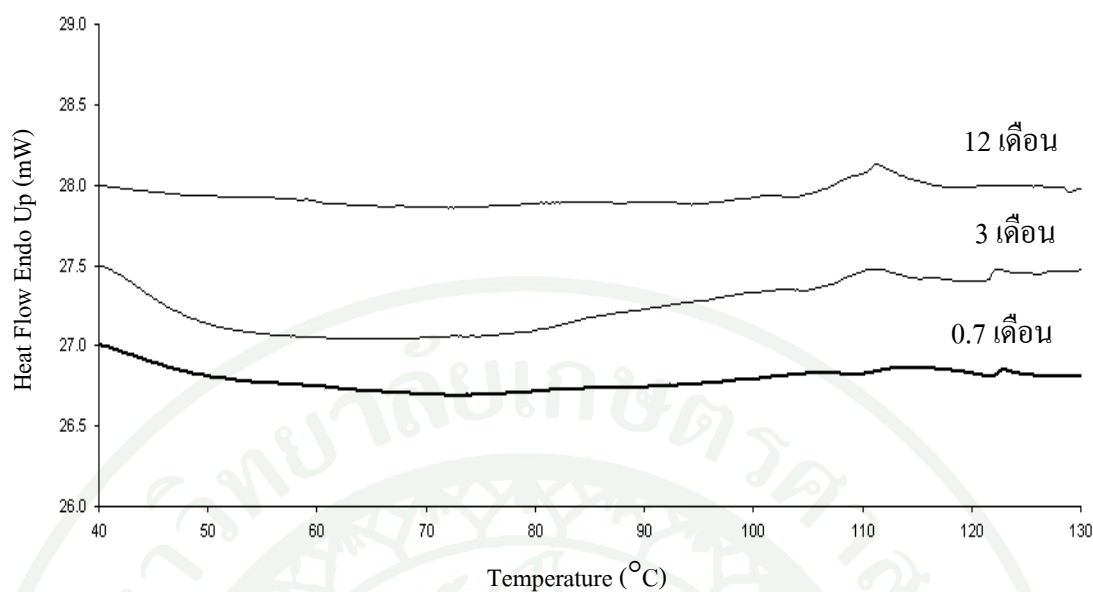




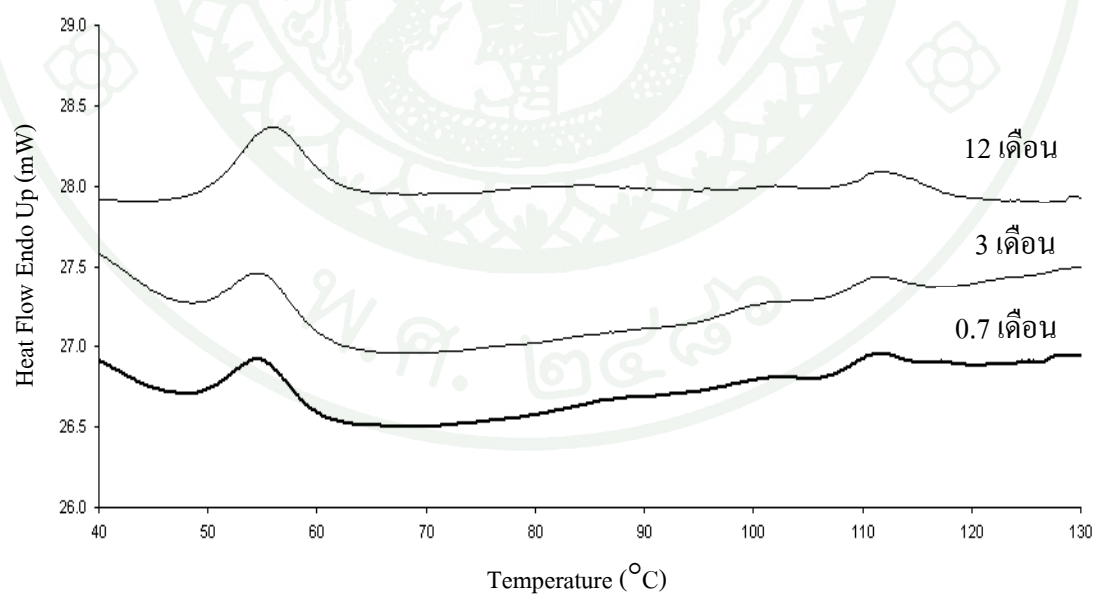
ภาพผนวกที่ 31 กราฟการดูดกลืนความร้อนในการเกิดเจลลิตไนเซชันของแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ



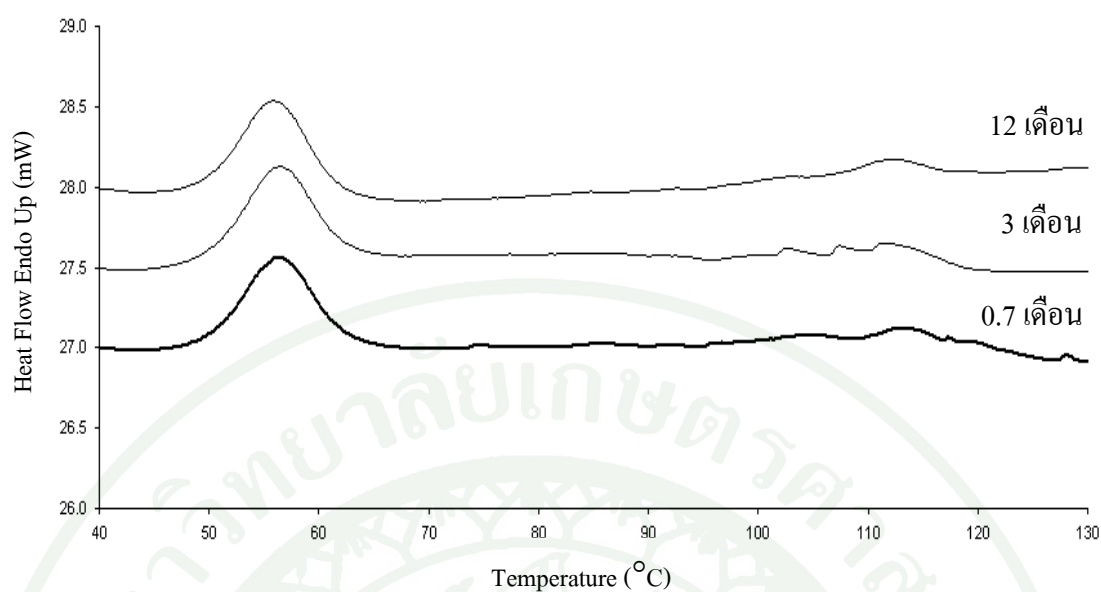
ภาพผนวกที่ 32 กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายผลึกเอมิโลเพกทินรีโทรเกรดของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ ก่อนการแช่เยือกแข็ง



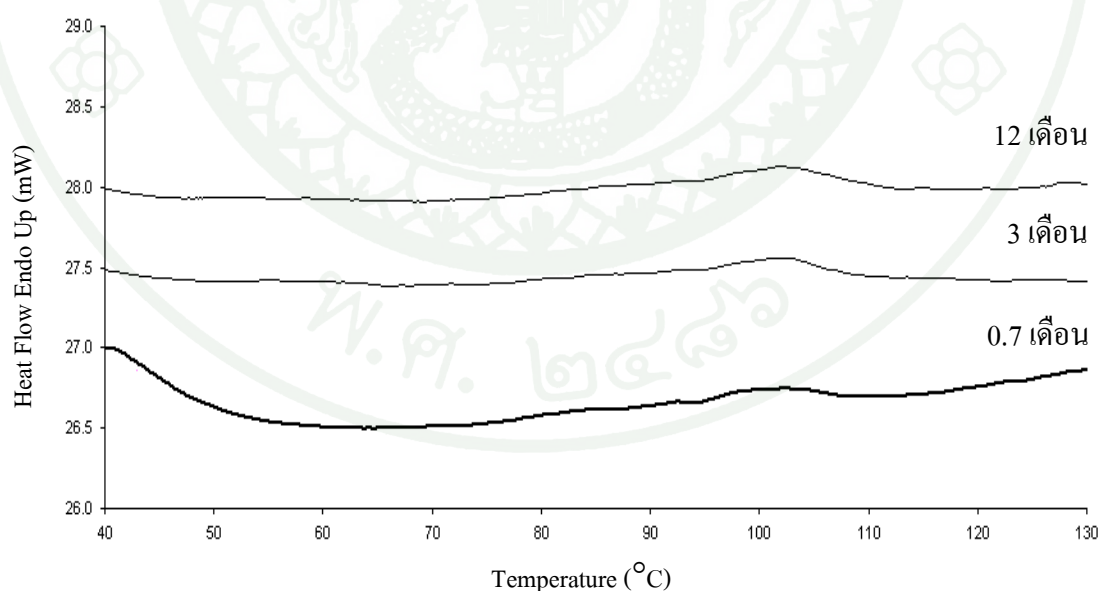
ภาพผนวกที่ 33 กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายผลึกแอมิโลเพกทินรีโทรเกรดของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ หลังผ่านการคั่วรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบ



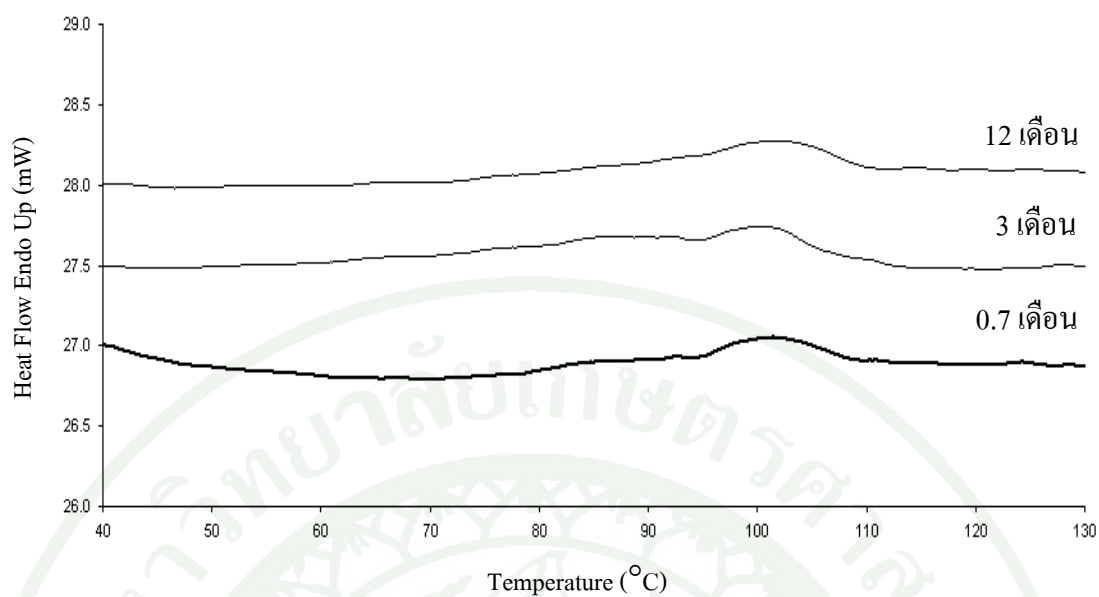
ภาพผนวกที่ 34 กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายผลึกแอมิโลเพกทินรีโทรเกรดของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ หลังผ่านการคั่วรูปจากเยือกแข็ง 3 รอบ



ภาพผนวกที่ 5 กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายผลึกแอมิโลเพกทินรีโทรเกรดของข้าวหุงสุกจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ หลังผ่านการคั่วรูปจากเยือกแข็ง 5 รอบ



ภาพผนวกที่ 6 กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันของเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ หลังผ่านการคั่วรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบ



ภาพผนวกที่ ๗7 กราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและ
ไขมันของเจลแป้งข้าวจากข้าวที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ หลังผ่านการคืนรูป
จากเยือกแข็ง 5 รอบ

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาววรรธนี เกตุคง
เกิดวันที่	11 กุมภาพันธ์ 2531
สถานที่เกิด	จังหวัดกระบี่
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2553)
ผลงานทางวิชาการ	1. Katekhong, W. and S. Charoenrein. 2012. The effect of rice aging on the freeze-thaw stability of rice flour gels. Carbohydrate Polymer. 89: 777-782. 2. Katekhong, W. and S. Charoenrein. 2012. Effect of rice storage on pasting properties, swelling and granular morphology of rice flour. Asian Journal of Food and Agro-Industry. 5(3): 197-203. 3. Katekhong, W. and S. Charoenrein. 2011. Effect of rice storage on pasting properties, swelling and granular morphology of rice flour. The 12th ASEAN Food Conference, June 16-18, 2011, Bangkok, Thailand. (Poster presentation) 4. Katekhong, W. and S. Charoenrein. 2012. Effect of rice storage on pasting properties, thermal properties and freeze-thaw stability of rice flour gels. The 6th International Conference on Starch Technology, February 13-14, 2012, Bangkok, Thailand. (Poster presentation) 5. Katekhong, W. and S. Charoenrein. 2012. The effect of rice aging on syneresis and textural properties of freeze-thaw rice flour gels. The 12th IFT Annual Meeting & Food Expo, June 25-28, 2012, Las Vegas, Nevada, USA. (Poster presentation) 6. วรรธนี เกตุคง และสงวนศรี เจริญเหรียญ. 2555. ผลของการเก็บรักษาข้าวต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและรีโทเกรเดชั่นของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง. ใน รายงานการประชุมวิชาการข้าวแห่งชาติ ครั้งที่ 2 “มิติใหม่วิจัยข้าวไทย พร้อมรับการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ และการเปิดตลาดเสรีอาเซียน” (สาขาผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่าข้าว), 20-23 ธันวาคม 2555, กรุงเทพฯ. (นำเสนอผลงานแบบปากเปล่า)

ทุนการศึกษาที่ได้รับ

1. ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับ
นานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์