



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตรการอาหาร

วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง

Improvements Quality of Frozen Cooked Rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105

นามผู้วิจัย

นางสาวพรพิสาข์ ประเสริฐไทยเจริญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... รองศาสตราจารย์สรวงศรี เจริญเหรียญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... ศาสตราจารย์อรอนงค์ นัยวิกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรัณณี จิรภาคย์กุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มทาวินยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง

Improvements Quality of Frozen Cooked Rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105

โดย

นางสาวพรพิสาข์ ประเสริฐไทยเจริญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พรพิสาข์ ประเสริฐไทยเจริญ 2555: การปรับปรุงคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สงวนศรี เจริญเหรียญ, Ph.D. 146 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 ถึง 5 รอบ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ในการทดลองที่ 1 เพื่อหาวิธีการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง โดยใช้เครื่องมือ (วิธีการแบบกดและเอกซ์ทรูชัน) ที่มีความสัมพันธ์กับการประเมินค่าทางประสาทสัมผัส พบว่าวิธีการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสแบบเอกซ์ทรูชันมีความสัมพันธ์กับการประเมินทางประสาทสัมผัสมากกว่าการใช้วิธีการแบบกด เนื่องจากวิธีการแบบกดเป็นการวัดตัวอย่างเพียงไม่กี่เมล็ด จึงไม่สามารถบอกความรู้สึกโดยรวมของผู้ทดสอบได้ ในการทดลองที่ 2 ได้เติมข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียว คอนยัคกลูโคแมนแนนในข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง พบว่า ข้าวมีความแข็งมากขึ้น และความเหนียวลดลง เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการคั้นรูปจากเยือกแข็ง โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงมากตั้งแต่การคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3 ส่วนการเติมข้าวเหนียวร้อยละ 10 สามารถช่วยรักษาความนุ่มและแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 ช่วยคงความเหนียวในข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง เมื่อทำการคั้นรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 4 และ 5 ได้ตามลำดับ อีกทั้งแป้งข้าวเหนียวยังช่วยรักษาโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้ เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 5 รอบ โดยช่วยลดขนาดของรูพรุนของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งและโครงสร้างฟองน้ำ เนื่องจากการเกิดเจลของแป้งข้าวเหนียวที่ไปเคลือบและแทรกซึมลงในเมล็ดข้าวขณะหุงสุก ในการทดลองที่ 3 ได้ตรวจสอบผลอัตราการแช่เยือกแข็งต่อเนื้อสัมผัสของตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสม และไม่ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 พบว่า การเติมแป้งข้าวเหนียวร่วมกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ($3.227^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$) สามารถช่วยรักษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส โครงสร้างระดับจุลภาค และลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง ($1.821^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$) และช้า ($0.082^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$) โดยช่วยลดขนาดของผลิตภัณฑ์น้ำแข็ง และความหนาของเมทริกซ์รอบรูพรุนผลิตภัณฑ์น้ำแข็ง จึงช่วยลดการเกิดโครงสร้างฟองน้ำได้ ซึ่งผลที่ได้จากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสมีความสอดคล้องกับโครงสร้างระดับจุลภาค เมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง พบว่า สภาพที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง คือ การเติมแป้งข้าวเหนียวระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.8 และใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบรวดเร็ว

ลายมือชื่อนิติติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Pornpisa Prasertthajaroen 2012: Improvements Quality of Frozen 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. 146 pages.

The objective in this study was to improve the textural quality of frozen cooked rice cultivar Khao Dawk Mali 105 (KDML 105) after subjecting to multiple freeze-thaw cycles up to 5 cycles. This research divided into three experiments. In the first experiment, the correlate of the instrumental of the texture measurement (compression and extrusion test) with the sensory evaluation of frozen cooked rice was studied. The results showed that higher linear correlations from extrusion test with sensory evaluation than compression test for hardness and stickiness. In addition, compression test did not represent overall texture of frozen cooked rice because only a few grains were used in measurement. In the second experiment, the effect of waxy rice (RD 6), waxy rice flour (WRF) and konjac glucomannan (KGM) addition to frozen cooked rice were investigated. The results showed that the freeze-thaw cooked rice had a tendency of increased hardness and decreased stickiness with subsequent freeze-thaw cycles, most notably after three such freeze-thaw cycles. The frozen cooked rice containing 10% RD 6 had the lowest hardness and the frozen cooked rice containing 0.8% WRF had the highest stickiness subsequent to four and five freeze-thaw cycles, respectively. Analysis by scanning electron micrographs revealed that the addition of 0.8% WRF reduced the size of ice cell cavities and spongy structure after five freeze-thaw cycles. It is possible that the WRF gel coats the surface and absorbs within the cooked rice which helps to reduce the changes in texture and microstructure of the frozen cooked rice. In the last experiment, the frozen cooked KDML 105 rice without and with 0.8% WRF were frozen at three freezing rate (slow (0.082°C/min), medium (1.821°C/min) and fast (3.227°C/min)). The results showed that the cooked rice with WRF frozen at fast freezing rate was more effectively maintained the textural properties, microstructure and reduced starch retrogradation of cooked rice after freezing and thawing than medium and slow freezing rate. It is possible that the fast freezing rate produced numerous homogeneously small ice crystals embedded in a thin rice matrix. The variation in the microstructure appeared to correspond closely to both the increased hardness and decreased stickiness values. It is concluded that the best condition to most effectively improve frozen cooked rice was adding of 0.8% WRF with fast freezing rate.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือที่เป็นอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สงวนศรี เจริญเหรียญ ซึ่งให้เกียรติเป็นประธานกรรมการที่ปรึกษา กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น แนวทางในการแก้ปัญหา ความเอาใจใส่ ความเมตตา และฝึกฝนให้มีประสบการณ์ไม่ใช้แค่ด้านการเรียน แต่รวมถึงประสบการณ์อื่น ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการใช้ชีวิต ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ ดร.สายพิน ทานัฒนาลัย ประธานควบคุมการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และ ศ.ดร.วรรณมาศ คุลยชัย ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำเพิ่มเติมและช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่เมตตาอบรมสั่งสอนให้ข้าพเจ้ามีความรู้มาจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) ที่กรุณามอบทุนอุดหนุนวิจัย เพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ ขอขอบคุณบริษัท บางกอกอินดัสทรีลแก๊ส จำกัด ที่สนับสนุนในโตรเจนสำหรับการแช่เยือกแข็ง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารทุกท่านที่ให้คำแนะนำและการช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่และรุ่นน้องนิสิตปริญญาโทและเอกสาขาวิทยาศาสตร์การอาหารทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดช่วงระยะเวลาของการศึกษาและทำวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การอบรมสั่งสอนเลี้ยงดู รวมถึงให้การศึกษาดั่งแต่ยังเยาว์วัย จนมีโอกาสนในการศึกษาต่อระดับปริญญาโท ตลอดจนกำลังใจที่ดีที่มีให้มาโดยตลอด ขอขอบคุณพี่ชาย พี่สาว และน้องสาว รวมถึงผู้มีพระคุณที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ทุกท่าน สำหรับกำลังใจที่ดีและความช่วยเหลือเสมอมา

พรพิสาข์ ประเสริฐไทยเจริญ

เมษายน 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	46
สรุปและข้อเสนอแนะ	91
สรุป	91
ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	93
ภาคผนวก	110
ภาคผนวก ก การตรวจคุณภาพทางกายภาพ	111
ภาคผนวก ข การตรวจคุณภาพทางเคมีเชิงฟิสิกส์	113
ภาคผนวก ค การตรวจคุณภาพทางเคมี	117
ภาคผนวก ง ตัวอย่างอ้างอิงและแบบทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส	126
ภาคผนวก จ ข้อมูลประกอบผลการทดลอง	130
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	146

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	วิธีการประเมินคุณภาพของการหุงต้มและการรับประทานข้าว ในประเทศแถบเอเชีย	26
2	ปริมาณวัตถุดิบของแต่ละวัตถุดิบ	41
3	องค์ประกอบของวัตถุดิบทางเคมี	47
4	ขนาดของตัวอย่างเมล็ดข้าว	48
5	ค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดสี (Minolta)	49
6	อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความเหนียว ความเหนียวสูงสุด ความเหนียวต่ำสุด ความเหนียวลดลง ความเหนียวสุดท้าย และเซตแบบของแป้งข้าวทั้งสามชนิด	52
7	ค่าความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจาก เยือกแข็ง 1 และ 5 รอบ	53
8	ปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบ	56
9	ค่าความสัมพันธ์ (r^2) ระหว่างค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง ที่ได้จากการวัดโดยวิธีแบบกดและแบบเอกซทรูชันกับค่าการประเมิน ทางประสาทสัมผัส	61
10	ปริมาณความชื้นของข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ	63
11	ค่าความแข็งของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ	66
12	ค่าความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ	67
13	การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็ง และความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบ	69
14	การประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของตัวอย่างข้าวหุงสุก ที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบ	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
15 ปริมาณความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่ต่างกัน	76
16 ค่าความแข็งของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่ต่างกัน	78
17 ค่าความเหนียวของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่ต่างกัน	79
18 คะแนนจากการประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ ด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่ต่างกัน	81
19 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสความชอบ ด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่แตกต่างกัน	83
20 T_o , T_p , T_c และค่า ΔH ของข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-5 รอบ	90
ตารางผนวกที่	
ง1 แสดงตัวอย่างอ้างอิงที่ใช้ในการประเมินทางประสาทสัมผัสคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง	127
จ1 ค่าความแข็งของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 โดยใช้วิธีวัดลักษณะเนื้อสัมผัสแบบกดและแบบเอกซ์ทูรชัน	131
จ2 ค่าความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 โดยใช้วิธีวัดลักษณะเนื้อสัมผัสต่างกัน	132

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
จ3 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง 1, 3 และ 5 รอบ	133
จ4 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1	134
จ5 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3	135
จ6 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5	136
จ7 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสความชอบด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1	137
จ8 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสความชอบด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3	138
จ9 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสความชอบด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5	139
จ10 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1	140
จ11 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3	141

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
จ12 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5	142
จ13 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1	143
จ 14 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3	144
จ 15 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5	145

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว	6
2 ภาพจำลองการจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินภายใน โมเลกุลของเม็ดสตาร์ช	9
3 โครงสร้างของแอมิโลเพกทินและเม็ดสตาร์ช	11
4 กราฟเส้นแสดงอุณหภูมิในอาหารระหว่างการแช่เยือกแข็ง	17
5 โครงสร้างของคอนยัคกลูโคแมนแนน	21
6 ลักษณะการเกิดผลึกน้ำแข็งในเนื้อเยื่อเมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งต่างกัน	23
7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างและระยะทางของการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ของข้าวสุกโดยใช้วิธีการแบบเอกซ์ทรูชันและแบบกด	30
8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาของการวัดลักษณะเนื้อสัมผัส ของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง	40
9 รูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวที่ยังไม่ผ่าน (native) และผ่านการให้ความร้อน ณ อุณหภูมิต่างๆ ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านกำลังขยาย 40 เท่า	50
10 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 แป้งข้าวเหนียว กข 6 และแป้งข้าวเหนียวทางการค้าที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลง ความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว	51
11 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกก่อนและหลังคืนรูปจากเยือกแข็ง ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ	54
12 การเปรียบเทียบค่าความแข็งและความเหนียวจากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าว หุงสุกแช่เยือกแข็งด้วยวิธีการกดและเอกซ์ทรูชันและการประเมินทางประสาทสัมผัส	58
13 ค่าความสัมพันธ์ (r^2) ระหว่างค่าลักษณะเนื้อสัมผัสด้านที่ได้จากการวัดโดยใช้วิธี การวัดแบบกดและแบบเอกซ์ทรูชันของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งกับค่าการประเมิน ทางประสาทสัมผัส	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวและภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมและไม่ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 ก่อนการแช่เยือกแข็ง และผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 และ 5 รอบ	72
15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใจกลางของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกขณะที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน	74
16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิวและภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อนการแช่เยือกแข็งและที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และรวดเร็ว โดยผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 และ 5 รอบ	86
17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณและภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 ก่อนการแช่เยือกแข็ง และที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และรวดเร็ว โดยผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 และ 5 รอบ	87
ภาพผนวกที่	
ข1 ลักษณะเส้นความหนืดที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว	116
ค1 ปริมาณแอมิโลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร	124

การปรับปรุงคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง

Improvements Quality of Frozen Cooked Rice (*Oryza sativa* L.)

cv. Khao Dawk Mali 105

คำนำ

ข้าวเป็นอาหารหลักประจำชาติและเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญยิ่งของไทย โดยประเทศไทยสามารถผลิตข้าวเปลือกได้ถึงปีละประมาณ 28 – 30 ล้านตัน มูลค่าประมาณ 180,000 - 200,000 ล้านบาท ซึ่งเป็นรายได้หลักที่หล่อเลี้ยงเกษตรกรในระดับรากหญ้า อีกทั้งยังเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญสามารถสร้างรายได้และนำเงินตราเข้าประเทศปีละประมาณ 80,000 - 100,000 ล้านบาท รวมทั้งเป็นพืชที่สร้างความมั่นคงด้านอาหารด้วย (กรมการค้าภายใน, 2550) ในปัจจุบันได้มีการนำข้าวมาใช้เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยมีการนำข้าวทั้งในรูปของเมล็ดและแป้งมาใช้ประโยชน์เพื่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายและตรงตามความต้องการของผู้บริโภคมากมาย รวมไปถึงข้าวหุงสุกซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมรับประทาน (ready to eat meals) โดยผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมรับประทานนี้เป็นหนึ่งในความต้องการของผู้บริโภคที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากผู้บริโภคมีวิถีชีวิตที่เปลี่ยนแปลงไป มีความเร่งรีบ จึงมีความต้องการลดระยะเวลาและเพิ่มความสะดวกในการเตรียมอาหาร แต่ยังคงต้องการอาหารที่มีคุณค่าทางอาหารคุณภาพและรสชาติที่ดี (อรอนงค์, 2550; Luh, 2001; Gormley, 2008) ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยมากมายที่ได้การศึกษาและหาวิธีการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมรับประทานที่มีข้าวหุงสุกเป็นส่วนประกอบ (Perdon *et al.*, 1999; Srisook and Naivikul, 2004; Sitachitta *et al.*, 2006; Zhang and Sun, 2006; Yu *et al.*, 2010a, 2010b)

การแช่เยือกแข็งถือเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ทั้งในด้านคุณค่าทางอาหาร กลิ่น รส และสี ได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากที่สนใจศึกษาการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา (Giannou and Tzia, 2007; Mandara *et al.*, 2009; Yi and Kerr, 2009b; Charoenrein and Preechathamwong, 2010) แต่การแช่เยือกแข็งนั้นเป็นการถนอมอาหาร ไม่สามารถช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของอาหารได้ ดังนั้นเมื่อนำมาทำการคืนรูปจากเยือกแข็ง

คุณภาพของอาหารจะไม่ดีเท่าคุณภาพของอาหารก่อนการแช่เยือกแข็ง (ธนะบุลย์, 2533) ดังเช่นผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง โดยข้าวหุงสุกใหม่มีความนุ่มและยืดหยุ่น แต่เมื่อนำมาแช่เยือกแข็งส่งผลให้เนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกเกิดการเปลี่ยนแปลง มีค่าความแข็งและร่วนเพิ่มมากขึ้น และมีความเหนียวลดลง อันเนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของสตาร์ชที่เป็นองค์ประกอบหลักกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักแห้งในเมล็ดข้าว (Iturriaga *et al.*, 2010) การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก ดังเช่นข้าวหุงสุกเป็นผลมาจากการเกิดโครงสร้างฟองน้ำจากเมทริกซ์ของโครงข่ายสตาร์ชที่มีความหนาแน่นมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของผลึกน้ำแข็งในระหว่างแช่เยือกแข็งและคืนรูปซ้ำหลายรอบ ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังจากการคืนรูป (Eliasson and Kim, 1992; Charoenrein *et al.*, 2008; Kontogiorgos *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2010; Charoenrein *et al.*, 2011) รวมถึงหากสภาวะในการเก็บรักษา การขนส่ง ไปยังผู้ค้ารายย่อยหรือต่างประเทศมีอุณหภูมิไม่คงที่ (temperature fluctuations) ย่อมส่งผลให้อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัส (Perdon *et al.*, 1999; Yu *et al.*, 2010a; Charoenrein *et al.*, 2011; Phimolsiripol *et al.*, 2011)

เนื่องจากการบริโภคข้าวมักมีการบริโภคทั้งเมล็ด ซึ่งมีความแตกต่างจากการบริโภคธัญชาติชนิดอื่นที่มักนำมาผลิตเป็นแป้ง ดังนั้นลักษณะเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวจึงมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Cameron and Wang, 2005) ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งปัจจัยหนึ่ง คือ ปริมาณแอมิโลสในข้าว Iturriaga *et al.* (2010) พบว่าสตาร์ชข้าวสายพันธุ์อาร์เจนไทน์ (argentine genotypes rice starch) ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสสูงเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าสตาร์ชข้าวสายพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่า จึงมีงานวิจัยสนใจใช้แป้งหรือสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ มาทดแทนแป้งหรือสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูง เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก โดย Yi *et al.* (2009) พบว่าการใช้แป้งข้าวสาลีสายพันธุ์ใหม่ที่มีปริมาณแอมิโลเพกทินสูง สามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมอบ (baked products) ได้ นอกจากนี้การเติมแป้งข้าวเหนียวลงไปในเจลสตาร์ชข้าวสามารถช่วยชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าว และช่วยลดทั้งการเกิดโครงสร้างฟองน้ำและความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งซ้ำได้อีกด้วย (ณัฐสุดา, 2552) นอกจากนี้ยังมีการนำสารไฮโดรคอลลอยด์มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีงานวิจัยที่ผ่านมามีพบว่า คอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (Khanna and Tester, 2006) ค่าร้อยละการแยกของของเหลว

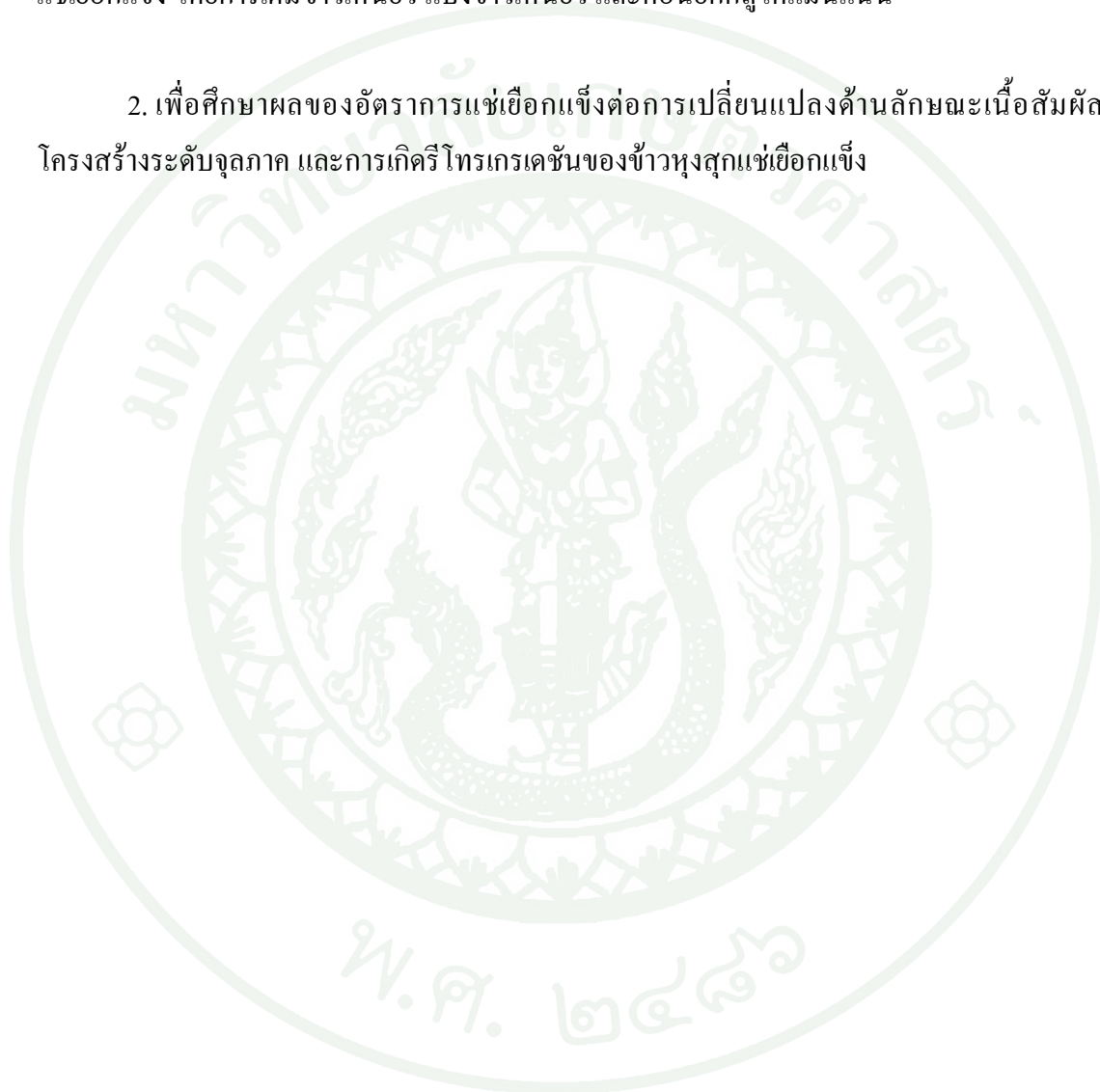
ค่าความแข็ง โครงสร้างแบบฟองน้ำและการเกิดรีโทรเกรเดชันในเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้ (อรวรรณ, 2549; Charoenreim *et al.*, 2011) แต่ยังไม่มียงานวิจัยใดที่ได้ทดลองนำข้าวเหนียว และ แป้งข้าวเหนียว ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสต่ำและไฮโดรคอลลอยด์มาปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง โดยงานวิจัยนี้มีสมมติฐานแรกว่า การเติมข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียว และคอนยัคกลูโคแมนแนน อาจช่วยลดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับจุลภาคของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ อันเนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสได้

นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งก็คือ อัตราการแช่เยือกแข็ง (freezing rate) โดยอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถกำหนดขนาดของผลึกน้ำแข็ง ในผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักได้ นอกจากนี้อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชยังขึ้นกับอัตราการแช่เยือกแข็งด้วย จากงานวิจัยที่มีการศึกษาพบว่า การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้โมเลกุลของสตาร์ชเกิดการจับตัวกัน เป็นผลให้เจลสตาร์ชข้าว (ธัญบุรณ์, 2551; Charoenrein and Preechathamwong, 2010) ขนมันที่ผลิตจากโคแช่เยือกแข็ง (Le-Bail *et al.*, 2008; Yi and Kerr, 2009a) และเส้นพาสต้าหุงสุก (Olivera and Salvadori, 2009) มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งมากกว่าอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ดังนั้นสมมติฐานที่สองของงานวิจัยนี้คือ การใช้อัตราในการแช่เยือกแข็งแบบเร็วอาจช่วยรักษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งไว้ได้ เนื่องจากช่วยลดระยะเวลาในการแช่เยือกแข็ง การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชก็อาจจะลดลงไปด้วย

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาผลของการเติมข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียว คอนยัคกลูโคแมนแนน และหาอัตราการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัส รวมไปถึงการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง และการเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อนำข้าวมาทำการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งพร้อมบริโภคที่มีข้าวหุงสุกเป็นองค์ประกอบหลัก ให้มีคุณภาพและความคงตัวด้านลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดี ตรงตามความต้องการของผู้บริโภค ช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษา อีกทั้งยังส่งเสริมการถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้ เพื่อช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์จากข้าวไทยต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัส และ โครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวหุงสุก
แช่เยือกแข็ง โดยการเติมข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียว และคอนยัคกลูโคแมนแนน
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงด้านลักษณะเนื้อสัมผัส
โครงสร้างระดับจุลภาค และการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง



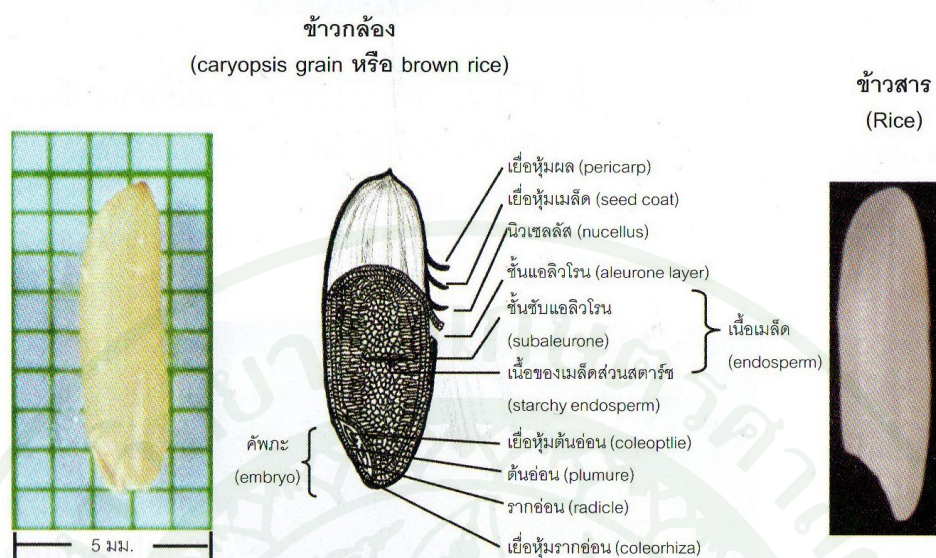
การตรวจเอกสาร

1. ข้าว

ประชากรของโลกมากกว่าครึ่งบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก โดยเฉพาะชาวเอเชียบริโภคมากกว่า 90% ข้าวที่ปลูกสำหรับบริโภค ทั่วโลกมี 2 ชนิด คือ ข้าวปลูกเอเชีย (*Oryza sativa* Linn.) และข้าวปลูกแอฟริกา (*Oryza glaberrima* Steud.) มีจำนวนพันธุ์มากกว่า 120,000 พันธุ์ ที่มีชื่อและลักษณะแตกต่างกัน (อรอนงค์, 2550)

1.1 โครงสร้างของข้าว

ข้าว เป็นคำที่ใช้เรียก เมล็ดข้าว (rice fruit, rice grain, หรือ rice seed) ซึ่งทางพฤกษศาสตร์จะหมายถึง ผล (fruit) ที่มีลักษณะเป็นผลเดี่ยว (single fruit) เกิดจากรังไข่อันเดียวชนิดลอยตัว (superior ovary) ของดอกเดี่ยวในแต่ละดอกย่อย ที่เกิดรวมกันอยู่เป็นช่อดอก ผลเดี่ยวนี้จะติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่ หรือเยื่อหุ้มผล (pericarp) ซึ่งเมื่อผลสุกหรือแก่จะเป็นผลแห้ง (dry fruit) ที่ไม่แตก (indehiscent fruit) เรียกว่า เมล็ด (caryopsis grain) ที่มีเยื่อหุ้มผล และเปลือกหุ้มเมล็ด (seed coat หรือ testa) เชื่อมรวมกันอย่างแนบแน่นโดยตลอดผลหรือเมล็ดข้าวจะมีลักษณะแตกต่างตามพันธุ์ ในด้านขนาด 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) โดย อรอนงค์ (2550) ได้แสดงรายละเอียดของแต่ละส่วน ดังนี้



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา: อรอนงค์ (2550)

1.1.1 เยื่อหุ้มผล เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอก มีความหนาประมาณ 10 ไมครอน ห่อหุ้มผลอยู่ภายใน มีลักษณะเป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์เส้นใย 6 ชั้น มีสารสีหรือรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่างๆ เช่น น้ำตาลอ่อน น้ำตาลแก่ น้ำตาลแดง น้ำตาลม่วง น้ำตาลจนเกือบดำ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมี โปรตีน เฮมิเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบสำคัญ

1.1.2 เยื่อหุ้มเมล็ด อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้ามา ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น รูปยาว เรียงตามขวาง และมีผนังบางกั้น (หนาประมาณ 0.5 ไมครอน) ภายในเซลล์มีไขมันและสารสีเช่นเดียวกับเยื่อหุ้มผล ทำให้ข้าวกล้องมีสี

1.1.3 นิวเคลลัส (nucellus) เป็นเซลล์ชั้นที่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ด แต่พันธะระหว่างนิวเคลลัสกับเยื่อหุ้มเมล็ดไม่ติดแน่น จึงแยกจากกันได้ง่าย มีความหนาประมาณ 0.8-2.5 ไมครอน

1.1.4 เยื่อชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) เป็นชั้นถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ด ประกอบด้วยเซลล์ 1-7 ชั้น และมีลักษณะของเยื่อหุ้มด้านหลังของเมล็ดจะหนากว่าเยื่อหุ้มด้านท้อง ซึ่งความหนานี้จะแตกต่างกันไปตามพันธุ์ข้าว เช่น ข้าวเมล็ดป้อม-สั้นจะมีเยื่อชั้นแอลิวโรนหนากว่าข้าวเมล็ดยาว เป็นต้น

เซลล์แอลิวโรนจะไม่เชื่อมติดกับคัพภะในส่วนของใบเลี้ยงด้านท้องของเมล็ดลงมาถึงจุดเชื่อมระหว่างคือ เซลล์ส่วนที่ห่อหุ้มรอบเนื้อของเมล็ดจะมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ และมีไซโทพลาสซึม (cytoplasm) อยู่หนาแน่น ในเซลล์ยังมีกลุ่มโปรตีนที่มีรูปร่าง (protein bodies) กลุ่มไขมัน (lipid bodies) และสารอื่นๆ เช่น นิวเคลียส (nucleus), ไมโครบอดี (microbodies), ไมโทคอนเดรีย (mitochondria), เอนโดพลาสมิค เรติคูลัม (endoplasmic reticulum), เวสิเคิล (vesicles) และพลาสทิด (plastids) เป็นต้น ส่วนเซลล์แอลิวโรนที่ห่อหุ้มคัพภะจะบาง มีไซโทพลาสซึมน้อย รูปร่างยาว มีกลุ่มไขมัน และกลุ่มโปรตีนน้อย มีเวสิเคิลมาก เป็นต้น ส่วนผนังเซลล์จะมีโปรตีน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสประกอบอยู่

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

1.1.4.2 เนื้อเมล็ดหรือเนื้อข้าว (endosperm) มีมากที่สุดเมล็ดข้าว (ประมาณ 80% ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด) แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนชั้นซับแอลิวโรน (subaleurone layer) เป็นเซลล์ 2 ชั้นอยู่ถัดจากชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) ซึ่งเป็นเยื่อหุ้มเมล็ด และส่วนที่เป็นสตาร์ชในเนื้อของเมล็ด (starchy endosperm) ในชั้นซับแอลิวโรนจะมีกลุ่มโปรตีนอยู่ 3 ลักษณะคือ ลักษณะกลมใหญ่ (ขนาด 1-2 ไมครอน) กลมเล็กขนาด (0.5-0.75 ไมครอน) และเป็นผลึกติดกันขนาด 2-3.5 ไมครอน แต่ในส่วนของเนื้อเมล็ดจะมีกลุ่มโปรตีนลักษณะกลมใหญ่เท่านั้น แทรกอยู่ในระหว่างเม็ดสตาร์ช (starch granules) มีขนาด 3-9 ไมครอน ที่มีอยู่มากอัดแน่นรวมเป็นกลุ่มเม็ดสตาร์ช (compound granules) อยู่ภายในเซลล์พาราเอนไคมา (parenchyma cell) ที่มีผนังเซลล์บาง มีรูปร่างรี หรือสี่เหลี่ยมเข้าสู่ใจกลางเมล็ด โดยด้านนอกของเมล็ดจะรี และยาวมากกว่าด้านในของเมล็ด

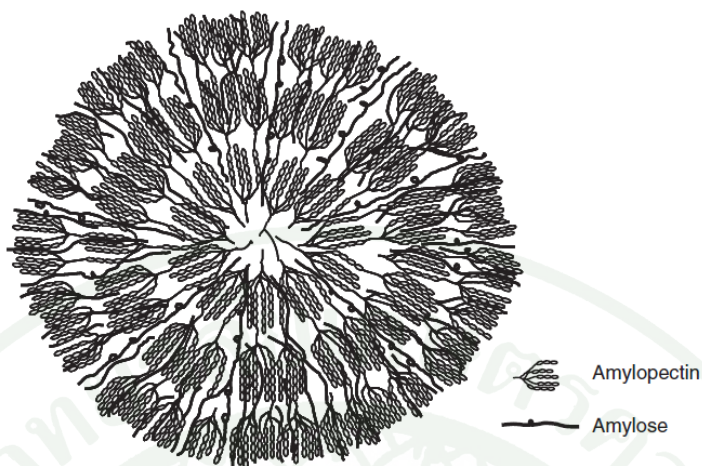
1.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวมีผลมาจากพันธุ์ สภาพการปลูก การเก็บเกี่ยว และกระบวนการแปรรูปจากข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้องและข้าวสาร การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปใช้วิธีการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ (proximate analysis)

เพื่อให้ทราบองค์ประกอบทางเคมี หรือสารอาหารหลักที่มีในข้าวคือ โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถา และคาร์โบไฮเดรตหลัก นอกจากนี้เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่มีคุณค่าทางอาหาร และโภชนาการ ได้แก่ วิตามิน แร่ธาตุ และปริมาณกรดแอมิโนที่มีโปรตีนของข้าว ข้าวสารซึ่งได้จากการขัดขาวมีปริมาณสารอาหารคือ โปรตีน (6.3-7.1 กรัม), ไขมัน (0.3-0.5 กรัม), เส้นใยหยาบ (0.2-0.5 กรัม), เถา (0.3-0.8 กรัม), เส้นใยอาหาร (0.7-2.3 กรัม) รวมทั้งพลังงาน (1,460-1,560 กิโลจูล หรือ 349-373 กิโลแคลอรี)

2. สตาร์ชข้าว

สตาร์ชข้าวพบมากที่สุดเ็นในเอนโดสเปิร์มของเมล็ดข้าวประมาณร้อยละ 90 ของสตาร์ชข้าวที่ได้ทั้งหมด โดยเมล็ดสตาร์ชมีรูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดอยู่ระหว่าง 3-9 ไมครอน กลุ่มของสตาร์ชจะรวมตัวกันอยู่ในแอมิโลพลาสต์หรือคลอโรพลาสต์ของเซลล์ มีลักษณะเป็นทรงกลมไปจนถึงรูปวงรี มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 7-39 ไมครอน (Hoshikawa, 1968; Hayakawa *et al.*, 1980; Champagne, 1996) แต่ละแอมิโลพลาสต์ประกอบด้วยสตาร์ช 20-60 เม็ด รวมกันอยู่ในเมทริกซ์อย่างหนาแน่นล้อมรอบด้วยโปรตีน หลุมที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าเป็นลักษณะเฉพาะของเมล็ดสตาร์ชที่เกิดขึ้นมาจากการที่โปรตีนถูกกำจัดออกจากเมล็ดสตาร์ช (Hayakawa *et al.*, 1980) เมื่อเมล็ดสตาร์ชมีอยู่ค่อนข้างหนาแน่นจะไม่สามารถละลายน้ำได้ และสามารถไฮเดรตน้ำได้เล็กน้อยเมื่ออยู่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เม็ดสตาร์ชสามารถกระจายตัวได้ในน้ำ ทำให้เกิดเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำ สตาร์ชมีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความหนืดเมื่อมีการให้ความร้อนแก่ของเหลวที่มีความข้นหนืดนั้น และเมื่อมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C แก่น้ำที่มีสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 5 ผสมอยู่และมีการคนตลอดเวลาจะทำให้ได้สารละลายที่มีความข้นหนืดสูงมาก โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ลักษณะ คือ แอมิโลส และแอมิโลเพกทิน ซึ่งโมเลกุลทั้งสองจัดเรียงตัวกันแน่นจนเป็นเม็ดสตาร์ช โดยมีโครงสร้างลักษณะเป็นรัศมีจากจุดกึ่งกลางแบบกิ่งผลึก (ภาพที่ 2) (อรอนงค์, 2550; Whistler and BeMiller, 1999)



ภาพที่ 2 ภาพจำลองการจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินภายในโมเลกุลของสตาร์ช

ที่มา: Jane (2009)

2.1 สัดส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพกทิน

สตาร์ชถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลักของเมล็ดข้าว สัดส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินในสตาร์ชที่อยู่ในเมล็ดข้าวจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวหุงสุกมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ในระหว่างการหุงสุก ข้าวที่มีแอมิโลสสูงจะดูดน้ำได้มากกว่าข้าวที่มีแอมิโลสต่ำ ข้าวจึงไม่เหนียวติดกันทำให้ข้าวพุ่มีช่องอากาศมากจากการขยายปริมาตรของข้าวสุก ข้าวหุงสุกจึงมีลักษณะร่วนฟู ทำให้ข้าวสุกขยายปริมาตรมากหรือหุงขึ้นหม้อ ส่วนข้าวที่มีแอมิโลสต่ำต้องการน้ำน้อย มีลักษณะเหนียวเกาะติดกันเป็นก้อนจึงหุงไม่ขึ้นหม้อ และหากใส่น้ำมากจะทำให้ได้ข้าวที่แฉะและ แต่สำหรับข้าว แอมิโลสสูงหากใส่น้ำปริมาณเดียวกับข้าวแอมิโลสต่ำทำให้ได้ข้าวที่แข็งกระด้างมาก (Juliano and Villareal, 1993)

2.2 แอมิโลส

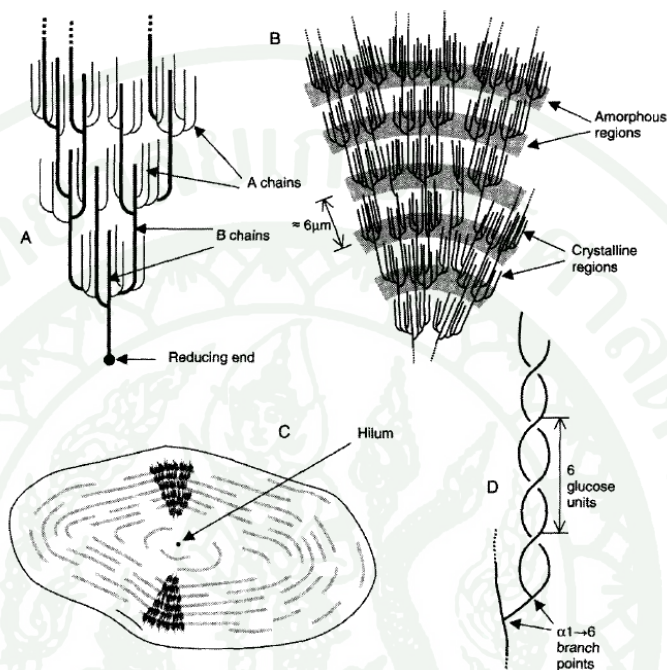
แอมิโลสเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2550) เป็นพอลิเมอร์สายตรงของ แอลฟา-ดี-กลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ แอลฟา-1, 4-กลูโคซิดิก ปัจจุบันพบว่าแอมิโลสไม่ใช่พอลิเมอร์สายตรง 100% แต่มีสายกิ่งที่ยาวจับกับสายโซ่

หลักด้วยพันธะ แอลฟา-1, 6-กลูโคซิดิก แต่พบสายกิ่งไม่มาก เมื่อแอมิโลสอยู่ในสารละลายมีแนวโน้มที่โมเลกุลจะรวมกลุ่มระหว่างสายโซ่เกิดเป็นโมเลกุลเกลียวคู่ โมเลกุลเหล่านี้สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้น ส่งผลให้แอมิโลสเกิดรีโทรเกรด (retrograde) ได้ (วรรณ, 2551) แต่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมิโลสและสมบัติสุดท้ายของข้าวหุงสุกยังไม่สามารถทำนายได้อย่างแน่ชัด โดยแอมิโลสที่ไม่ละลายในน้ำร้อน (hot-water insoluble amylose) เป็นองค์ประกอบแรกที่ส่งผลถึงคุณภาพของข้าว ขณะที่แอมิโลสที่ละลายได้ในน้ำร้อน (hot-water soluble amylose) มีผลต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของข้าวน้อยมาก การศึกษาในปัจจุบันนี้ได้มีการรายงานว่า สายกิ่งเชื่อม (B-chain) ของแอมิโลเพกทินมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับปริมาณแอมิโลสที่ไม่ละลายในน้ำร้อน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของข้าว สายกิ่งเชื่อมของแอมิโลเพกทินในเมล็ดสตาร์ชนั้นมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากมีปฏิกริยากันระหว่างโมเลกุล ทำให้ข้าวหุงสุกมีความแน่นเนื้อ ดังนั้นหากพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสที่ไม่ละลายในน้ำร้อนอยู่มากย่อมมีสายกิ่งเชื่อมของแอมิโลเพกทินอยู่มากเช่นกัน (Cameron and Wang, 2005) การศึกษาสมบัติด้านวิทยากระแส (rheological properties) ของเพสต์สตาร์ชข้าวพบว่า เพสต์สตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมีความหนืดและไหลได้ยากกว่าเพสต์ของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (Sandhya and Bhattacharya, 1985, 1989) จึงสามารถสรุปได้ว่าพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงส่งผลให้ข้าวหุงสุกมีความแข็งแรงและความเหนียวน้อยกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่าซึ่งมีความนุ่มและเหนียวมากกว่า (Reddy *et al.*, 1994)

2.3 แอมิโลเพกทิน

แอมิโลเพกทินเป็น โมเลกุลของสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่กว่าแอมิโลสหลายเท่าและมีกิ่งมาก (ภาพที่ 3) มีกลูโคสประมาณ 10^6 หน่วยต่อโมเลกุล ประกอบขึ้นด้วย แอลฟา-ดี-กลูโคส ที่เชื่อมต่อกันเป็นสายตรงด้วยพันธะ แอลฟา-1, 4-กลูโคซิดิก และมีสายกิ่งมากมายที่จับกับน้ำตาลในสายตรงด้วยพันธะ แอลฟา-1, 6-กลูโคซิดิก โดยมีปริมาณสายกิ่งในแอมิโลเพกทินร้อยละ 4-5 ลักษณะรูปแบบโมเลกุลของแอมิโลเพกทินเป็นคลัสเตอร์ (cluster) แต่ละคลัสเตอร์ ประกอบด้วยสายหลักมีหนึ่งปลายรีดิวซ์ซึ่งอยู่ที่ไฮลัม มี “สายกิ่งเชื่อม” เป็นสายกิ่งย่อยจับต่อออกไปจากโซ่หลัก (C-chain) และมีสายที่มีจุดเชื่อมตำแหน่งเดียว (A-chain) จับต่อออกไปจากสายกิ่งเชื่อม โดยสายที่มีจุดเชื่อมตำแหน่งเดียวเป็นกิ่งชั้นนอกสุดไม่มีกิ่งมาจับอีก สายกิ่งเหล่านี้ถ้ายาวเพียงพอจะสามารถอยู่แบบเกลียวคู่ได้ จึงทำให้มีการรวมตัวของสายกิ่งที่ใกล้เคียงกันจับยึดด้วยพันธะไฮโดรเจน จึงเกิด

ลักษณะผลึกในแต่ละคลัสเตอร์ แอมิโลเพกทินจึงเป็น โมเลกุลสตาร์ชที่ไม่ละลายในน้ำเย็นและทนต่อกรดได้ (วรรณา, 2551; Coultate, 2002)



ภาพที่ 3 โครงสร้างของแอมิโลเพกทินและเม็ดสตาร์ช

ที่มา: Coultate (2002)

แอมิโลเพกทินจะแพร่ออกมาจากเม็ดสตาร์ชพร้อมกับแอมิโลสในระหว่างการให้ความร้อนในกระบวนการหุงต้มของข้าว โดยปริมาณองค์ประกอบที่สามารถละลายได้ในน้ำระหว่างการหุงต้มถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ในการบ่งบอกถึงคุณภาพการหุงต้มของข้าว นอกจากนี้ปริมาณองค์ประกอบนี้ยังขึ้นกับพันธุ์ของข้าวอีกด้วย (Cameron and Wang, 2005) Mizukami *et al.* (1999) พบว่า ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่ละลายได้ในน้ำร้อนอยู่ในช่วงร้อยละ 0.3-2.4 และ 3.1-4.1 โดยน้ำหนักสตาร์ชตามลำดับ และ โมเลกุลแอมิโลเพกทินขนาดเล็กสามารถแพร่ออกมาได้ง่ายกว่า โมเลกุลแอมิโลเพกทินที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งข้าวต่างพันธุ์จะมีองค์ประกอบและโครงสร้างของสิ่งที่แพร่ออกมาต่างกัน

Cameron and Wang (2005) ได้ทำการศึกษาว่าองค์ประกอบใดในข้าวหุงสุกที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าว เพื่อช่วยในการเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวหุงสุก เพสต์และเจลแป้งข้าว โดยพบว่าปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของเจลแป้งข้าว แต่ไม่สัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าว ขณะที่สัดส่วนของสายที่มีจุดเชื่อมตำแหน่งเดียวต่อสายกิ่งเชื่อม สายยาวของแอมิโลเพกทิน และสายกิ่งเชื่อมสายสั้นของแอมิโลเพกทินต่อสายกิ่งเชื่อมสายยาวของแอมิโลเพกทิน มีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกอย่างมีนัยสำคัญ การศึกษาในปัจจุบันได้มีการรายงานว่า สายกิ่งเชื่อมของโมเลกุลแอมิโลเพกทินมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณแอมิโลสที่ไม่ละลายในน้ำร้อน

2.4 ข้าวเหนียวและแป้งข้าวเหนียว

ประเภทของข้าวสามารถแบ่งได้ตามปริมาณแอมิโลส โดยแบ่งออกได้เป็นสองประเภทหลักๆคือ ข้าวเจ้า (common rice) และข้าวเหนียว (waxy rice) ข้าวเหนียวมีปริมาณแอมิโลสประมาณร้อยละ 0-2 ในภาษาอังกฤษเรียกข้าวชนิดนี้ว่า waxy rice หรือ glutinous rice เนื่องจากคุณสมบัติเมื่อข้าวหุงสุกจะมีความเหนียวเหมือนกาว การบริโภคข้าวเหนียวยังไม่กว้างขวางนัก ในประเทศญี่ปุ่นมีการนำข้าวเหนียวไปใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตขนม โมจิ (mochi) (Mitchell, 2009)

แป้งข้าวเหนียว (waxy rice flour หรือ sweet rice flour) เป็นแป้งที่มักใช้เพิ่มความหนืดให้แก่อาหาร มีปริมาณแอมิโลสในสตาร์ชประมาณร้อยละ 2 มีกราฟค่าความหนืดต่ำกว่าแป้งจากข้าวชนิดเมล็ดสั้นบางประเภท และค่าเซตแบคค่า แป้งข้าวเหนียวมีความแตกต่างจากแป้งข้าวทั่วไปเนื่องจากมีความทนต่อการแยกของของน้ำ (syneresis) จากการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ Hanson *et al.* (1953) ได้ทดลองใช้แป้งข้าวเหนียวผสมในซอสขาว (white sauces) และเกรวี่ (gravies) แซ่เยือกแข็ง ที่มักทานคู่กับเนื้อและผักแช่เยือกแข็งพร้อมบริโภค พบว่า ซอสขาวและเกรวี่มีความคงตัวหลังจากผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ ซึ่งสันนิษฐานว่า มาจากการที่สตาร์ชข้าวเหนียวมีปริมาณแอมิโลสต่ำ อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสจึงลดลง หากนำแป้งข้าวเหนียวมาผสมกับแป้งสาลี โดยทดแทนแป้งสาลีร้อยละ 40-60 ในซอสและน้ำเกรวี่ ทำให้ซอสและน้ำเกรวี่มีความคงตัวเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 0°C เป็นเวลา 5-6 เดือน และสามารถเก็บรักษาได้เป็นปีหรือนานกว่านั้น หากใช้แป้งข้าวเหนียวเป็นแหล่งของสตาร์ชเพียงชนิดเดียวโดยไม่ทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันในระหว่างการปรุงสุก (Luh and Liu, 1991)

2.5 ปริมาณ โปรตีนและไขมัน

โปรตีนในข้าวมีปริมาณน้อยแต่เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของข้าว ข้าวที่มีปริมาณ โปรตีนสูงจะมีเนื้อสัมผัสที่แข็งกว่าข้าวที่มีปริมาณ โปรตีนต่ำกว่า และข้าวที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะดูดซึมน้ำได้ช้ากว่า เนื่องจากโปรตีนที่อยู่รอบๆ โมเลกุลของสตาร์ชขัดขวางการดูดซึมน้ำ ดังนั้นการดูดซึมน้ำจึงเป็นไปอย่างช้าๆ และนอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีนในเซชันสูงกว่าข้าวที่มีปริมาณ โปรตีนต่ำ (งามชื่น, 2536)

Hamaker and Griffin (1990) ได้รายงานว่ามีบทบาทต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านความเหนียว โดยเมื่อนำข้าวไปหุงในน้ำที่ผสมไดไธโอธรีทอล (dithiothreitol) ซึ่งเป็นสารที่สามารถย่อยโปรตีนได้ ทำให้ค่าความเหนียวของข้าวหุงสุกเพิ่มขึ้น Shibuya and Iwasaki (1982) ได้ศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ที่ย่อยโปรตีน (proteolytic enzymes) ต่อสมบัติด้านการเกิด เจลลาทีนในเซชันของแป้งข้าว พบว่า แป้งข้าวที่มีการเติมเอนไซม์ที่ย่อยโปรตีน มีความเหนียวมากกว่าแป้งข้าวที่ไม่ได้เติม ดังนั้นผู้วิจัยจึงสรุปได้ว่าโปรตีนมีบทบาทชัดเจนต่อความเหนียวของข้าวหุงสุก

นอกจากนี้องค์ประกอบเชิงซ้อนระหว่างไขมัน (กรดไขมันอิสระ) กับแอมิโลสยังช่วยสร้างความคงตัวให้แก่เจลแป้งข้าวและมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มความแน่นเนื้อ (firmness) ของข้าว (Eliasson and Krog 1985; Biliaderis and Tonogai, 1991) หากมีการกำจัดไขมันและโปรตีนออกจากเมล็ดข้าวเพียงบางส่วนจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการเกิดเจลลาทีนในเซชันของสตาร์ชข้าวได้ (Marshall *et al.*, 1990)

สมบัติของความหนืดของแป้งและสตาร์ชข้าวที่ได้จากแอมิโลกราฟ (amylograph) มีความแตกต่างกัน บ่งบอกให้ทราบว่าองค์ประกอบอื่นๆ นอกเหนือจากปริมาณแอมิโลส (เช่น โปรตีนและไขมัน) ส่งผลต่อการพองตัวและความคงรูปของเม็ดสตาร์ช (Derycke *et al.*, 2005) นอกจากนี้ Cameron and Wang (2005) ยังพบว่า ปริมาณ โปรตีนและไขมันรวม (crude lipid) มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับความแข็ง แต่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าความเหนียวของเพสต์แป้งข้าวและข้าวหุงสุก

2.6 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาทีไนเซชัน และมีการให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดสตาร์ชของตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และเกิดการแตกออก โมเลกุลของแอมิโลสขนาดเล็กระยะจะกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการควบแน่นเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเป็นเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2550)

การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชที่ผ่านเจลลาทีไนซ์แล้วเกี่ยวข้องกับการรวมตัวกันระหว่างสายเกลียวของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ซึ่งส่งผลต่อความยืดหยุ่น (elasticity) ความแน่นเนื้อและการเกิดสเตลิ่ง (staling) ของอาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ โดยการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส เกิดขึ้นเมื่อมีการให้ความเย็นและผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลาสั้นๆ ขณะที่การเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลาหลายสัปดาห์หรือหลายเดือนจนกว่าจะถึงจุดสมดุล ปริมาณแอมิโลสมีผลต่อคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นของสตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรด (Reddy *et al.*, 1994; Lii *et al.*, 1996) และความแข็งของข้าวหุงสุกใหม่ (Roferos and Juliano, 1997; Champagne *et al.*, 1999; Bett-Garber *et al.*, 2001) ส่วนปริมาณแอมิโลเพกทินมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชในระยะยาว (Yuan *et al.*, 1993; Soest *et al.*, 1994) หรือต่อความแข็งของข้าวหุงสุกที่เกิดสเตลิ่งภายในระยะเวลาอันสั้น ตามสัดส่วนความยาวของสายกิ่งเชื่อม (Reddy *et al.*, 1993; Ramesh *et al.*, 1999; Lai, 2001; Lii *et al.*, 2004) โดย Lii *et al.* (2004) ได้ศึกษาสมบัติด้านการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจากข้าวหลายสายพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสต่างกัน พบว่า หากเก็บรักษาข้าวเป็นระยะเวลาสั้นๆ (10 วัน) ค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง DSC ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกการสูญเสียความเป็นผลึกในเม็ดสตาร์ช (Singh *et al.*, 2003) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแอมิโลสและความยาวของสายแอมิโลส แต่แปรผกผันกับระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ของแอมิโลเพกทิน และภายหลังจากการเก็บเป็นระยะเวลา 1-3 เดือน ค่า ΔH มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนน้ำหนักของสายโซ่ยาวต่อสายโซ่สั้นของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ

3. การแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็ง หมายถึง กระบวนการที่เปลี่ยนน้ำ (ของเหลว) ไปเป็นน้ำแข็ง (ของแข็ง) ถือเป็นวิธีการถนอมอาหารที่สามารถรักษาคุณภาพของอาหารทั้งในด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส หรือคุณค่าทางอาหารได้ดีกว่าการถนอมอาหารด้วยวิธีการอื่นๆ จึงทำให้มีการผลิตอาหารแช่เยือกแข็งอย่างกว้างขวาง (George, 1997) อย่างไรก็ตามการแช่เยือกแข็งไม่ได้เป็นการปรับปรุงคุณภาพอาหารโดยหากนำอาหารแช่เยือกแข็งมาคืนรูปจากเยือกแข็ง คุณภาพของอาหารจะไม่ดีไปกว่าคุณภาพเริ่มแรก หากนำอาหารที่มีคุณภาพต่ำมาแช่เยือกแข็งมักก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในทางที่ไม่พึงปรารถนาทำให้ได้อาหาร (หลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง) มีคุณภาพต่ำยิ่งไปกว่าเริ่มแรก การแช่เยือกแข็งอาหารที่ประสบความสำเร็จคือการที่อาหารก่อนแช่แข็งและหลังการคืนรูป (ทั้งในด้านกลิ่นรส สี เนื้อสัมผัส รูปร่าง) มีคุณภาพที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังนั้นคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งและภายหลังการคืนรูปจะดีเพียงใดขึ้นโดยตรงและถูกกำหนดไว้ด้วยคุณภาพอาหารก่อนนำมาแช่เยือกแข็ง (ธนະบุญย์, 2533)

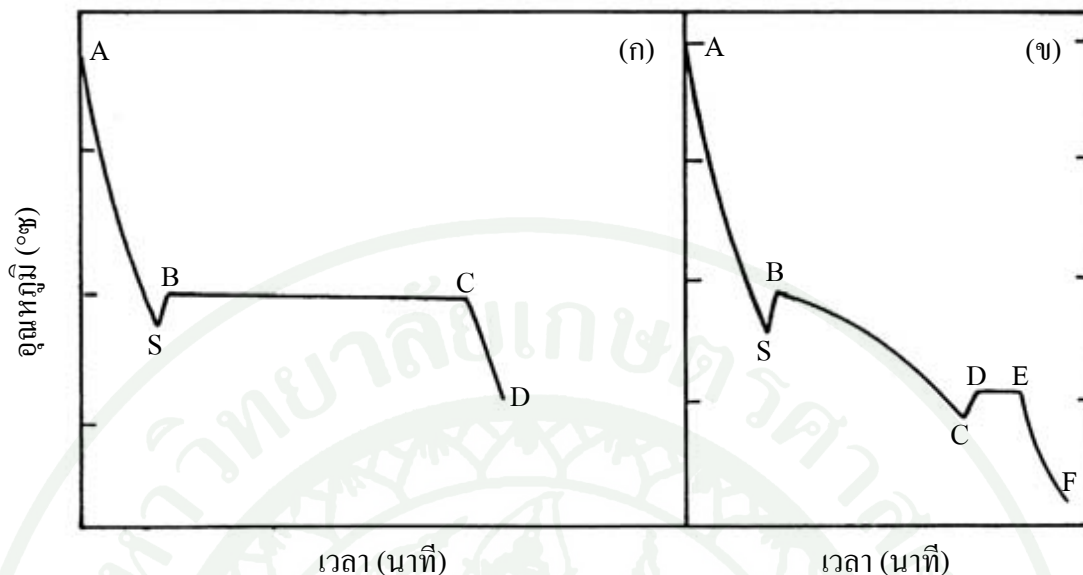
3.1 กระบวนการแช่เยือกแข็ง

การแช่เยือกแข็งประกอบด้วยกระบวนการที่ต่อเนื่องกัน 2 กระบวนการคือ การก่อผลึกนิวเคลียส (nucleation) และการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (crystal growth) (Fennema *et al.*, 1973; Hartel, 2001) ซึ่งกระบวนการแช่เยือกแข็งเริ่มขึ้นเมื่อชิ้นอาหารสัมผัสกับตัวกลางในการทำความเย็น ซึ่งอาจเป็นของแข็ง (ตัวอย่างเช่น แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอุณหภูมิ -30 ถึง -40°C หรือน้ำแข็งแห้งที่มีอุณหภูมิ -78.5°C) ของเหลว (สารทำความเย็น เช่น ไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิ -196°C) หรือแก๊ส (ไนโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์) (Maynard, 1948)

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในระหว่างการแช่เยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์ (ก) และ สารละลาย (ข) สำหรับกระบวนการแช่เยือกแข็งในระบบน้ำบริสุทธิ์ ในช่วงแรกเกิดการทำความเย็น (cooling) (ภาพที่ 4 (ก)) เป็นการดึงความร้อน (sensible heat) ออกเพื่อลดอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 0°C ขณะที่น้ำในระบบยังไม่เป็นน้ำแข็ง ในสภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (freezing point) ของระบบนั้น เป็นสภาพที่เรียกว่า เย็นยิ่งยวด (supercooling) (จุด S) ขณะที่การเกิดน้ำแข็งจำเป็นต้องดึงความร้อนแฝงของการเกิดผลึก (latent heat of crystallization) ออก อุณหภูมิจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (จุด S-B) ซึ่งการดึงความร้อนนี้

เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเป็นผลึกน้ำแข็งก่อน การกระตุ้นดังกล่าวคือ การก่อผลึกนิวเคลียส เมื่อมีการเกิดนิวเคลียส (ice nuclei) ขณะเดียวกันก็มีการดึงความร้อนแฝงของการเกิดผลึกออกอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดผลึกน้ำแข็ง (ice crystallization) ขึ้น โดยขนาดของผลึกน้ำแข็งแตกต่างกันไปตามปริมาณการก่อผลึกนิวเคลียส เมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบรวดเร็วจะมีปริมาณผลึกนิวเคลียสมากและผลึกน้ำแข็งที่ได้เป็นผลึกขนาดเล็กจำนวนมาก หากใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าก็จะเกิดผลึกนิวเคลียสปริมาณน้อย ทำให้ผลึกน้ำแข็งที่ได้มีขนาดใหญ่ เมื่อผลึกน้ำแข็งเริ่มเกิดขึ้นพร้อมกับมีการปล่อยความร้อนแฝง อุณหภูมิจึงสูงขึ้นไปถึงจุด B คือ จุดเยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์ (0°C) ขณะที่เกิดภาวะสมดุลระหว่างของแข็งและของเหลว อุณหภูมิยังคงอยู่ที่จุดเยือกแข็งจนกระทั่งน้ำเปลี่ยนไปเป็นน้ำแข็งทั้งหมดที่จุด C ซึ่งในระบบของน้ำบริสุทธิ์ กระบวนการจากจุด B ไปยังจุด C แทนเวลาในระหว่างการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการของการเกิดผลึกน้ำแข็งยังมีการกำจัดความร้อนต่อไปทำให้อุณหภูมิลดลงถึงจุด D (Zaritzky, 2006)

กระบวนการแช่เยือกแข็งในระบบอาหารมีความซับซ้อนมากกว่าในระบบน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากในระบบอาหารประกอบไปด้วยน้ำและตัวถูกละลาย จึงมีพฤติกรรมคล้ายสารละลาย (ภาพที่ 4 (ข)) เมื่อกระบวนการแช่เยือกแข็งของสารละลายเกิดขึ้น (ภาพที่ 4 (ข)) เส้นกราฟในระหว่างการทำความเย็นมีการเกิดสภาพเย็นยิ่งยวด (จุด S) การก่อผลึกนิวเคลียสเกิดขึ้นที่จุด S และปล่อยความร้อนแฝงในการเกิดผลึกออกจากระบบ อุณหภูมิจึงสูงขึ้นจากจุด S ถึงจุด B ที่จุด B แทนจุดเยือกแข็งของสารละลาย ซึ่งต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์ จุดเยือกแข็งถูกกำหนดโดยจำนวนโมเลกุลของตัวถูกละลายในระบบ อีกทั้งจุดที่เกิดความเย็นยิ่งยวดในสารละลายยังต่ำกว่าน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากตัวถูกละลายในระบบสนับสนุนให้เกิดการก่อผลึกนิวเคลียสแบบเนื้อผสม (heterogeneous nucleation) เมื่อทำความเย็นต่อไปจากจุด B ไปยังจุด C จะเกิดผลึกน้ำแข็งและมีการเพิ่มขนาดของผลึก ผลึกน้ำแข็งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงนี้ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากน้ำบริสุทธิ์แยกตัวเกิดเป็นผลึกน้ำแข็ง ทำให้จุดเยือกแข็งต่ำลง (ช่วง B-C ต่ำลง) จากนั้นสารละลายหนึ่งจะเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) ณ จุด C และเกิดเป็นผลึก ความร้อนแฝงของการเกิดผลึกถูกปล่อยออกมา เป็นผลให้อุณหภูมิจากจุด C ถึงจุด D เพิ่มขึ้นเล็กน้อยถึงอุณหภูมิยูเทคติก (eutectic temperature) ณ จุด D สารละลายกลายเป็นองค์ประกอบสมดุลยูเทคติก (eutectic equilibrium composition) การเกิดผลึกของน้ำและสารละลายดำเนินต่อไปจนถึงจุด E จากนั้นอุณหภูมิของส่วนผสมน้ำ-น้ำแข็งลดลงสู่อุณหภูมิของเครื่องแช่เยือกแข็ง (จุด F) (วิล, 2547: Zaritzky, 2006)



ภาพที่ 4 กราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในระหว่างการแช่เยือกแข็ง:
(ก) น้ำบริสุทธิ์ และ (ข) สารละลาย

ที่มา: Zaritzky (2006)

3.2 การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิก (Cryogenic freezing)

การแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกเป็นการแช่เยือกแข็งที่มีตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนหรือที่เรียกว่า ไครโอเจน (cryogen) คือ ไนโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์เหลว การดึงความร้อนออกจากอาหารเป็นไปในช่วงการเปลี่ยนสถานะของไครโอเจน โดยไครโอเจนสัมผัสกับอาหารและเคลื่อนย้ายพลังงานจากอาหารในรูปความร้อนแฝงของการระเหยหรือการระเหิด เพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงและเกิดการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว ข้อดีของการแช่เยือกแข็งแบบไครโอจินิกคือ มีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูง ค่าใช้จ่ายในการลงทุนไม่สูงมากนัก และสามารถติดตั้งและใช้งานได้อย่างรวดเร็ว (วิไล, 2547; สายสนม, 2549)

3.3 อาหารพร้อมรับประทานแช่เยือกแข็ง

ปัจจุบันผู้บริโภคมีความต้องการอาหารพร้อมรับประทานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผู้บริโภคต้องการความสะดวกสบายควบคู่ไปกับการที่ผู้บริโภคมีเวลาเพียงเล็กน้อยในการเตรียม

อาหาร จำนวนผู้หญิงวัยทำงานเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งราคาผู้แช่เยือกแข็งสำหรับเก็บรักษาอาหารพร้อมรับประทานมีราคาถูกลง และมีการปรับให้เตาอบไมโครเวฟอุ่นอาหารสำหรับบริโภคได้เร็วขึ้น (Sun, 2001) ปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อความนิยมเพิ่มมากขึ้นคือ มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของครอบครัว สมาชิกในครอบครัวมีจำนวนลดลงกลายเป็นครอบครัวขนาดเล็ก มีค่าใช้จ่ายมากขึ้น มีการเดินทางไปต่างประเทศอย่างกว้างขวาง ดังนั้นผู้บริโภคจึงมีความต้องการทานอาหารต่างวัฒนธรรมที่แปลกใหม่ (Shove, 2000) อย่างไรก็ตามตลาดสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งพร้อมรับประทาน ถือได้ว่าเป็นตลาดใหญ่ที่อยู่ภายนอกบ้าน โดยอยู่ในร้านอาหารและร้านสะดวกซื้อทั่วไป ถือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการบริการภายในร้านอาหารและได้อาหารมีคุณภาพตามที่ผู้บริโภคต้องการ นอกจากนี้ตามสถาบันต่างๆได้มีการนำอาหารพร้อมรับประทานแช่เยือกแข็งมาใช้เพราะสามารถช่วยควบคุมค่าใช้จ่ายได้ เช่น โรงพยาบาล ศูนย์รับเลี้ยงผู้สูงอายุ โรงเรียน และสำหรับส่งอาหารให้แก่ผู้สูงอายุที่อาศัยอยู่บ้าน ซึ่งอาหารเหล่านี้ทำให้เกิดการจัดการที่สะดวก รวดเร็ว ทำให้สถาบันต่างๆมั่นใจว่าผู้บริโภคได้รับสารอาหารที่เพียงพอ และมีความปลอดภัยสูง เป็นต้น (Creed, 2006)

3.4 การปรับปรุงคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก

ในระบบของอาหารแช่เยือกแข็งหลายประเภทมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับอาหารแช่เยือกแข็งเหล่านี้ คือ ในระหว่างการแช่เยือกแข็ง การเก็บรักษาและเมื่อนำมาคืนรูปจากเยือกแข็ง มักมีการเกิดริโทเกรเดชันของสตาร์ช โดยมีความสัมพันธ์กับสมบัติความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง (freeze-thaw stability) ซึ่งทำให้เกิดเนื้อสัมผัสที่ไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค และเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของอาหาร โดยเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ (spongy structure) ขึ้น เป็นเหตุให้อาหารแช่เยือกแข็งเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพ (Lee *et al.*, 2002; Ferrero and Zaritzky, 2000; Rahman, 1999) ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงคุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้

3.4.1 การใช้แป้งข้าวเหนียวในระบบของสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเหนียว และพบว่าสตาร์ชข้าวเหนียวสามารถลดอัตราการเกิดริโทเกรเดชันของสตาร์ชได้มากกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูง Iturriaga *et al.* (2010) พบว่า สตาร์ชจากข้าวพันธุ์อาร์เจนไทน์ (Argentine

genotype rice starch) ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสสูงจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าข้าวพันธุ์เดียวกันที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ

Yi *et al.* (2009) พบว่าแป้งสาลีข้าวเหนียว (waxy wheat flours) สายพันธุ์ใหม่ ที่มีปริมาณแอมิโลเพกทินสูง สามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมอบที่ผลิตจากโดแช่เยือกแข็งได้ โดยการเติมแป้งสาลีข้าวเหนียวทดแทนแป้งสาลีในปริมาณร้อยละ 15 ทำให้ขนมปังที่ได้มีปริมาตรสูง และหากเติมแป้งสาลีข้าวเหนียวทดแทนมากขึ้น ยิ่งส่งผลให้การเกิดสแตลลิงลดลง

ณัฐสุดา (2552) พบว่า การเติมแป้งข้าวเหนียวลงไปในเจลสตาร์ชข้าวช่วยชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง โดยสามารถลดการแยกออกของน้ำได้ ในการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 และเมื่อเติมแป้งข้าวเหนียวในระบบเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการแยกออกของน้ำจะลดลง อีกทั้งยังลดการเกิดโครงสร้างฟองน้ำ (Spongy structure) และความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งเมื่อผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลาานานได้อีกด้วย

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาผลของจำนวนรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็งต่อคุณสมบัติของเจลแป้งข้าว พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการคั้นรูปจากเยือกแข็ง การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช โครงสร้างฟองน้ำและรูพรุนของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งเกิดได้มากขึ้นในระบบของเจลแป้งข้าว (Charoenrein *et al.*, 2008) และยังมีการศึกษาจำนวนรอบในการคั้นรูปจากเยือกแข็งในเพลทของสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการคั้นรูปจากเยือกแข็งค่าพลังงานของการสลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกทินที่เกิดการรีโทรเกรดมีค่าเพิ่มขึ้น (Yuan and Thompson, 1998) Bhattacharya *et al.* (2003) พบว่า ปริมาณน้ำที่แข็งตัวได้ (freezable water) ในระบบของโดแช่เยือกแข็งเพิ่มมากขึ้นเมื่อโดผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 2 รอบ เนื่องจากผลิตภัณฑ์น้ำแข็งเกิดการละลายและเกิดผลึกใหม่ซ้ำ อีกทั้งโครงสร้างของกลูเตนถูกทำลายจากผลิตภัณฑ์น้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงมีการแยกของน้ำออกจากระบบ

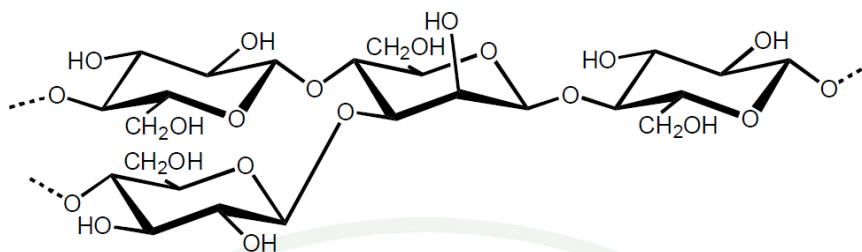
จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมานี้ ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ได้ศึกษาการปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ โดยการเติมข้าวเหนียวและแป้งข้าวเหนียว ซึ่งน่าจะทำให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้นในด้านกระบวนการการแช่เยือกแข็งและช่วยปรับปรุงคุณภาพของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้

3.4.2 การใช้ไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนประกอบในระบบของสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

ไฮโดรคอลลอยด์เป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารแตกต่างกันไปตามสมบัติของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิด ที่นิยมใช้กันมากคือ ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความคงตัว (stabilisers) สารเพิ่มความหนืด (thickener) อิมัลซิไฟอิงเอเจนต์ และสารที่ทำให้เกิดฟิล์ม (film-forming agent) นอกจากนี้ได้มีการนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งเพื่อช่วยยับยั้งการเกิดผลึกของน้ำแข็ง (inhibiting ice crystal formation) เพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสและลักษณะปรากฏที่ดี (นิธิยา, 2549; Norton and Foster, 2001)

3.4.2.1 คอนยัคกลูโคแมนแนน

คอนยัคกลูโคแมนแนน (konjac glucomannan; KGM) เป็นองค์ประกอบหลักที่พบในหัวบุก ซึ่งอยู่ในสกุล *Amorphophallus* คอนยัคกลูโคแมนแนนประกอบด้วยสายโซ่หลักคือ บีต้า-1,4-กลูโคไพราโนสและ บีต้า-ดี-แมนโนไพราโนส โดยมีอัตราส่วนระหว่างแมนโนสและกลูโคสเฉลี่ย 1.6: 1 และมีหมู่เอซีทิลกระจายอยู่ทั่วไปบนสายโมเลกุลของคอนยัคกลูโคแมนแนนประมาณร้อยละ 3-6 ซึ่งอยู่ทุกระยะ 10-19 บนอะตอมคาร์บอนของแมนโนสตำแหน่งที่ 2, 3 หรือ 6 (ภาพที่ 5) (Parry, 2010) คอนยัคกลูโคแมนแนนจัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีความหนืดสูงเมื่อผสมในน้ำสามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็ว มีสมบัติการไหลแบบซูโดพลาสติก (pseudoplastic) ได้มีการนำคอนยัคกลูโคแมนแนนมาใช้เพื่อช่วยในการเกิดเจลหรือใช้ร่วมกับพอลิแซ็กคาไรด์ตัวอื่นๆ ซึ่งทำให้มีความหนืด ความแข็งแรงของเจล และมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น เมื่อคอนยัคกลูโคแมนแนนละลายน้ำ จะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ลื่นคล้ายไขมัน มีคุณสมบัติทนต่อการย่อย หากนำไปผสมร่วมกับกัมชนิดอื่น รวมทั้งมีการเพิ่มอุณหภูมิและมีการกวนตลอดเวลาในระบบระหว่างการผลิต จะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนยัคกลูโคแมนแนนกำลังเป็นที่นิยมสำหรับอาหารเพื่อควบคุมน้ำหนัก เนื่องจากมีแคลอรีต่ำ แต่มีเส้นใยสูง กลูโคแมนแนนได้รับการจัดให้เป็น GRAS (Generally Recognized as Safe) โดยองค์การอาหารและยา (Food and Drug Administration; FDA) จากประเทศสหรัฐอเมริกา ว่าเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีความปลอดภัยทางอาหาร และในทวีปยุโรปอนุญาตให้โรงงานอุตสาหกรรมนำมาใช้เป็นวัตถุเติมแต่งในอาหารได้ นอกจากนี้เป็นสารเพิ่มความหนืดแล้ว ด้วยคุณสมบัติของกลูโคแมนแนนที่ทนต่อการย่อยได้ดี จึงถือว่าเป็นพรีไบโอติกประเภทหนึ่ง ซึ่งมีความนิยมนำมาใช้ในทางเภสัชกรรม เพื่อช่วยลดระดับน้ำตาลและไขมันในเลือด (BeMiller, 2008; Rajesh *et al.*, 2012)



ภาพที่ 5 โครงสร้างของคอนยัคกลูโคแมนแนน

ที่มา: Li *et al.* (2006)

3.4.2.2 การใช้คอนยัคกลูโคแมนแนนในระบบเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

การเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถช่วยในการเกิดเจลของแอมิโลส (amylose gelation) ในระบบเจลสตาร์ช โดยขึ้นกับความเข้มข้นและชนิดสตาร์ชที่ใช้ เจลที่ผสมระหว่างคอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 1 กับสตาร์ชร้อยละ 9 มีความแข็งแรงมากกว่าเจลสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 10 แต่หากนำเจลสตาร์ชที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนมาผ่านความร้อนอีกครั้งและทิ้งให้เย็นเพื่อให้เกิดเจลจะไม่สามารถกลับมาสร้างรูปร่างเป็นเจลได้อีก (thermo-irreversible gels) (Tye, 1991) Yoshimura *et al.* (1998) พบว่า การเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนลงในสตาร์ชข้าวโพดทำให้ระบบมีความหนืดเพิ่มขึ้น เพิ่มความคงตัวภายหลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง และลดปริมาณการแยกของน้ำ ได้ดีกว่าระบบที่มีแต่สตาร์ชเท่านั้น

ชั้นยบรุณ (2551) ได้ศึกษาการเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนลงในเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมน้ำตาลซูโครสหรือไซลิทอลและนำไปแช่เยือกแข็ง พบว่า คอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลวได้ทั้งในเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมและไม่ผสมน้ำตาล ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับโครงสร้างระดับจุลภาค นอกจากนี้คอนยัคกลูโคแมนแนนยังสามารถช่วยลดการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำได้ จึงทำให้ค่าความแข็งของเจลลดลง

Charoenrein *et al.* (2011) ได้ศึกษาการเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0-0.5 ลงในเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง แล้วนำไปคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 5 รอบ พบว่า คอนยัคกลูโคแมนแนนสามารถลดร้อยละการแยกของของน้ำ เจลมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นปานกลาง และ

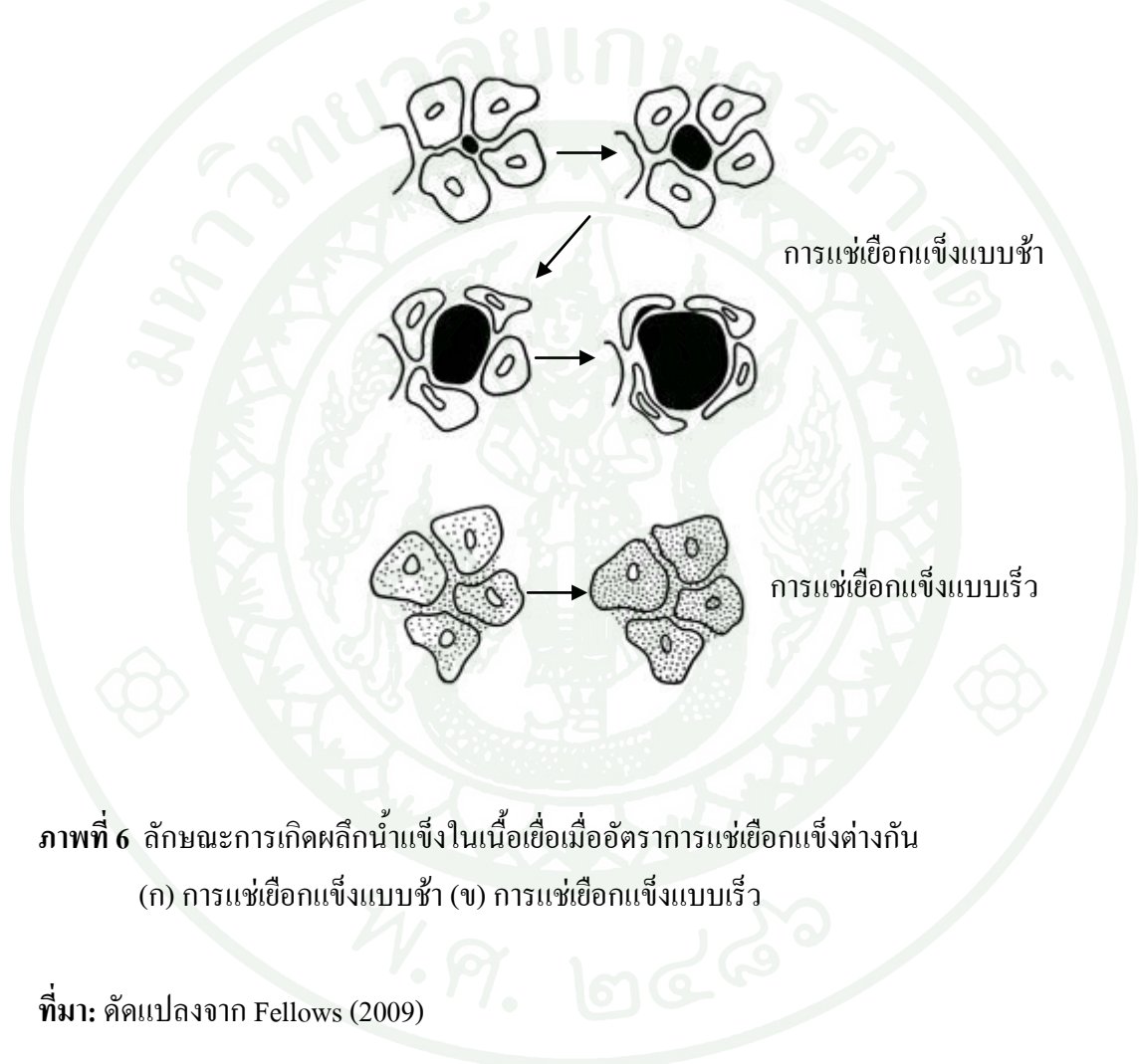
ช่วยลดขนาดและความหนาของผนังของรูพรุนจากผลึกน้ำแข็งได้ นอกจากนี้เมื่อมีผลึกน้ำแข็งที่พองตัวในเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยัคกลูโคแมนแนนยังมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติม ดังนั้นคอนยัคกลูโคแมนแนนจึงสามารถป้องกันการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งหลายรอบได้

นอกจากนี้ Muadklay and Charoenrein (2008) ได้ศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งหลายรอบของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยตรวจสอบไฮโดรคอลลอยด์ 4 ชนิด (กัวร์กัม คอนยัคกลูโคแมนแนน โลคัสต์บีนกัม และแซนแทนกัม) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 กับ 0.50 พบว่าการเติมแซนแทนกัมมีประสิทธิภาพในการลดการแยกของของน้ำ และลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังได้ดีที่สุด รองลงมาคือ โลคัสต์บีนกัม และคอนยัคกลูโคแมนแนน ส่วนกัวร์กัมนั้นกลับทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำมากขึ้น

3.5 อัตราการแช่เยือกแข็ง

อัตราของการแช่เยือกแข็ง (freezing rate) เป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถกำหนดขนาดของผลึกน้ำแข็ง คำจำกัดความของอัตราการแช่เยือกแข็งคือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหน่วยเวลา ($^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) หรือ ความเร็วของผิวหน้าน้ำแข็งที่เคลื่อนที่เข้าไปจากผิวนอกของผลิตภัณฑ์เป็นหน่วยระยะทางต่อเวลา (เช่นเดิเมตรต่อชั่วโมง) (สายสนม, 2549) หากอัตราการแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้ขั้นตอนการก่อผลึกนิวเคลียสเกิดได้มากและทำให้ได้ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กจำนวนมาก ดังภาพที่ 6 โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในตัวอย่างอาหารที่มีขนาดเล็กมากจะไม่มี ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในตัวอย่าง และแต่ละจุดภายในตัวอย่างมีอัตราการแช่เยือกแข็งเดียวกัน สำหรับตัวอย่างชิ้นอาหารที่มีขนาดใหญ่ อุณหภูมิภายในตัวอย่างในแต่ละจุดของชิ้นอาหารมีความแตกต่างกัน และบริเวณพื้นผิวของตัวอย่างอาหารที่สัมผัสกับสารทำความเย็นจะมีอัตราการแช่เยือกแข็งสูง และลดลงไปเรื่อยๆเมื่อเข้าสู่ใจกลางชิ้นอาหาร อัตราการแช่เยือกแข็งสามารถแทนได้ด้วยเวลาในการแช่เยือกแข็ง (freezing time) นั่นคือ เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากจุดแช่เยือกแข็งเริ่มต้นไปจนถึงอุณหภูมิที่ปริมาณน้ำในอาหารร้อยละ 80 ถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำแข็ง ซึ่งแต่ละจุดในตัวอย่างมีเวลาในการแช่เยือกแข็งที่แตกต่างกันไป กระบวนการแช่เยือกแข็งเสร็จสมบูรณ์เมื่อน้ำที่แข็งตัวได้ (freezable water) ที่อยู่บริเวณใจกลางของตัวอย่างโดยส่วนใหญ่ได้เปลี่ยนเป็นน้ำแข็งแล้ว (Zaritzky, 2006)

อัตราการแข่งขันเยือกแข็งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลถึงคุณภาพสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง การใช้อัตราการแข่งขันแบบช้าส่งผลให้เกิดการแยกตัวของน้ำและเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ที่สามารถทำลายลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารได้ การใช้อัตราการแข่งขันแบบเร็วสามารถป้องกันการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ได้ ทำให้ไม่สูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้และผลึกน้ำแข็งที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน (Bail, 2004)



ภาพที่ 6 ลักษณะการเกิดผลึกน้ำแข็งในเนื้อเยื่อเมื่ออัตราการแข่งขันเยือกแข็งต่างกัน

(ก) การแช่เยือกแข็งแบบช้า (ข) การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว

ที่มา: คัดแปลงจาก Fellows (2009)

3.5.1 ผลของอัตราการแข่งขันเยือกแข็งต่อผลิตภัณฑ์ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็งที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งคือ อัตราการแข่งขันเยือกแข็ง โดยอัตราของการแช่เยือกแข็งมีผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็ง หากอัตราการแข่งขันเยือกแข็งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดผลึกนิวเคลียส (nucleation) ได้มาก ซึ่งทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กจำนวนมากว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้า (Sun and

Zheng, 2006) โดย Yu *et al.* (2010a) ได้ศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งระดับต่างๆต่อคุณภาพข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง และพบว่า การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ($1.45^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) สามารถลดการเกิดริโทเกรเดชันและช่วยคงคุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ($0.09\text{-}0.53^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 7 เดือน

Arunyanart and Charoenrein (2008) ศึกษาผลของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งพบว่า เจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลว โครงสร้างฟองน้ำ และค่าความแข็งของเจลได้ดีกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วแบบช้า

ณัฐสุดา (2552) ศึกษาผลของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว พบว่า เจลสตาร์ชข้าวทั้งที่มีการเติมสตาร์ชมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถลดการแยกออกของน้ำ ขนาดรูพรุนจากผลึกน้ำแข็ง และค่าความแข็งของเจลได้ดีกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วแบบช้า

Muadklay and Charoenrein (2008) ได้ศึกษาผลของอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งที่มีต่อคุณภาพของเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง พบว่า การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากริโทเกรเดชันได้มากกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและช้า ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อื่นๆที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก ตัวอย่างเช่น ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแช่เยือกแข็งพบว่า หากใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบรวดเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ได้มีคุณภาพดีกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (Le-Bail *et al.*, 2008; Yi and Kerr, 2009a) เนื่องจากช่วยลดการทำลายโครงสร้างกลูเตนจากการที่ม้วนด้วยผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่เมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

อีกทั้งยังมีการศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งของข้าวหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษาพบว่า ข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งโดยใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ทำให้สตาร์ชเกิดริโทเกรเดชันได้มากกว่าข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (Yu *et al.*, 2010b) และ Ma and

Sun (2007) ได้ศึกษาผลของพันธุ์ข้าว และวิธีการแช่เย็นต่อค่าความแข็งของข้าวหุงสุก พบว่า วิธีการในการแช่เย็น (เปรียบเทียบระหว่าง air blast cooling และ cold room cooling) มีผลต่อค่าความแข็งของข้าวหุงสุก และค่าความแข็งนี้ยังขึ้นกับพันธุ์ข้าวที่ใช้ด้วย โดยหากใช้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสต่ำร่วมกับการแช่เย็น โดยใช้ air blast cooling ซึ่งมีอัตราการแช่เย็นแบบเร็วขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา จะเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชน้อยกว่าการใช้พันธุ์ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงร่วมกับใช้อัตราการแช่เย็นที่ช้ากว่า

4. การประเมินคุณภาพของข้าว

ข้าวที่ผ่านการสีแล้วจะมีปริมาณสตาร์ชร้อยละ 80 โปรตีนร้อยละ 6-9 และไขมันน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้คุณภาพของข้าวหุงสุกในด้านต่างๆยังได้มีการสำรวจงานวิจัยจากประเทศในแถบเอเชียเกี่ยวกับเกณฑ์และวิธีที่ใช้ในการประเมินคุณภาพการหุงต้มและรับประทานของข้าว (cooking and eating quality of rice) ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 1 (Juliano, 2001) โดยเกณฑ์ในตารางประกอบด้วยสมบัติด้านเคมีเชิงฟิสิกส์ คุณภาพของการหุงต้ม และคุณภาพของข้าวหุงสุก

ตารางที่ 1 วิธีในการประเมินคุณภาพของการหุงต้มและการรับประทานข้าวในประเทศแถบเอเชีย

สมบัติของข้าว	ความถี่*	วิธีการของ
ทางเคมีเชิงฟิสิกส์		
ปริมาณแอมิโลส	11 (I)	Colorimetric (Juliano, 1971); NIRS (Delwiche <i>et al.</i> , 1996)
ปริมาณโปรตีน	5 (I)	Kjeldahl; NIRS (Delwiche <i>et al.</i> , 1996)
การสลายเมล็ดในเบส	9 (M)	Little <i>et al.</i> (1958)
ความคงตัวของแป้งสุก	9 (M)	Cagampang <i>et al.</i> (1973)
คุณภาพของการหุงต้ม		
กลิ่น	12 (S)	IRRI (1971)
ความหนืด (RVA)	6 (I)	AACC method 61-02; Japanese method (Ohtsubo <i>et al.</i> , 1998)
ความหนืด (amylograph)	3 (I)	Juliano <i>et al.</i> (1985)
คุณภาพของข้าวหุงสุก		
ลักษณะปรากฏ	8 (S)/ 2 (I)	Toyo Midometer for gloss (Yoon, 2002)
ความแข็ง	7 (S)/ 2 (I)	Instron (OTMS cell) (Perez and Juliano, 1979)
เนื้อสัมผัส	6 (S)/ 5 (I)	Texture profile analysis (Champagne <i>et al.</i> , 1998, 1999; Perdon <i>et al.</i> , 1999)
ความเหนียว	7 (S)	
รสชาติ/กลิ่นรส	7 (S)	
กลิ่น	5 (S)	

หมายเหตุ * สํารวจ 13 ผู้ทดสอบ จาก 11 ประเทศ โดย I, M และ S คือ ประเมินโดยใช้เครื่องมือผู้วิจัย และการประเมินทางประสาทสัมผัส ตามลำดับ

ที่มา: Kim, 2000

4.1 ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุก (hardness and stickiness of cooked rice)

ในการประเมินคุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก มักมีการประเมินค่าความแข็งและความเหนียวมากที่สุด (Kim, 2000) โดยเมื่อวัดค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวโดยใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, TA-XT2) ค่าแรงสูงสุดจากการกดที่วัดได้จากกราฟคือ ค่าความแข็ง ส่วนค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการถอนหัววัดออกจากฐานคือ ค่าความเหนียว (Lee and

Peleg, 1988) บางครั้งอาจได้ค่าแรงยึดเกาะ (adhesiveness) หากทำการวัดด้วยวิธี texture profile analysis (TPA) (Kim, 2000)

ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกมีความเกี่ยวข้องกับเนื้อเยื่อและองค์ประกอบของเมล็ดข้าว เมื่อนำข้าวมาหุงสุกเมล็ดข้าวสามารถขยายตัวได้ 2.5 เท่าของขนาดเมล็ดเริ่มต้น ส่วนการเกิดเจลลาทีโนเซชันของเม็ดสตาร์ชสามารถขยายตัวได้ถึง 60 เท่าของเม็ดสตาร์ชเริ่มต้น ความแตกต่างนี้เกิดเนื่องจากผนังเซลล์ของเอนโดสเปิร์มและโปรตีนในเมล็ดข้าว ซึ่งผนังเซลล์ของเอนโดสเปิร์มและโปรตีนนี้มีความเกี่ยวข้องกับค่าความแข็งและความเหนียว ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงสมบัติด้านเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวหุงสุก โดยข้าวหุงสุกที่มีความแข็งน้อยแต่มีความเหนียวมาก มักมีรอยแตกบนผนังเซลล์ของเอนโดสเปิร์มมากและมีโปรตีนต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากข้าวหุงสุกที่มีความแข็งมากแต่มีความเหนือน้อยมักจะมีรอยแตกบนผนังเซลล์ของเอนโดสเปิร์มน้อยและมีโปรตีนสูง (Matsuo *et al.*, 1997) ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกมีความสัมพันธ์โดยตรงและผกผันกับปริมาณแอมิโลสและพลังงานเอนทัลปี (enthalpy, ΔH) ในการสลายโครงสร้างผลึกจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน ตามลำดับ (Yu *et al.*, 2009) Cameron and Wang (2005) พบว่าปริมาณโปรตีนและไขมันรวมมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าความแข็งของเพสต์แป้งข้าวและเมล็ดข้าวหุงสุก แต่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเหนียว นอกจากนี้ค่าความแข็งและความเหนียวที่ได้จากการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสและการประเมินทางประสาทสัมผัสยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณแอมิโลสของข้าว

4.2 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

โดยทั่วไปประสาทสัมผัสของมนุษย์สามารถบอกได้ทั้ง ลักษณะปรากฏ กลิ่น กลิ่นรส และเนื้อสัมผัสของอาหาร (Meullenet *et al.*, 2001) ผลที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสโดยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนมักมีความสัมพันธ์กับเนื้อสัมผัสหรือความนุ่มแข็งของข้าวหุงสุกมาก แต่มีข้อจำกัดคือ ใช้ต้นทุนสูงและใช้เวลานานในการฝึกฝนผู้ทดสอบเพื่อให้เกิดความชำนาญ (Sesmat and Meullenet, 2001)

วิธีการที่มักใช้สำหรับการประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของข้าว คือ การทดสอบด้านความชอบ (น้ำฝน, 2548; สิริกาญจน์, 2551) การทดสอบแบบเรียงลำดับ (Juliano, 2001) และการทดสอบแบบพรรณนาเชิงปริมาณ (สมพร, 2545; น้ำฝน, 2548; สิริกาญจน์, 2551;

Champagne *et al.*, 1998; Lyon *et al.*, 2000; Meullenet *et al.*, 1998, 2000; Sesmet and Meullenet, 2001)

4.3 การทดสอบคุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก

เชื่อกันว่าคุณภาพในการรับประทานข้าวหุงสุกเกี่ยวข้องกับคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส (ความแข็ง และความเหนียว) กลิ่น และองค์ประกอบทางเคมี (ปริมาณโปรตีน แอมิโลส และความชื้น) (Matsuo *et al.*, 1997) แต่เนื่องจากการบริโภคข้าวมักมีการบริโภคแบบหุงสุกทั้งเมล็ด ดังนั้นเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวหุงสุกจึงเป็นลักษณะด้านคุณภาพสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Okabe, 1979; Saleh and Meullenet, 2007) เทคนิคการประเมินผลทางประสาทสัมผัสและการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องมือเป็นประโยชน์ในการบ่งบอกลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัสที่แท้จริงได้ (Meullenet *et al.*, 2000) แต่เนื่องจากการประเมินทางประสาทสัมผัสมีข้อจำกัด คือ ใช้ต้นทุนสูงและต้องใช้เวลาในการฝึกฝนผู้ทดสอบ ดังนั้นวิธีในการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องมือที่สามารถทำนายผลเนื้อสัมผัสของตัวอย่างได้อย่างแม่นยำ จะสามารถทดแทนขั้นตอนในการประเมินทางประสาทสัมผัสโดยใช้ผู้ทดสอบสำหรับกระบวนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ได้

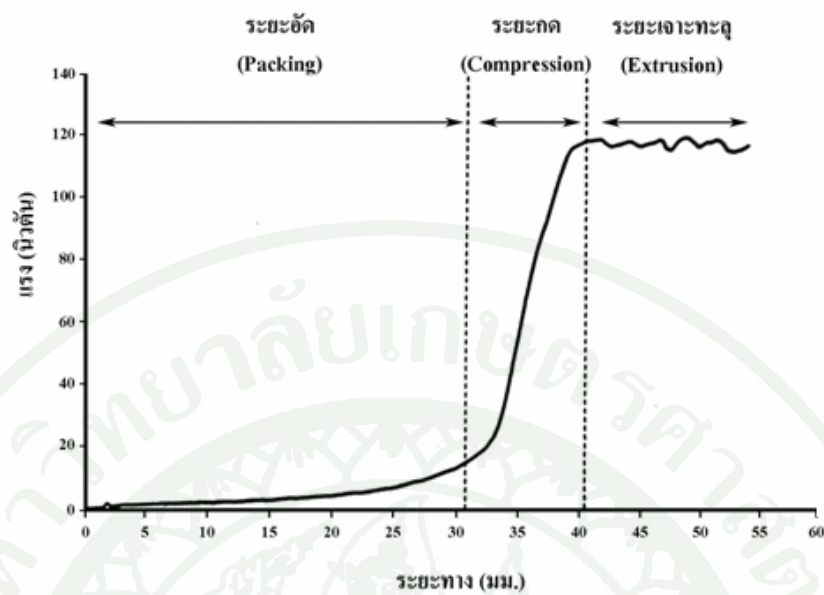
การทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) นั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีการเอกซทรูชันถือเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในการนำมาประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ใช้วิธีนี้ในการทดสอบ (Juliano *et al.*, 1984; Meullenet *et al.*, 1998; Sitakalin and Meullenet, 2000; Sesmet and Meullenet, 2001; Ghasemi *et al.*, 2009) โดยปกติแล้วการวัดด้วยวิธีการนี้ใช้ตัวอย่างข้าวปริมาณมาก เนื่องจากในการทดสอบมีการบรรจุตัวอย่างลงในเซลล์ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยได้ใช้การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกด้วยวิธีแบบกด (Juliano *et al.*, 1981, 1984; Okabe 1979; Szczesniak and Hall 1974) โดยวิธีการนี้จะใช้หัววัดแบบแบน (flat plates) กดลงบนตัวอย่างเมล็ดข้าว Julino *et al.* (1984) พบว่าวิธีการวัดด้วยวิธีแบบกดนี้เหมาะสำหรับการใช้กับตัวอย่างปริมาณน้อย (เพียงแค่ไม่กี่เมล็ดเท่านั้น)

Meullenet *et al.* (1998) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสที่ได้จากการประเมินทางประสาทแบบพรรณาเชิงปริมาณกับการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้วิธีเอกซ-

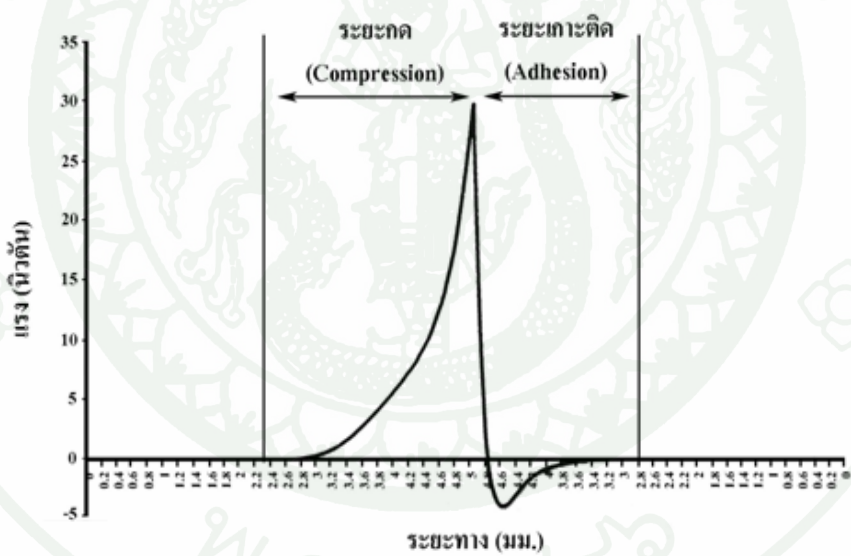
ทรูชัน พบว่า ค่าความสัมพันธ์ที่ได้อยู่ในช่วง 0.22 – 0.70 ซึ่งคุณลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้จากการวัดเนื้อสัมผัสด้วยวิธีเอกซ์ทรูชันมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสมากที่สุด คือ ค่าความแข็ง (hardness) ($r^2 = 0.62$) และค่าการติดฟัน (toothpack) ($r^2 = 0.70$)

Sesmat and Meullenet (2001) ได้ทำนายคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสของข้าวหุงสุก 11 ลักษณะ โดยใช้ลักษณะเนื้อสัมผัส 14 ลักษณะที่ได้จากการวัดโดยวิธีแบบกดมาใช้ในสมการทำนาย พบว่า การวัดค่าโดยวิธีการกดสามารถทำนายลักษณะเนื้อสัมผัสข้าวหุงสุกที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสทั้งหมด 7 ลักษณะ ได้แก่ ค่าการเกาะติดกันของตัวอย่างเมื่อยังไม่ได้เคี้ยว (cohesion of bolus) ค่าการเกาะติดริมฝีปาก (adhesion to lips) ค่าความแข็ง (hardness) ค่าการเกาะรวมตัวกันของตัวอย่าง (cohesiveness of mass) ค่าความหยาบของตัวอย่าง (roughness of mass) ค่าแรงที่ใช้ในการแยกฟัน (toothpull) และค่าการติดฟัน (toothpack) โดยสามารถทำนายค่าความสัมพันธ์ (Optimized Rcal) ได้มากกว่า 0.6

Sitakalin and Meullenet (2000) ได้วัดคุณลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้วิธีการแบบกดและแบบเอกซ์ทรูชัน พบว่า ทั้งสองวิธีสามารถนำมาทำนายคุณลักษณะที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสได้ โดยวิธีการเอกซ์ทรูชันใช้วิเคราะห์ตัวอย่างข้าวที่เป็นกลุ่ม มีปริมาณมาก ขณะที่วิธีการแบบกดวัดเพียงไม่กี่เมล็ด ดังนั้นวิธีการแบบกดจึงเหมาะสมในการวัดมากกว่าวิธีการเอกซ์ทรูชันหากมีปริมาณตัวอย่างเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการวัดแบบเอกซ์ทรูชันจะให้ค่าที่มีความแม่นยำและสามารถทำนายแบบจำลองของคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของตัวอย่างได้ดีกว่า อีกทั้งเนื่องจากวิธีการเอกซ์ทรูชันเหมาะกับการวัดตัวอย่างที่มีปริมาณมาก จึงเป็นวิธีที่บ่งบอกความรู้สึกของผู้ทดสอบโดยรวมได้ดีกว่าวิธีการแบบกด กราฟจากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสโดยวิธีแบบเอกซ์ทรูชันและแบบกดแสดงดังภาพที่ 7 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง (กรัม) และระยะทาง (% strain)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง (นิวตัน) และระยะทาง (มม.) ของการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของข้าวสุกโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (ก) วิธีเอกซ์ทรูชัน และ (ข) วิธีการแบบกด

ที่มา: คัดแปลงจาก Sitakalin and Meullenet (2000)

จากการศึกษาของ Sitakalin and Meullenet (2000) พบว่า การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องมือสามารถทำนายคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสได้ทุกคุณลักษณะ ได้แก่ การเกาะติดริมฝีปาก (adhesion to lips) ขนาดอนุภาค (particle size) ความแข็ง (hardness) การเกาะรวมตัวของตัวอย่าง (cohesiveness of mass) ความหยาบของตัวอย่าง (roughness of mass) ความเหนียว หรือแรงที่ใช้ในการแยกฟัน (toothpull) การติดฟัน (toothpack) และความเป็นอิสระของอนุภาค (loose particles) ซึ่งการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสทั้งสองวิธีสามารถทำนายค่าที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสได้ดี โดยสามารถทำนายค่าความสัมพันธ์ (relative ability of prediction values; RAP) ได้มากกว่า 0.70 แต่การทดสอบด้วยวิธีเอกซเรย์ชันมีแม่นยำและบอกความแตกต่างของตัวอย่างได้ดีกว่าวิธีการแบบกด

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุดิบ

- 1.1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 ที่ผ่านการขัดสีแล้วจาก ห.จ.ก. โรงสีไฟฟ้าภพสินธุ์รุ่งเรือง 3 อ.กมลาพิสัย จ.ภพสินธุ์ เก็บเกี่ยวในเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2553
- 1.2 แป้งข้าวเหนียวทางการค้า ยี่ห้อนิวเกรด บริษัท ไทยวาฟูดโปรดักส์ จำกัด (มหาชน)
- 1.3 คอนยัคกลูโคแมนแนน จากบริษัท คีทแฮล์ม จำกัด

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

- 2.1.1 หม้อหุงข้าวไฟฟ้า ความจุ 1.8 ลิตร (Hitachi รุ่น R2-PM18)
- 2.1.2 เครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิกแบบพ่นไอไนโตรเจนเหลว (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 ถุงพลาสติกไนลอนขนาด 4×4 นิ้ว (Nylon/Linear low density polyethylene bags, NY/LLDPE)
- 2.1.8 เครื่องปิดผนึกถุง (Impulse sealer รุ่น PFS-300)
- 2.1.9 กล้องโพม
- 2.1.10 แผ่นความร้อน (Hot plate)
- 2.1.11 เตาอบไมโครเวฟ (Turbora รุ่น TRX-2458, Thailand)
- 2.1.12 เครื่องปั่นแห้ง (Moulinex รุ่น Y46, France)

2.1.13 ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช (Retsch, Germany)

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ

2.2.1 ตู้อบแบบลมร้อน (Hot Air Oven, Memmert รุ่น ULE500, Germany)

2.2.2 กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ (Stereoscopic Microscope, Leica รุ่น S8APO, Singapore)

2.2.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (Light Microscope, Leica รุ่น DME, Germany)

2.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, JEOL รุ่น JMS-5600LV, England)

2.2.5 เครื่องทำแห้งจุดวิกฤต (Critical Point Dryer, CPD, Energy Beam Sciences รุ่น K850, USA)

2.2.6 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC, Mettler Toledo รุ่น STAR^o SW 9.30, USA)

2.2.7 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA3D, Newport Scientific Instruments & Engineering, Australia)

2.2.8 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, Stable Micro System รุ่น TA-Xtplus, UK)

2.2.9 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (Kjeldahl Apparatus, Buchi รุ่น B-324, Switzerland)

2.2.10 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Tecator รุ่น SoxtecTM Systems HT6 1043, Sweden)

2.2.11 สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, Thermo Electron Corporation รุ่น GENESYSTM10, USA)

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

2.2.13 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Ohaus รุ่น AP210-0, Switzerland)

2.2.14 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3. สารเคมี

3.1 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์เอมิโลส

3.1.1 เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 (Ethanol, Analytical grade, Merck, Germany)

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

3.1.3 กรดแอซีติกกลั่น (Glacial acetic acid, Analytical grade, Merck, Germany)

3.1.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (Amylose from potato, Sigma, USA)

3.1.5 ไอโอดีน (Iodine, Carlo Erba Reagent, Italy)

3.1.6 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, Ajax Finechem, Australia)

3.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์โปรตีน

3.2.1 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

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

4. เครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณ และวิเคราะห์ผลทางสถิติ

4.1 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

4.2 โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 19



วิธีการ

1. การวิเคราะห์หองค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบ

1.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก (หน้า 111)

1.1.1 วัดขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าว (ดัดแปลงตามวิธีการของเครือวัลย์, 2534)

1.1.2 วัดค่าสีด้วยระบบของ Hunter

1.2 การศึกษาสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ข้าวเหนียว กข 6 และแป้งข้าวเหนียวทางการค้า

1.2.1 การตรวจสอบรูปร่างเม็ดสตาร์ชขณะให้ความร้อนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน โดยนำข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 มาบดแห้งและร้อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ชั่งแป้งข้าวผสมกับน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร (ความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักแห้ง) แล้วจึงไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 30, 50, 70 และ 90°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 10 นาที หยดสารละลายแป้งลงบนสไลด์ แล้วย้อมด้วยสารละลายไอโอดีน จากนั้นนำไปตรวจสอบขนาดและรูปร่างเม็ดสตาร์ชภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านที่กำลังขยาย 40 เท่า เปรียบเทียบผลกับเม็ดสตาร์ชที่ยังไม่ผ่านความร้อน

1.2.2 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข

1.3 การวิเคราะห์หองค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบ รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค (หน้า 117-124)

1.3.1 ความชื้น ตามวิธีการของ AOAC (2000)

1.3.2 ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีการของ Juliano (1971)

1.3.3 ปริมาณโปรตีน ตามวิธีการของ AOAC (2000)

1.3.4 ปริมาณไขมัน ตามวิธีการของ AOAC (2000)

1.3.5 ปริมาณเถ้า ตามวิธีการของ AOAC (2000)

2. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง

2.1 หุงข้าวขาวดอกมะลิ 105 ปริมาณ 800 กรัม โดยใช้อัตราส่วนข้าว: น้ำ เท่ากับ 1: 1.5 ในหม้อหุงข้าวอัตโนมัติประมาณ 45 นาที เมื่อหม้อหุงข้าวกลับสู่โหมดอุ่น ทิ้งข้าวที่หุงสุกแล้วไว้ในหม้ออีก 5 นาทีเพื่อให้ข้าวอยู่ตัว ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงในภาชนะปิดที่อุณหภูมิห้องประมาณ 15 นาที แล้วบรรจุใส่ถุงชนิด NY/LLDPE ถุงละ 30 กรัม

2.2 แช่เยือกแข็งตัวอย่างข้าวหุงสุกที่อุณหภูมิ -20°C ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอเจนิก แล้วเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมงต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งหนึ่งรอบ โดยทำการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ในการคืนรูปจากเยือกแข็งแต่ละรอบ นำตัวอย่างส่วนหนึ่งมาตรวจสอบคุณภาพและตัวอย่างที่เหลือนำไปเก็บรักษาแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งเพื่อตรวจสอบคุณภาพในรอบต่อไป โดยทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและภายหลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง ดังนี้

2.2.1 เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส โดยใช้หัวกดออกตาวาเซลล์ (ottawa cell) ชนิดเอกซ์ทรูชัน ดังข้อ 4.2.1.2 วัดค่าความแข็ง และค่าความเหนียว

2.2.2 ตรวจสอบลักษณะพิวด้านข้างของเมล็ดข้าวหุงสุกเมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 และ 5 รอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 20 เท่า

3. การหาวิธีการคืนรูปจากเยือกแข็งของข้าวหุงสุกจากการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสม

3.1 หุงข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมข้าวเหนียว กข 6 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 800 กรัม โดยใช้อัตราส่วนข้าว:น้ำ เท่ากับ 1:1.5 ในหม้อหุงข้าวอัตโนมัติประมาณ 45 นาที เมื่อหม้อหุงข้าวกลับสู่โหมดอุ่น ทิ้งข้าวที่หุงสุกแล้วไว้ในหม้ออีก 5 นาทีเพื่อให้

ข้าวอยู่ตัว ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงในภาชนะปิดที่อุณหภูมิห้องประมาณ 15 นาที แล้วบรรจุใส่ถุงชนิด NY/LLDPE ถุงละ 30 กรัม

3.2 แช่เยือกแข็งตัวอย่างข้าวหุงสุกที่อุณหภูมิ -20°C ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอเจนิก แล้วเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมงต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งหนึ่งรอบ โดยทำการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ ในแต่ละรอบนำตัวอย่างส่วนหนึ่งมาตรวจสอบคุณภาพและตัวอย่างที่เหลือนำไปเก็บรักษาแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งเพื่อตรวจสอบคุณภาพในรอบต่อไป โดยในการคืนรูปจากเยือกแข็งได้ใช้วิธีการที่แตกต่างกัน 2 วิธีเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสม ได้แก่ การใช้เตาอบไมโครเวฟ (MW) ที่ความร้อนสูงสุดเป็นเวลา 3 นาที และการใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (WB) ที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของตัวอย่างภายหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งเปรียบเทียบกับข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งตามวิธีของ AOAC (2000)

4. การหาความสัมพันธ์ระหว่างการวัดเนื้อสัมผัสโดยวิธีการวัดแบบกดและแบบเอกซ์ทรูชันกับการประเมินทางประสาทสัมผัส

การศึกษาทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก มักมีการทดสอบการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องมือร่วมกับการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส อย่างไรก็ตามวิธีการวัดโดยใช้เครื่องมืออาจไม่สะท้อนความรู้สึกของมนุษย์ที่มีต่อตัวอย่างได้อย่างแม่นยำนัก ในการทดลองนี้จึงได้ทำการหาวิธีวัดลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความสัมพันธ์กับค่าจากการประเมินทางประสาทสัมผัสได้อย่างแม่นยำและสามารถสะท้อนถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่แท้จริงได้

4.1 หุงข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมข้าวเหนียว กข 6 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 800 กรัม โดยใช้อัตราส่วนข้าว:น้ำ เท่ากับ 1:1.5 ในหม้อหุงข้าวอัตโนมัติประมาณ 45 นาที เมื่อหม้อหุงข้าวกลับสุโหมคอุ่น ทิ้งข้าวที่หุงสุกแล้วไว้ในหม้ออีก 5 นาทีเพื่อให้ข้าวอยู่ตัว ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงในภาชนะปิดที่อุณหภูมิห้องประมาณ 15 นาที แล้วบรรจุใส่ถุงชนิด NY/LLDPE ถุงละ 30 กรัม

4.2 แช่เยือกแข็งตัวอย่างข้าวหุงสุกที่อุณหภูมิ -20°C ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอเจนิก แล้วเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมงต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง

หนึ่งรอบ ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที การคืนรูปจากเยือกแข็งในแต่ละรอบนำตัวอย่างส่วนหนึ่งมาตรวจสอบคุณภาพและตัวอย่างที่เหลือนำไปเก็บรักษาแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งเพื่อตรวจสอบคุณภาพในรอบต่อไป โดยทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและภายหลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง ดังนี้

4.2.1 นำตัวอย่างข้าวหุงสุกมาวัดลักษณะเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) โดยใช้วิธีการวัด 2 แบบ ดังนี้

4.2.1.1 วิธีการวัดแบบกด โดยใช้หัววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 มิลลิเมตร (P25) โดยสุ่มตัวอย่างเมล็ดข้าวจากตรงกลางถุงที่มีขนาดและรูปร่างที่ใกล้เคียงกันจำนวน 3 เมล็ดมาเรียงกันวางบนฐานวัด โดยหันเมล็ดข้าวไปในทางเดียวกัน กดตัวอย่าง 1 ครั้ง ทำการวัดทั้งหมด 5 ครั้ง โดยมีสภาวะในการวัด ดังนี้

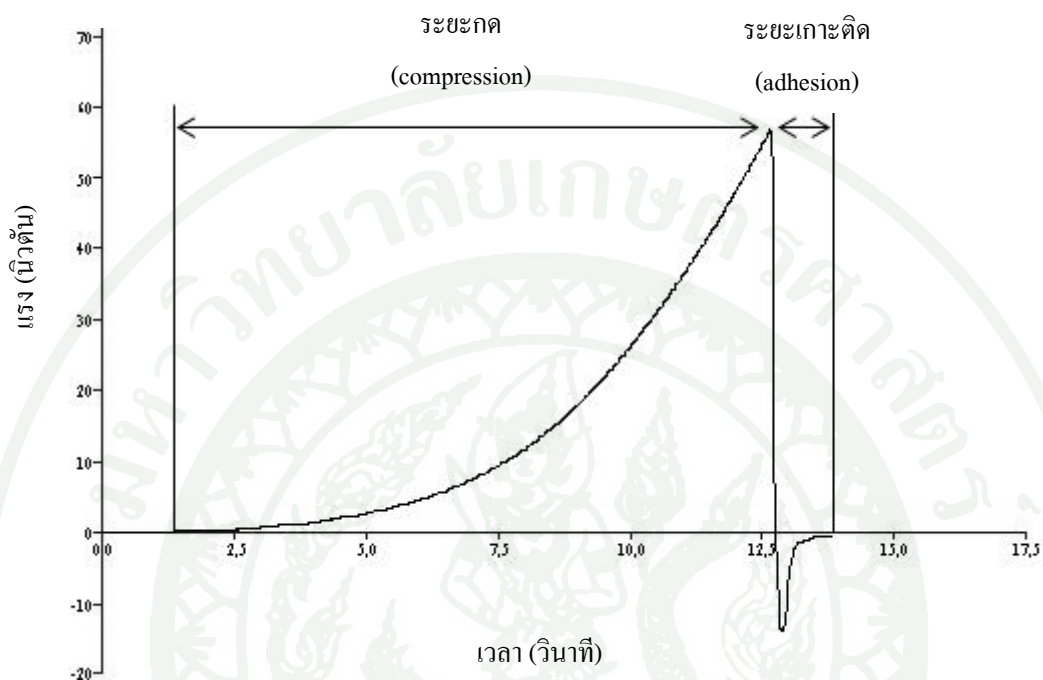
- หัววัดกดลงบนตัวอย่างเป็นระยะทางร้อยละ 70 ของความสูงตัวอย่าง
- ความเร็วก่อนวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ความเร็วขณะวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ความเร็วหลังวัด 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

4.2.1.2 วิธีการวัดแบบเอกซ์ทรูชัน โดยใช้หัวกดชนิด A/OTC ที่มีขนาดหน้าตัด 49 ตารางเซนติเมตร ใส่ตัวอย่างข้าวจำนวน 30 กรัมลงในเอกซ์ทรูชันเซลล์ จากนั้นเกลี่ยให้เสมอกัน กดตัวอย่าง 1 ครั้ง ทำการวัดทั้งหมด 5 ครั้ง โดยมีสภาวะในการวัด ดังนี้

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

ค่าแรงสูงสุดที่หัววัดกดลงบนตัวอย่างเป็นระยะทางร้อยละ 70 ของความสูงตัวอย่าง คือ ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าแรงสูงสุดในการถอนหัววัดออกจากฐานคือ ค่าความ

เหนียว (Stickiness) ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง (นิวตัน) และเวลา (วินาที) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง (นิวตัน) และเวลา (วินาที) ของการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง

4.2.2 ทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 5 คน ให้คะแนนด้วยแบบทดสอบพรรณนาเชิงปริมาณ (Quantitative Descriptive Analysis, QDA) เพื่อทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวด้านความแข็งและความเหนียว โดยใช้ตัวอย่างอ้างอิงร่วมในการประเมิน โดยค่าความแข็ง คือ แรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างด้วยฟันกราม และค่าความเหนียว คือ แรงที่ใช้ในการแยกนิ้วมือออกจากกัน เมื่อกดตัวอย่างระหว่างนิ้วหัวแม่มือและนิ้วชี้ การเตรียมตัวอย่างอ้างอิงและแบบทดสอบดังแสดงในภาคผนวก ก

4.3 กำหนดหาค่าความสัมพันธ์ (R-Square, r^2) ระหว่างค่าความแข็ง และความเหนียวที่วัดโดยใช้เครื่องมือและการประเมินทางประสาทสัมผัส

5. การปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็งด้วยการเติมข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียว และคอนยัคกลูโคแมนแนน

5.1 หุงข้าว 800 กรัม แบ่งออกเป็น 5 ทริตเมนต์ ดังตารางที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนข้าว:น้ำ เท่ากับ 1:1.5 ในหม้อหุงข้าวอัตโนมัติประมาณ 45 นาที เมื่อหม้อหุงข้าวกลับสู่โหมดอุ่น ทิ้งข้าวที่หุงสุกแล้วไว้ในหม้ออีก 5 นาทีเพื่อให้ข้าวอยู่ตัว ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงในภาชนะปิดที่อุณหภูมิห้องประมาณ 15 นาที แล้วบรรจุใส่ถุงชนิด NY/LLDPE ถุงละ 30 กรัม

ตารางที่ 2 ปริมาณวัตถุดิบของแต่ละทริตเมนต์

ตัวอย่าง	ตัวย่อ	น้ำหนัก (กรัม)				
		ข้าวขาวดอกมะลิ 105	ข้าวเหนียว กข 6	แป้งข้าวเหนียว	คอนยัคกลูโคแมนแนน	น้ำ
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	KDML 105	800	-	-	-	1200
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 + ข้าวเหนียว กข 6 ร้อยละ 10	KDML 105 + 10% RD 6	720	80	-	-	1200
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 + แป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.4	KDML 105 + 0.4% WRF	800	-	8	-	1200
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 + แป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8	KDML 105 + 0.8% WRF	800	-	16	-	1200
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 + คอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.2	KDML 105 + 0.2% KGM	800	-	-	4	1200

5.2 นำมาแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40°C ด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิก จนกว่าเมล็ดข้าวที่อยู่ใจกลางถุงมีอุณหภูมิประมาณ -25°C จากนั้นเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมงต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งหนึ่งรอบ โดยทำการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ซึ่งการ

คั้นรูปจากเยือกแข็งในแต่ละรอบจะนำตัวอย่างส่วนหนึ่งมาตรวจสอบคุณภาพและนำตัวอย่างที่เหลือไปเก็บรักษาแล้วทำการคั้นรูปจากเยือกแข็งเพื่อตรวจสอบคุณภาพในรอบต่อไป โดยทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและภายหลังการคั้นรูปจากเยือกแข็ง ดังนี้

5.2.1 ปริมาณความชื้น คัดแปลงตามวิธีของ AOAC (2000)

5.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสด้วย

ก. เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส โดยใช้หัวกด A/OTC ชนิดเอกซ์ทิวชันเชลล์ ดัง

ข้อ 4.2.1.2 วัดค่าความแข็ง และค่าความเหนียว

ข. การทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียว โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 10 คน โดยใช้แบบทดสอบพรรณนาเชิงปริมาณ ดังข้อ 4.2.2 และทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบ ด้วยวิธี 9-point hedonic scale โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน แบบทดสอบแสดงดังภาคผนวก ง

5.2.3 ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยนำตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 และ 5 รอบ มาขจัดน้ำออกจากตัวอย่างด้วยการนำไปแช่ในเอธิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 50, 70, 90 และเอธิลแอลกอฮอล์ล้วนที่อุณหภูมิห้อง โดยการแช่ตัวอย่างในแต่ละความเข้มข้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งจุดวิกฤต จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยตรวจสอบผิวด้านข้างของเมล็ดข้าวที่กำลังขยาย 35 เท่า และภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวที่กำลังขยาย 250 เท่า

6. การศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง

6.1 เลือกทริตเมนต์ที่ดีที่สุดจากข้อ 5 มาใช้ในการศึกษานี้ โดยหุงข้าวปริมาณ 800 กรัม ใช้อัตราส่วนข้าว:น้ำ เท่ากับ 1:1.5 ในหม้อหุงข้าวอัตโนมัติประมาณ 45 นาที เมื่อหม้อหุงข้าวกลับสู่โหมดอุ่น ทิ้งข้าวที่หุงสุกแล้วไว้ในหม้ออีก 5 นาทีเพื่อให้ข้าวอยู่ตัว ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงในภาชนะปิดที่อุณหภูมิห้องประมาณ 15 นาที แล้วบรรจุใส่ถุงชนิด NY/LLDPE ถุงละ 30 กรัม

6.2 แช่เยือกแข็งตัวอย่างข้าวหุงสุกโดยใช้อัตราการแช่เยือกแข็งทั้งหมด 3 ระดับ คือ อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าใช้ตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20°C และอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและเร็วใช้เครื่องแช่เยือกแข็งระบบไครโอเจนิกที่อุณหภูมิ -40 และ -80°C ตามลำดับ คำนวณหาอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งจากสูตรของ International Institute of Refrigeration (1986) และ Yu *et al.* (2010a) ดังนี้

$$\text{อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง (}^{\circ}\text{C/นาท)} = \frac{\text{อุณหภูมิสุดท้ายของการแช่เยือกแข็ง (-18}^{\circ}\text{C)} - \text{อุณหภูมิเริ่มต้นในการแช่เยือกแข็ง}}{\text{เวลาที่สิ้นสุดในการแช่เยือกแข็ง} - \text{เวลาเริ่มต้นในการแช่เยือกแข็ง}}$$

6.3 เก็บรักษาตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 5 วัน แล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็ง 1 รอบ ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 5 รอบ โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ซึ่งการคืนรูปจากเยือกแข็งในแต่ละรอบจะนำตัวอย่างส่วนหนึ่งมาตรวจสอบคุณภาพและตัวอย่างที่เหลือนำไปเก็บรักษาแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งเพื่อตรวจสอบคุณภาพในรอบต่อไป โดยทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งและภายหลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง ดังนี้

6.3.1 ปริมาณความชื้น ดัดแปลงตามวิธีของ AOAC (2000)

6.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส โดยใช้

ก. เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส โดยใช้หัวกด A/OTC ชนิดเอกซ์ทริงชันเชลล์ ดังข้อ 4.2.1.2 วัดค่าความแข็งและค่าความเหนียว

ข. การทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียว โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 10 คน โดยใช้แบบทดสอบพรรณนาเชิงปริมาณ ดังข้อ 4.2.2 และทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบ ด้วยวิธี 9-point hedonic scale โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน แบบทดสอบแสดงดังภาคผนวก ง

6.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง สำหรับตัวอย่างก่อนการแช่เยือกแข็งและที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 และ 5 รอบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังข้อ 5.2.3

6.3.4 ตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเร็ว และมีการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 และ 5 รอบ ดัดแปลงตามวิธีของ Yu *et al.* (2010a) โดย

นำตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งแล้วมาแช่ใน 99% ethanol (1:4 v/v) เพื่อคั่งน้ำออกจากตัวอย่างเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นเทผ่าน Buchner funnel และอบให้แห้งที่ 37°C ในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างข้าวที่แห้งแล้วมาบดแห้งและร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช ซึ่งตัวอย่างแบ่งข้าว 4.0 มิลลิกรัม (โดยน้ำหนักแห้ง) และเติมน้ำกลั่นด้วยไมโครไซริงค์ (micro syringe) (1:2 w/w) ลงในจานอะลูมิเนียม (Aluminum pan) ที่ชั่งน้ำหนักแล้ว ปิดฝาให้สนิท และวางตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเก็บไว้ข้ามคืน แล้วจึงนำไปวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่อง DSC โดยการให้อุณหภูมิแก่ตัวอย่างที่ 20°C เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นให้ความร้อนจาก 20 ไปจนถึง 120°C ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 10°C/นาที วิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันจากอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, T_c) และพลังงานเอนทัลปี (enthalpy, ΔH) โดย retrograded starch melting peak เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิประมาณ 40-70°C

7. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design: CRD) ทำการทดลอง 2 ครั้ง (trial) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการทดลองเปรียบเทียบค่าสมบัติด้านต่าง ๆ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS (version 19.0) ถ้ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจะนำค่าเฉลี่ยมาเปรียบเทียบ โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ

8. สถานที่ทำการทดลอง

8.1 ห้องปฏิบัติการและอาคารแปรรูปภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8.2 หน่วยงานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8.3 ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9. ระยะเวลาการทดลอง

ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2553 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ 2555

10. แหล่งทุนสนับสนุน

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2554 ภายใต้โครงการวิจัย การปรับปรุงคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University Research and Development Institute) ประจำปี 2554 ภายใต้โครงการวิจัย ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งของไทย

ผลและวิจารณ์

1. องค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบ

การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบเป็นขั้นตอนพื้นฐานสำคัญที่ช่วยให้เข้าใจ และสามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวหุงสุกเมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งได้ดียิ่งขึ้น โดยในการวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบนั้นประกอบไปด้วย การวิเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางกายภาพและเคมีเชิงฟิสิกส์

1.1 องค์ประกอบของวัตถุดิบ

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ข้าวเหนียว กข 6 แป้งข้าวเหนียว และคอนยัคกลูโคแมนแนน มี องค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3 โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 มีปริมาณแอมิ- โลสร้อยละ 17.48 ± 0.22 , 6.30 ± 0.16 ตามลำดับ ดังนั้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 จึงจัดเป็นข้าวในกลุ่ม ที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (ร้อยละ 12-20) และข้าวเหนียว กข 6 จัดเป็นข้าวในกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลส ต่ำมาก (5-12%) (Juliano *et al.*, 1981; Vandeputte and Delcour, 2004) โดย Chaichaw *et al.* (2011) พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 17.35 และ 3.92 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างจากการทดลองนี้เล็กน้อย สันนิษฐานว่าเนื่องจากความแตกต่างของ แหล่งเพาะปลูก Saeleaw and Schleiming (2010) ได้วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสในแป้งข้าวหลายชนิด พบว่าแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 7.10 ซึ่งค่าที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับปริมาณแอมิ- โลสของแป้งข้าวเหนียวที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ ทั้งนี้เนื่องจากในการวิเคราะห์ได้ใช้วิธีการของ Juliano (1971) ในการหาปริมาณแอมิโลสเช่นเดียวกัน สำหรับแป้งข้าวเหนียวทางการค้าพบว่า มี ปริมาณแอมิโลสที่แตกต่างข้าวเหนียว กข 6 เล็กน้อย อาจเนื่องจากมีความแตกต่างของพันธุ์ข้าว เหนียวที่ใช้ในการทำแป้งข้าวเหนียวทางการค้า ซึ่งผู้วิจัยไม่ทราบพันธุ์ข้าวเหนียวที่นำมาใช้ในการ ผลิตแป้งข้าวเหนียวนี้ และในการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวหุง สุกพบว่า ข้าวหุงสุกทั้งสองพันธุ์มีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจากข้าวที่ยังไม่ผ่านการหุงสุก เนื่องจาก ในระหว่างกระบวนการหุงสุก สตาร์ชในเมล็ดข้าวเกิดการดูดซับน้ำในระบบที่มีการให้ความร้อน เพื่อไปใช้ในการพองตัวและเกิดเจลาทิไนซ์เซชัน (Yadav and Jindal, 2007) โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกมีปริมาณความชื้นมากกว่าข้าวเหนียว กข 6 หุงสุก เนื่องจากข้าวที่มีปริมาณแอมิโลส

มากกว่ามักมีความสามารถในการดูดซึมน้ำในระหว่างการหุงสุกได้ดีกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่า (Juliano, 1993) นอกจากนี้ข้าวหุงสุกทั้งสองพันธุ์ยังมีการสูญเสียปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยข้าวเหนียว กข 6 หุงสุกที่มีปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างจากข้าวก่อนหุงสุก ซึ่งการสูญเสียโปรตีนและไขมันเกิดขึ้นในระหว่างการล้างข้าวและกระบวนการหุงสุก โดยการล้างข้าวทำให้สูญเสียโปรตีนและไขมันบางส่วนไปกับน้ำ ส่วนการหุงสุกข้าวเป็นการแปลงสภาพโปรตีน (protein denaturation) (Ebuehi and Oyewole, 2007) อีกทั้งยังมีการสูญเสียแร่ธาตุไปกับน้ำที่ใช้ในการหุง จึงส่งผลให้ปริมาณเถ้าลดลง (Wang *et al.*, 2009)

คอนยัคกลูโคแมนแนนที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นผงบุกที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าอยู่ร้อยละ 0.84, 0.59 และ 1.00 ตามลำดับ ซึ่งผงบุก (konjac flour) โดยทั่วไปมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าร้อยละ 2.2, 2.3 และ 5.2 ตามลำดับ แต่เมื่อนำผงบุกมาผ่านการทำให้บริสุทธิ์ (purified konjac flour หรือคอนยัคกลูโคแมนแนน) จะมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้า ร้อยละ 0.8, 0.9 และ 1.7 ตามลำดับ (Takigami, 2000)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของวัตถุดิบทางเคมี

(หน่วย: ร้อยละ โดยน้ำหนักแห้ง)

ตัวอย่าง	ความชื้น*	แอมิโลส	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	12.24 ± 0.38	17.48 ± 0.22	7.27 ± 0.15	1.15 ± 0.18	0.54 ± 0.02
ข้าวเหนียว กข 6	13.23 ± 0.06	6.30 ± 0.16	7.23 ± 0.01	1.16 ± 0.03	0.58 ± 0.01
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุก	61.38 ± 0.17	-	6.23 ± 0.13	0.31 ± 0.08	0.19 ± 0.01
ข้าวเหนียว กข 6 หุงสุก	58.78 ± 0.69	-	7.23 ± 0.08	0.27 ± 0.01	0.16 ± 0.01
แป้งข้าวเหนียวทางการค้า	11.64 ± 0.01	7.26 ± 0.34	5.80 ± 0.13	0.40 ± 0.03	0.27 ± 0.01
คอนยัคกลูโคแมนแนน	9.98 ± 0.09	-	0.84 ± 0.18	0.59 ± 0.03	1.00 ± 0.01

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- * หน่วย: ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก

1.2 ขนาดและสีของเมล็ดข้าว

พันธุ์ข้าวแต่ละพันธุ์มีลักษณะประจำพันธุ์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพในด้านขนาด รูปร่าง และสีที่แตกต่างกันไป ในด้านการตลาดได้มีการแบ่งขนาดของเมล็ดข้าวออกเป็นสามประเภทคือ ยาว ปานกลางและสั้น เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 จัดเป็นเมล็ดข้าวสารชนิดยาว และเมล็ดข้าวเหนียว กข 6 จัดเป็นเมล็ดข้าวสารชนิดยาวปานกลาง (อรอนงค์, 2550; Webb, 1991; Luh, 2001) โดยเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้มีขนาดและค่าสีในระบบ hunter ดังตารางที่ 4 และ 5 และจากค่าสีที่ได้จะเห็นได้ว่าเมล็ดข้าวเหนียว กข 6 มีความขาวขุ่นมากกว่าเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 แต่เมื่อหุงสุกพบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีความขาวมากกว่าข้าวเหนียว กข 6 ซึ่งข้าวเหนียว กข 6 มีความเหลืองเพิ่มมากขึ้นเมื่อหุงสุก สำหรับตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมข้าวเหนียว กข 6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียว ร้อยละ 0.8 มีค่าสีแตกต่างจากตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกเล็กน้อย จึงไม่เห็นความแตกต่างชัดเจนจากการสังเกต

ตารางที่ 4 ขนาดของตัวอย่างเมล็ดข้าว

ตัวอย่าง	ความยาว (มม.)	ความกว้าง (มม.)	ความยาว/ความกว้าง
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	7.04 ± 0.23	2.03 ± 0.02	3.47
ข้าวเหนียว กข 6	6.22 ± 0.17	2.08 ± 0.05	2.98

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 10 เมล็ด ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 5 ค่าสีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดสี (Minolta)

ตัวอย่าง	ค่าสี		
	L*	a*	b*
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	77.13 ± 0.12 ^d	-0.56 ± 0.06 ^a	10.93 ± 0.09 ^c
ข้าวเหนียว กข 6	84.07 ± 0.31 ^a	-1.27 ± 0.04 ^b	13.66 ± 0.16 ^a
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุก	80.11 ± 0.34 ^b	-2.11 ± 0.09 ^c	6.47 ± 0.12 ^d
ข้าวเหนียว กข 6 หุงสุก	76.29 ± 0.34 ^c	-2.29 ± 0.45 ^d	12.18 ± 0.25 ^b
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมข้าวเหนียว กข 6 ร้อยละ 10	79.51 ± 0.16 ^c	-2.52 ± 0.05 ^c	4.93 ± 0.24 ^c
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8	79.30 ± 0.12 ^c	-2.45 ± 0.09 ^c	4.64 ± 0.11 ^c

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

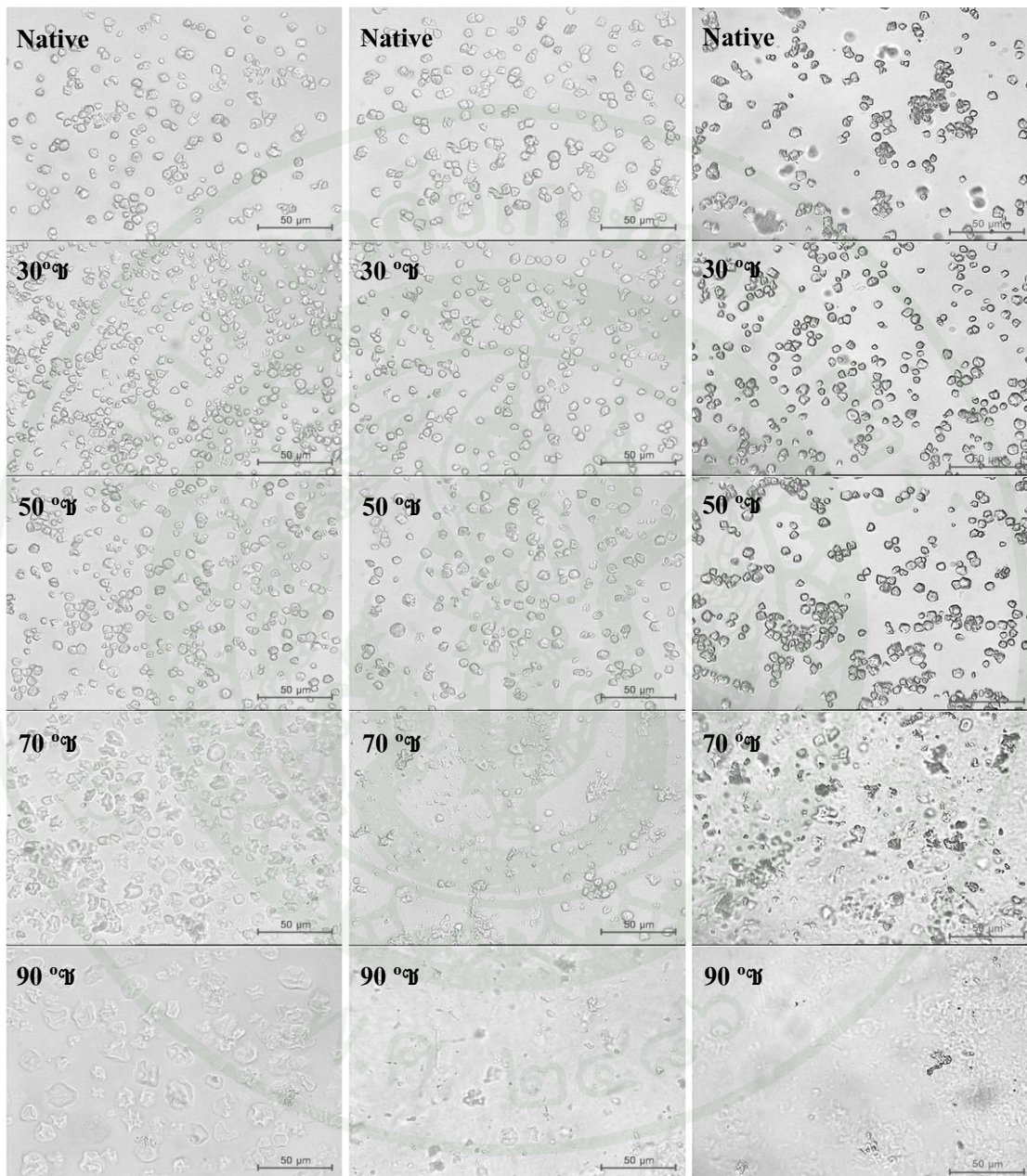
1.3 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าว

จากการตรวจสอบรูปร่างของเม็ดสตาร์ชในแป้งข้าวทั้งสามตัวอย่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านที่กำลังขยาย 40 เท่า ผลแสดงในภาพที่ 9 โดยเม็ดสตาร์ชในแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 แป้งข้าวเหนียว กข 6 และแป้งข้าวเหนียวทางการค้า ที่ยังไม่ผ่านความร้อนมีรูปร่างหลายเหลี่ยมและมีขนาดใกล้เคียงกับที่ Zhou *et al.*(2002) ตรวจพบคือ อยู่ในช่วง 3-8 ไมครอน เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 30 °ซ พบว่า รูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชข้าวทั้งสามตัวอย่างยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50 °ซ เม็ดสตาร์ชมีขนาดเริ่มใหญ่ขึ้นเล็กน้อย และเริ่มเห็นรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวสามตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิ 70 °ซ โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 จะมีการพองตัวเพิ่มมากขึ้นและบางเม็ดเริ่มมีการสูญเสียรูปร่างเดิม ส่วนเม็ดสตาร์ชในแป้งข้าวเหนียวทั้งสองตัวอย่างที่พองตัวแล้ว โดยส่วนใหญ่เริ่มเกิดการแตกตัวและที่อุณหภูมิ 90 °ซ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 จะมีการพองตัวเพิ่มมากขึ้นอีก และเม็ดสตาร์ชบางส่วนเริ่มมีการแตกตัว ขณะที่เม็ดสตาร์ชข้าวเหนียวมีการแตกตัวเกือบทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติความหนืดที่แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่าความหนืดสูงสุดมากกว่าแป้งข้าวเหนียวขณะที่ให้ความร้อน อีกทั้งยังสอดคล้องกับปริมาณแอมิโลสของทั้งสามตัวอย่างอีกด้วย

แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105

แป้งข้าวเหนียว กข 6

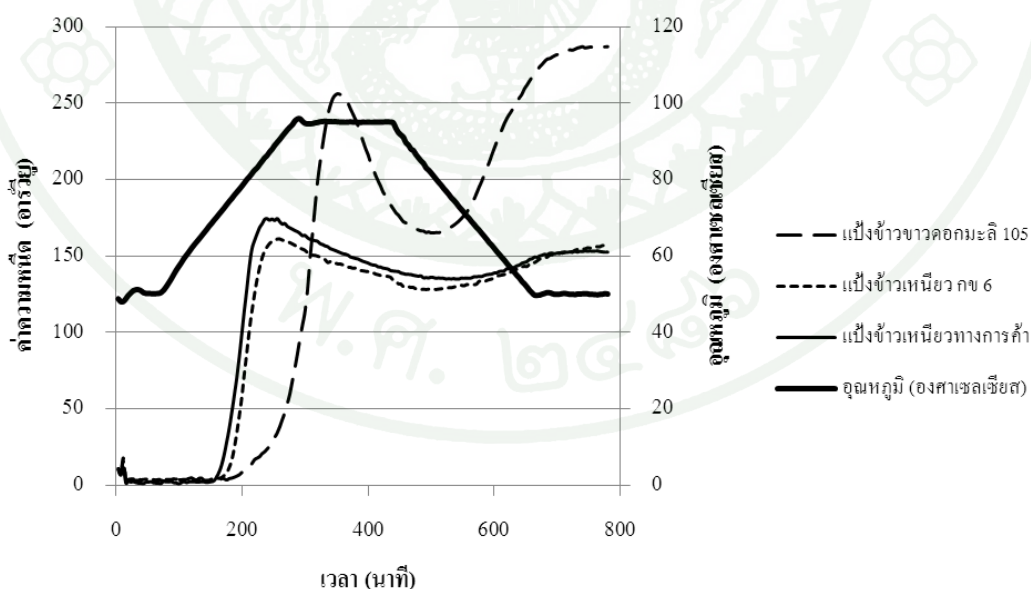
แป้งข้าวเหนียวทางการค้า



ภาพที่ 9 รูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวที่ยังไม่ผ่าน (native) และผ่านการให้ความร้อน ณ อุณหภูมิต่างๆ ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่านกำลังขยาย 40 เท่า (bar = 50 µm)

1.4 สมบัติด้านความหนืด

เมื่อนำแป้งข้าวทั้งสองชนิดมาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว พบว่า แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่าอุณหภูมิเริ่มการเกิดความหนืด (Pasting temp) ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Trough) ความหนืดลดลง (Breakdown) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และเซตแบค (Setback) สูงกว่าแป้งข้าวเหนียว กข 6 และทางการค้า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ภาพที่ 10 และตารางที่ 6) ซึ่งคาดว่าอาจเป็นผลมาจากการที่แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณแอมิโลสมากกว่าแป้งข้าวเหนียว เมื่อแป้งข้าวอยู่ในสถานะที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเม็ดสตาร์ชข้าวขาวดอกมะลิ 105 จึงสามารถทนต่ออุณหภูมิได้มากกว่าเม็ดสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว นอกจากนี้เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนจนพองตัวและสายโซ่แอมิโลสออกมานอกเม็ดสตาร์ช เมื่อลดอุณหภูมิลงสายโซ่แอมิโลสที่มีปริมาณมากกว่าในแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 จับตัวกันหรือที่เรียกว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าแป้งข้าวเหนียว จึงมีผลทำให้แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่าเซตแบคสูงกว่า (Luh and Liu, 1991) และเมื่อเปรียบเทียบกราฟความหนืดระหว่างแป้งข้าวเหนียว กข 6 และแป้งข้าวเหนียวทางการค้า พบว่า มีลักษณะกราฟคล้ายกัน



ภาพที่ 10 กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 แป้งข้าวเหนียว กข 6 และแป้งข้าวเหนียวทางการค้า ที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว

ตารางที่ 6 อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด ความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และเซตแบคของแป้งข้าวทั้งสามชนิด

ตัวอย่าง	อุณหภูมิที่เริ่มเกิด ความหนืด (°ซ)	ความหนืด (อาร์วียู)				เซตแบค
		ความหนืดสูงสุด	ความหนืด ต่ำสุด	ความหนืด ลดลง	ความหนืด สุดท้าย	
แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105	79.97±1.65 ^a	255.86±3.97 ^a	167.03±3.08 ^a	88.84±2.39 ^a	288.64±3.58 ^a	121.61±0.76 ^a
แป้งข้าวเหนียว กข 6	73.20±0.44 ^b	162.00±9.78 ^c	128.92±1.12 ^c	33.19±8.96 ^b	158.47±3.34 ^b	29.55±2.30 ^b
แป้งข้าวเหนียวทางการค้า	70.78±1.22 ^b	174.92±0.38 ^b	135.47±3.09 ^b	39.45±2.92 ^b	152.69±4.04 ^b	17.22±1.07 ^c

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2. การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง

ถึงแม้การแช่เยือกแข็งถือเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การแช่เยือกแข็งนั้นเป็นการถนอมอาหาร ไม่สามารถช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของอาหารได้ ดังนั้นเมื่อนำอาหารแช่เยือกแข็งมาคืนรูปจากเยือกแข็ง คุณภาพของอาหารจะไม่ดีไปกว่าคุณภาพของอาหารก่อนการแช่เยือกแข็ง (ชนะบุญ, 2533) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการทราบการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกเมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ โดยในการทดลองนี้ได้นำตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกมาคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการคืนรูปจากเยือกแข็ง ข้าวหุงสุกมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและค่าความเหนียวลดลง โดยข้าวหุงสุกมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและค่าความเหนียวลดลงตั้งแต่การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากเอมิโลสที่อยู่ในเม็ดสตาร์ชส่งผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันและการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกจากการคืนรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ (Charoenrein *et al.*, 2008)

ตารางที่ 7 ค่าความแข็งและความเหนียว (นิวตัน) ของตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1-5 รอบ

ลักษณะเนื้อสัมผัส	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่		
		1	3	5
ความแข็ง	61.19 ± 2.94 ^c	72.80 ± 5.96 ^c	101.37 ± 6.90 ^b	122.21 ± 4.86 ^a
ความเหนียว	13.03 ± 0.21 ^b	15.56 ± 0.97 ^a	10.91 ± 0.58 ^c	3.93 ± 0.02 ^d

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เพื่อให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกมากยิ่งขึ้น จึงได้นำตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งมาตรวจสอบโครงสร้างภายใต้กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ

จากภาพที่ 11 แสดงภาพผิวด้านข้างของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการคั้นรูปจากเยือกแข็ง สีผิวด้านข้างของเมล็ดข้าวหุงสุกมีความขาวขุ่นเพิ่มมากขึ้น (ภาพที่ 11 ก-ค) และเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 (ภาพที่ 11 ค) ผิวด้านข้างของเมล็ดข้าวหุงสุกมีลักษณะเป็น โครงสร้างฟองน้ำเกิดขึ้น เป็นผลมาจากเมทริกซ์ของโครงข่ายสตาร์ชที่มีความหนาแน่นมากขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงของผลึกน้ำแข็งและการเกิดรีโทรเกรเดชันของเอมิโลสในระหว่างการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ (Charoenrein *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2010) จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งภายหลังจากการคั้นรูปจากเยือกแข็ง



ภาพที่ 11 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกก่อนและหลังคั้นรูปจากเยือกแข็ง ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 20 เท่า (bar = 2 mm)

3. การหาวิธีการคั้นรูปจากเยือกแข็งของข้าวหุงสุกจากการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสม

การคั้นรูปจากเยือกแข็งของตัวอย่างถือเป็นขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างที่สำคัญ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารก่อนนำไปทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัส หากเลือกใช้วิธีการคั้นรูปจากเยือกแข็งที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้การละลายของน้ำแข็งในชั้นอาหารเป็นไปได้อย่างไม่ทั่วถึง (non-uniformity) ในการทดลองนี้จึงได้ศึกษาหาวิธีการคั้นรูปจากเยือกแข็งของข้าวหุงสุกที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ไม่แปรปรวน วิธีการคั้นรูปจากเยือกแข็งที่ศึกษาคือ การใช้เตาอบไมโครเวฟและอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้ปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนและแช่เยือกแข็งเป็นดัชนีความสม่ำเสมอของตัวอย่างหลังการคั้นรูปจากเยือกแข็ง พบว่า ตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมข้าวเหนียว กข 6 ที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งโดยใช้เตาอบไมโครเวฟมีความชื้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหุงสุกใหม่ (ตารางที่ 8) และเมื่อ

ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งจนถึงรอบที่ 3 และ 5 ความชื้นมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จึงทำให้ที่บริเวณผิวหนังของกลุ่มเมล็ดข้าวเริ่มแห้งและแข็งมากขึ้น แต่เมล็ดข้าวที่อยู่บริเวณใจกลางยังคงมีความนุ่มอยู่ อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติของเตาอบไมโครเวฟที่มีการให้ความร้อนแก่อาหารไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่แตกต่างกันระหว่างน้ำกับน้ำแข็ง อีกทั้งโมเลกุลน้ำบริเวณผิวหนังอาหารสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมากกว่าโมเลกุลน้ำภายในชิ้นอาหาร เมื่อเริ่มทำการละลายน้ำแข็งอาหารจากการแช่เยือกแข็งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ บริเวณผิวหนังอาหารจะเกิดความร้อนขึ้นก่อน ทำให้ผลึกน้ำแข็งที่อยู่บริเวณนั้นเกิดการหลอมละลาย อุณหภูมิบริเวณผิวหนังอาหารเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ภายในชิ้นอาหารยังมีอุณหภูมิต่ำอยู่ (Yam and Lai, 2004) และปัญหาในการใช้พลังงานไมโครเวฟในการคืนรูปจากเยือกแข็งขึ้นอยู่กับความไม่สม่ำเสมอของเนื้ออาหารภายใน ซึ่งอาจทำให้เกิดความร้อนเป็นจุดๆภายในชิ้นอาหาร (localized heating pocket) จึงมีผลต่อคุณภาพอาหารภายหลังการคืนรูปจากเยือกแข็ง (ธนะบุญย์, 2533) ส่วนการคืนรูปจากเยือกแข็งโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ พบว่า ทั้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมข้าวเหนียว กข 6 มีความชื้นที่ไม่แตกต่างจากตัวอย่างข้าวหุงสุกใหม่ เนื่องจากการใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิทำให้น้ำแข็งในตัวอย่างละลายได้สม่ำเสมอว่าการใช้เตาอบไมโครเวฟ จึงเป็นวิธีการในการคืนรูปจากเยือกแข็งของข้าวหุงสุกที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ อย่างไรก็ตามการคืนรูปจากเยือกแข็งโดยการใช้พลังงานไมโครเวฟมีความเหมาะสมกับระบบอาหารบางประเภท อย่างเช่นในตัวอย่างซอสที่มีปริมาณน้ำในระบบมาก โดย Arocas *et al.* (2011) ได้ทำการเปรียบเทียบการคืนรูปจากเยือกแข็งของซอสมันฝรั่งและข้าวโพดระหว่างการใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ พบว่า การคืนรูปจากเยือกแข็งโดยการใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อนทำให้น้ำในซอสกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการให้ความร้อนจากไมโครเวฟสามารถทำได้ในระยะเวลาอันสั้น จึงสามารถลดระยะเวลาในการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชระหว่างการคืนรูปจากเยือกแข็งได้ และในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงในเตาอบไมโครเวฟสามารถคลายสตาร์ชที่รีโทรเกรดแล้ว ทำให้โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินแยกออกจากกันและเกิดการดูดซับน้ำ จึงทำให้น้ำกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในระบบ

ตารางที่ 8 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ

(หน่วย: ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก)

ตัวอย่าง	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่					
		1		3		5	
		MW	WB	MW	WB	MW	WB
KDML 105	61.38 ± 0.99 ^{a,B}	60.84 ± 1.39 ^{a,B}	64.56 ± 1.78 ^{a,A}	56.55 ± 2.21 ^{a,C}	63.22 ± 0.51 ^{a,AB}	57.35 ± 4.06 ^{a,C}	62.82 ± 0.69 ^{b,AB}
KDML 105 + 10% RD 6	62.56 ± 0.77 ^{a,A}	57.30 ± 0.97 ^{b,B}	61.52 ± 0.81 ^{a,A}	56.07 ± 3.04 ^{a,B}	61.40 ± 0.99 ^{b,A}	55.75 ± 3.78 ^{a,B}	63.94 ± 0.78 ^{a,A}

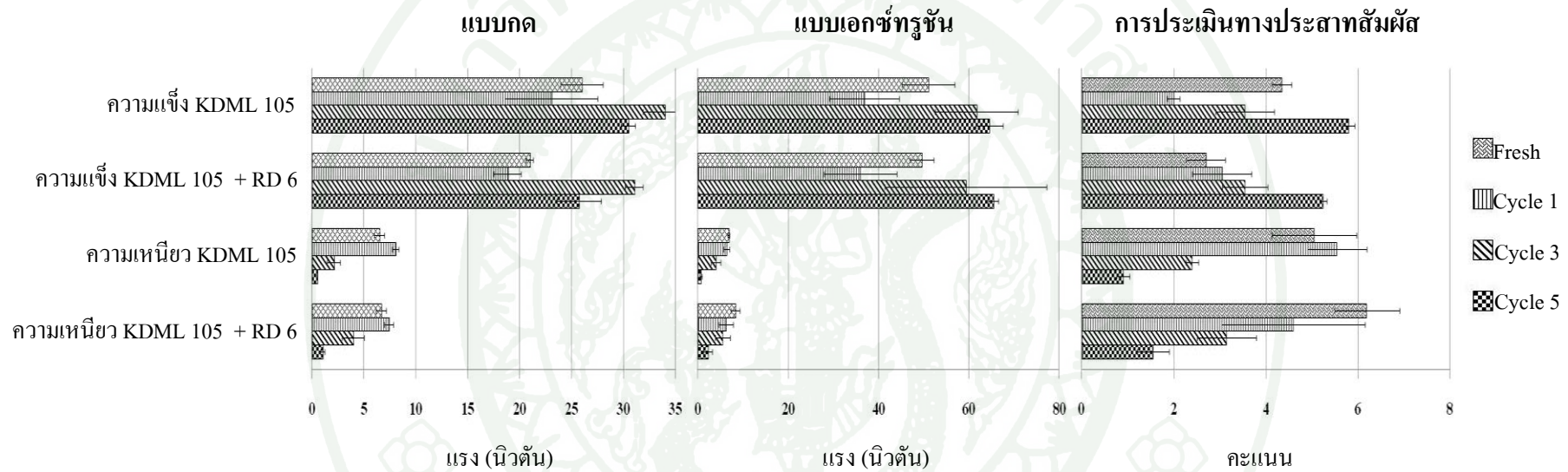
- หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
 - ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
 - MW = เตาอบไมโครเวฟ WB = อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

4. หาความสัมพันธ์ระหว่างการวัดคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องมือด้วยวิธีการวัดแบบกดและแบบเอกซ์ทรูชันกับการประเมินทางประสาทสัมผัส

เนื่องจากคุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกถือเป็นคุณภาพหลักที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Okabe, 1979; Rousset *et al.*, 1999) การทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกนั้นสามารถทำได้ด้วยวิธีการที่หลากหลาย มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธีเอกซ์ทรูชัน (Juliano *et al.*, 1984; Meullenet *et al.*, 1998; Sitakalin and Meullenet, 2000; Sesmat and Meullenet, 2001; Ghasemi *et al.*, 2009) และวิธีแบบกด (Juliano *et al.*, 1981, 1984; Okabe 1979; Szczesniak and Hall 1974) ในการทดสอบ

Sitakalin and Meullenet (2000) ได้เปรียบเทียบคุณลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้จากการทดสอบโดยใช้วิธีการกดและเอกซ์ทรูชัน เพื่อทำนายคุณลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสของข้าวหุงสุก โดยพบว่าวิธีการวัดทั้งสองวิธีสามารถนำมาใช้ในการทำนายผลการประเมินทางประสาทสัมผัสได้ โดยวิธีการเอกซ์ทรูชันเหมาะสมสำหรับทดสอบตัวอย่างข้าวหุงสุกที่มีปริมาณมาก ขณะที่วิธีการแบบกดใช้เพียงแค่มิถุนันในการทดสอบ ดังนั้นวิธีการแบบกดจึงเหมาะสมในการวัดมากกว่าวิธีการเอกซ์ทรูชันหากมีปริมาณตัวอย่างเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการวัดแบบเอกซ์ทรูชันให้ค่าที่มีความแม่นยำและสามารถทำนายแบบจำลองของคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของตัวอย่างได้ดีกว่า และเนื่องจากการที่วิธีการเอกซ์ทรูชันเหมาะสมกับการวัดตัวอย่างที่มีปริมาณมาก จึงเป็นวิธีที่บ่งบอกความรู้สึกของผู้ทดสอบโดยรวมได้ดีกว่าวิธีการแบบกด

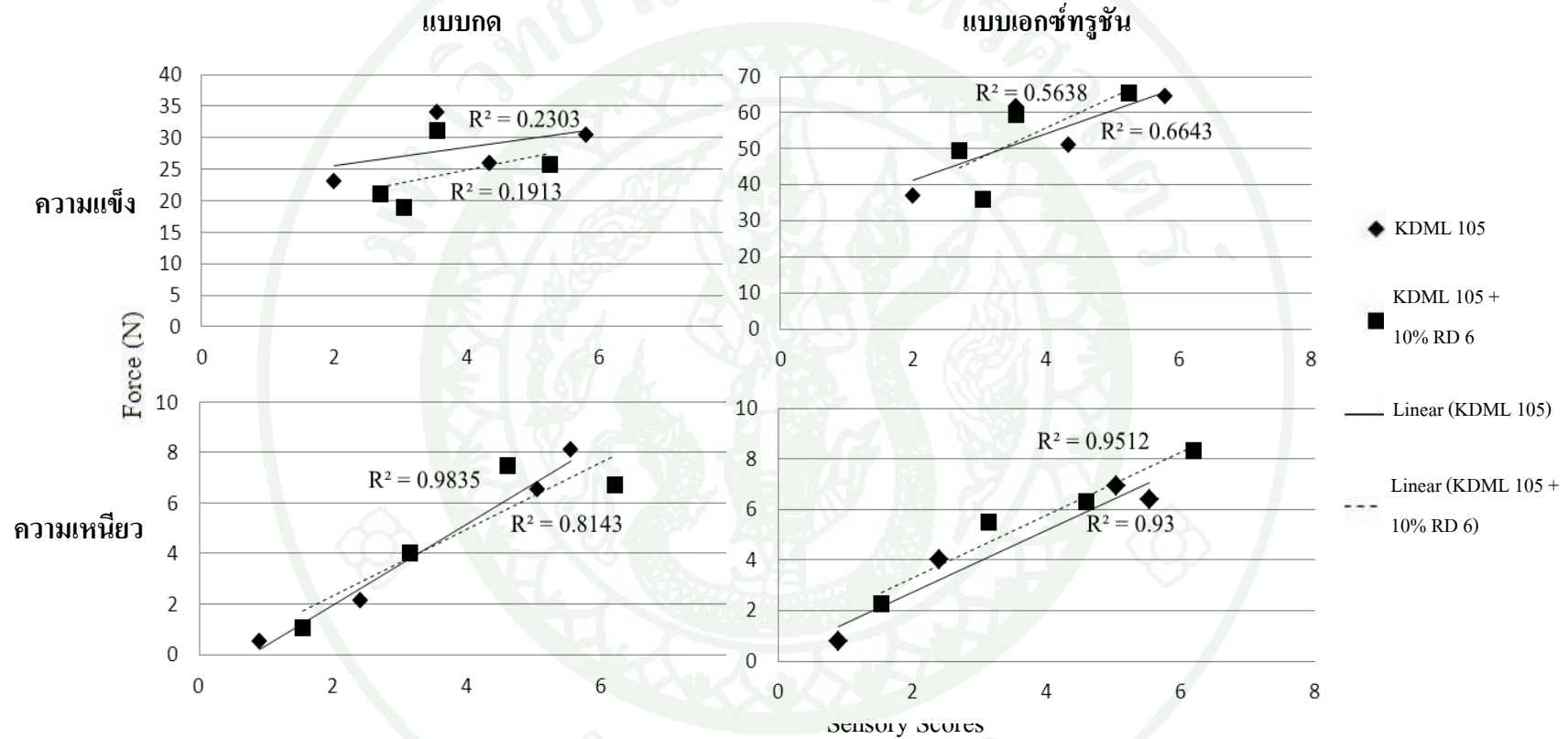
ในการทดลองนี้ได้เปรียบเทียบวิธีการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งโดยวิธีการแบบกดและแบบเอกซ์ทรูชัน โดยการหาความสัมพันธ์กับผลเนื้อสัมผัสที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสจากผู้ทดสอบ เพื่อให้ได้วิธีการที่มีความแม่นยำและสอดคล้องกับการประเมินทางประสาทสัมผัสมากที่สุด พบว่า ตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ (ภาพที่ 12 และตารางภาคผนวกที่ จ 1-3) มีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งและลดลงของค่าความเหนียวที่ได้จากการวัดโดยใช้วิธีแบบเอกซ์ทรูชันคล้ายคลึงกับการทดสอบทางประสาทสัมผัสจากผู้ทดสอบมากกว่าการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสแบบกด จากนั้นได้นำค่าลักษณะเนื้อสัมผัสจากทั้งสองวิธีและการประเมินทางประสาทสัมผัสมาทำการหาความสัมพันธ์เพื่อยืนยันผล ได้ค่าความสัมพันธ์ (r^2) จากกราฟเส้นตรงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงและความเหนียวจากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งด้วยวิธีการกดและเอกซ์ทรูชัน และการประเมินทางประสาทสัมผัส โดยค่าแรงสูงสุดที่หัววัดกดตัวอย่างไป 70% strain คือ ค่าความแข็งแรง และค่าแรงสูงสุดในการถอนหัววัดออกจากฐาน คือ ค่าความเหนียว

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากการหาค่าความสัมพันธ์ (r^2) ระหว่างค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ได้จากการวัด โดยใช้เครื่องมือกับการประเมินทางประสาทสัมผัส พบว่า ข้าวหุงสุกทั้งที่เติมข้าวเหนียวและไม่เติม เมื่อนำมาวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ ค่าความแข็งและความเหนียวที่ได้จากการวัดแบบเอกซ์ทรูชันมีความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการประเมินทางประสาทสัมผัสมากกว่าการใช้วิธีการวัดแบบกดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ภาพที่ 13 และตารางที่ 9) ยกเว้นค่าความเหนียวของตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากผลการทดลองเห็นได้ว่าการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสแบบเอกซ์ทรูชันสามารถวัดค่าลักษณะเนื้อสัมผัสได้ตรงกับความเป็นจริงที่ผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสได้รับในการทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างในการทดลองนี้มีการผสมของข้าว 2 พันธุ์ หากใช้การวัดโดยวิธีการแบบกด อาจไม่สามารถบ่งบอกถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของตัวอย่างโดยรวมตามที่ผู้บริโภครู้สึกได้ เนื่องจากการเลือกตัวอย่างมาวัดแค่บางเมล็ดเท่านั้น Juliano (1981) รายงานว่า หากนำวิธีการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสแบบเอกซ์ทรูชันมาใช้กับตัวอย่างปริมาณมาก ผลที่ได้จากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสจะมีความแม่นยำ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้เลือกวิธีการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสแบบเอกซ์ทรูชันมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง



ภาพที่ 13 ค่าความสัมพันธ์ (r^2) ระหว่างค่าความแข็งแรงและความเหนียวของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ได้จากการวัด โดยวิธีการวัดแบบกดและแบบเอกซ์ทราซัน กับค่าการประเมินทางประสาทสัมผัส

ตารางที่ 9 ค่าความสัมพันธ์ (r^2) ระหว่างค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ได้จากการวัดโดยวิธีแบบกดและแบบเอกซ์ทรูชันกับค่าการประเมินทางประสาทสัมผัส

วิธีการวัด	ค่าความแข็ง		ค่าความเหนียว	
	KDML 105	KDML 105 + 10% RD 6	KDML 105	KDML 105 + 10% RD 6
แบบกด	0.230 ^b	0.191 ^b	0.983 ^a	0.814 ^b
เอกซ์ทรูชัน	0.664 ^a	0.563 ^a	0.930 ^b	0.951 ^a

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

5. การปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็งด้วยการเติมข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียว และคอนยัคกลูโคแมนแนน

การทดลองนี้มีแนวคิดที่จะปรับปรุงคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็งด้วยการเติมข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียว และคอนยัคกลูโคแมนแนน เนื่องจากคุณสมบัติของข้าวเหนียวที่มีความเหนียวตามธรรมชาติ จึงมีแนวคิดว่าจะมีการนำมาผสมกับข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง น่าจะช่วยเพิ่มความนุ่มและเหนียวให้แก่ตัวอย่างภายหลังการคืนรูปจากเยือกแข็งได้ แนวคิดในการนำแป้งข้าวเหนียวมาใช้ในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสนั้น เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเติมแป้งข้าวเหนียวลงในเจลสตาร์ชข้าวสามารถลดการเกิดการแยกออกของน้ำ และโครงสร้างฟองน้ำเมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง และช่วยลดความแข็งของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งเมื่อผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลาอันได้ (ณัฐสุดา, 2552) ส่วนแนวคิดในการเติมคอนยัคกลูโคแมนแนนเพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็งนั้น ได้มาจากผลการทดลองของ Charoenrein *et al.* (2011) ที่พบว่า เมื่อผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนในระบบของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง ที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 5 รอบ สามารถลดร้อยละการแยกของน้ำ ลดขนาดและความหนาของผนังของรูพรุนจากผลิตภัณฑ์น้ำแข็งได้ จากแนวคิดเหล่านี้จึงมีสมมติฐานการทดลองว่า การเติมข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียว และคอนยัคกลูโคแมนแนนในผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง อาจช่วยลดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสและโครงสร้างใน

ระดับจุลภาคของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ อันเนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้

ความเข้มข้นของแต่ละวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้ทำการทดสอบเบื้องต้นแล้วว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง โดยในการวิเคราะห์คุณภาพด้านการปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสได้ทำการศึกษาหาปริมาณความชื้นในตัวอย่างลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียวที่วัด โดยใช้เครื่องมือ และจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสจากผู้ทดสอบ และศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างเพื่ออธิบายผลที่ได้

จากการหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1-5 รอบ พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งในทุกรอบ มีค่าปริมาณความชื้นลดลงจากข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ยกเว้นการคั้นรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 4 ดังตารางที่ 10 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อมีการนำข้าวหุงสุกมาคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ ทำให้เกิดการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงทิ่มแทงโครงสร้างเจลของข้าวหุงสุก อีกทั้งมีการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ระหว่างสายโซ่ของสตาร์ช โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นผลจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของเอมิโลส (Morris, 1990; Karim *et al.*, 2007; Yu *et al.*, 2010a) จึงทำให้เกิดโครงสร้างฟองน้ำขึ้นในเมล็ดข้าว เช่นเดียวกับในระบบของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งที่พบว่า หากมีการเพิ่มจำนวนรอบในการคั้นรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น โครงสร้างฟองน้ำนี้เกิดขึ้นอย่างเสถียร ทำให้เจลสตาร์ชไม่สามารถดูดซึมน้ำเข้าโครงสร้างได้อีก (Charoenrein *et al.*, 2008; Charoenrein and Preechathamwong, 2010) สำหรับตัวอย่างที่ผสมข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียว และคอนยัคกลูโคแมนแนนนั้น ไม่มีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในทุกรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็ง สันนิษฐานว่าเนื่องจากสายโมเลกุลของเอมิโลเพกทินในข้าวเหนียวและแป้งข้าวเหนียว และสายโมเลกุลของคอนยัคกลูโคแมนแนนไปจำกัดการเคลื่อนย้ายของความชื้นและการเปลี่ยนแปลงของผลึกน้ำแข็ง

ตารางที่ 10 ปริมาณความชื้นของข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1-5 รอบ

(หน่วย: ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก)

ตัวอย่าง	ก่อนการ แช่เยือกแข็ง	การคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่				
		1	2	3	4	5
KDML 105	67.27 ± 1.59 ^{a, A}	63.89 ± 0.45 ^{bc, CD}	62.94 ± 0.45 ^{b, D}	64.62 ± 0.94 ^{b, BCD}	65.70 ± 1.14 ^{b, AB}	64.79 ± 0.36 ^{bc, BC}
KDML 105 + 10% RD 6	62.44 ± 1.07 ^{b, B}	64.23 ± 0.65 ^{b, B}	63.82 ± 0.94 ^{b, B}	63.85 ± 1.19 ^{b, B}	63.20 ± 0.72 ^{c, B}	66.34 ± 1.38 ^{b, A}
KDML 105 + 0.4% WRF	62.09 ± 0.72 ^{b, C}	62.48 ± 0.42 ^{c, BC}	62.68 ± 0.21 ^{b, BC}	65.33 ± 0.96 ^{b, A}	63.18 ± 0.14 ^{c, BC}	63.55 ± 0.62 ^{c, B}
KDML 105 + 0.8% WRF	65.63 ± 1.15 ^{a, AB}	66.08 ± 0.93 ^{a, A}	63.64 ± 1.45 ^{b, B}	65.67 ± 1.41 ^{b, AB}	65.80 ± 0.20 ^{b, AB}	67.09 ± 1.65 ^{b, A}
KDML 105 + 0.2% KGM	66.64 ± 2.81 ^{a, B}	65.44 ± 1.47 ^{ab, B}	68.14 ± 0.77 ^{a, AB}	68.70 ± 1.67 ^{a, AB}	68.29 ± 1.80 ^{a, AB}	70.61 ± 2.20 ^{a, A}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่าความแข็งและความเหนียวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัสแสดงดังตารางที่ 11 และ 12 พบว่า ค่าความแข็งของตัวอย่างทุกทริตเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและความเหนียวมีแนวโน้มลดลง ตามจำนวนรอบในการคั้นรูปจากเยือกแข็งที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งตั้งแต่รอบที่ 3 ตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็งมีการเปลี่ยนแปลงด้านลักษณะเนื้อสัมผัสมาก โดยมีความแข็งมากและความเหนียวน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทริตเมนต์อื่นๆ การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดผลึกน้ำแข็งภายในตัวอย่างข้าวหุงสุกจากกระบวนการแช่เยือกแข็ง ทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างเจลของเมล็ดข้าวหุงสุก (Yu *et al.*, 2010a) เมื่อทำการคั้นรูปจากเยือกแข็งที่อุณหภูมิ 30°C จากการทำลายโครงสร้างนี้ส่งผลให้ค่าความแข็งของตัวอย่างข้าวหุงสุกเพิ่มขึ้นเนื่องจากผนังรอบๆรูพรุนผลึกน้ำแข็งมีความหนาและแข็งแรงขึ้นจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส (Charoenrein *et al.*, 2008)

การเติมข้าวเหนียว กข 6 ร้อยละ 10 ช่วยให้ข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งมีค่าความแข็งต่ำกว่าทริตเมนต์อื่น เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากคุณสมบัติของข้าวเหนียวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ การรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสจึงเกิดเพียงเล็กน้อย และเมื่อปนอยู่กับข้าวขาวดอกมะลิ 105 จึงช่วยคงความนุ่มได้เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ ส่วนการเติมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 สามารถคงความเหนียวของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้มากที่สุดเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 อย่างไรก็ตามค่าความแข็งของตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 ทั้งก่อนและหลังจากจากการแช่เยือกแข็งมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.4 เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเหนียวเมล็ดสตาร์ชข้าวเหนียวจึงต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นเพื่อใช้ในการพองตัวและการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ดังนั้นเมล็ดข้าวสำหรับตัวอย่างที่ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 จึงมีปริมาณน้ำจำกัดสำหรับการเจลลาทีโนเซชันของเมล็ดสตาร์ชและการหุงสุก อย่างไรก็ตามพบว่า การเติมแป้งข้าวเหนียวสามารถปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้ โดยช่วยเพิ่มความเหนียวของตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง อาจเนื่องมาจากเกิดเจลของแป้งข้าวเหนียวที่ไปเคลือบบริเวณผิวและมีการแทรกซึมในเมล็ดข้าวระหว่างการหุงสุก จึงเป็นผลให้ค่าความแข็งจากการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบนั้นมีค่าลดลง และเนื่องจากแป้งข้าวเหนียวที่ใช้ในการทดลองมีแอมิโลสต่ำจึงทำให้ข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งยังคงมีความนุ่มอยู่เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็ง การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชในข้าวมักเกิดขึ้นจากการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ระหว่างสายโซ่ของสตาร์ช โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นผลจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส เนื่องจากธรรมชาติของ

สายโซ่แอมิโลสมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โมเลกุลจึงสามารถรวมตัวกันใหม่ได้ง่าย ส่วนสายโซ่แอมิโลเพกตินมีลักษณะเป็นเชิงกิ่งทำให้เกิดการรวมตัวกันได้ยากกว่า (Taub and Singh, 1998) และปริมาณแอมิโลสยังส่งผลโดยตรงต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าว ดังนั้นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีเนื้อสัมผัสที่ความแข็งและแห้ง ขณะที่ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำจะมีความนุ่มกว่า (Ong and Blanshard, 1995)

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Yi *et al.* (2009) ที่ได้ใช้แป้งสาลิข้าวเหนียวทดแทนแป้งสาลินโด พบว่า แอมิโลเพกตินในโดที่มีการทดแทนแป้งสาลิด้วยแป้งสาลิข้าวเหนียวไปจำกัดการเคลื่อนย้ายของความชื้นและการเปลี่ยนแปลงของผลึกน้ำแข็งได้ดีกว่าโดที่ใช้เพียงแป้งสาลิเท่านั้น อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ทำจากโดที่ทดแทนด้วยแป้งสาลิข้าวเหนียวภายหลังการคั้นรูปจากเยือกแข็ง โดยช่วยลดอัตราการเกิดสแตลิง ทำให้ขนมปังมีความนุ่มและมีสีที่สม่ำเสมอ

ส่วนการเติมคอนยัคกลูโคแมนแนลงในข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งนั้นพบว่า ไม่สามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งได้ โดยในการคั้นรูปจากเยือกแข็งในแต่ละรอบตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนร้อยละ 0.2 จะมีความแข็งมากกว่าตัวอย่างอื่น โดยเฉพาะรอบที่ 1, 2 และ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติของคอนยัคกลูโคแมนแนนที่สามารถดูดน้ำได้มาก โดยเฉพาะเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบ (Rajesh *et al.*, 2012) ดังเช่นในระบบของการหุงสุกข้าวที่มีความร้อนและมีปริมาณน้ำมาก จึงทำให้คอนยัคกลูโคแมนแนนดูดน้ำได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นการจำกัดปริมาณน้ำที่ข้าวสามารถนำมาใช้ในการหุงสุก ข้าวที่ผสมคอนยัคกลูโคแมนแนนจึงมีความแข็งมากกว่าตัวอย่างอื่น

ตารางที่ 11 ค่าความแข็ง (นิวตัน) ของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1-5 รอบ

ตัวอย่าง	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่				
		1	2	3	4	5
KDML 105	57.20±1.03 ^{bc, D}	65.91±2.30 ^{b, C}	69.57±1.08 ^{b, C}	87.79±0.46 ^{a, B}	87.32±0.21 ^{a, B}	95.93±13.20 ^{a, A}
KDML 105 + 10% RD 6	54.56±3.91 ^{c, B}	62.71±2.27 ^{b, B}	63.72±2.06 ^{c, B}	76.20±5.36 ^{b, AB}	74.65±0.19 ^{c, AB}	87.29±19.06 ^{b, A}
KDML 105 + 0.4% WRF	58.55±5.87 ^{bc, C}	66.44±1.56 ^{b, BC}	69.90±0.41 ^{b, ABC}	79.39±1.21 ^{b, AB}	77.57±1.07 ^{d, A}	81.82±9.79 ^{b, A}
KDML 105 + 0.8% WRF	70.47±2.74 ^{ab, C}	68.59±1.75 ^{b, C}	73.52±1.67 ^{b, BC}	78.29±1.28 ^{b, AB}	80.94±0.34 ^{c, AB}	85.14±6.25 ^{b, A}
KDML 105 + 0.2% KGM	77.99±9.99 ^{a, A}	77.67±2.89 ^{a, A}	85.11±3.08 ^{a, A}	83.18±2.50 ^{ab, A}	83.84±2.17 ^{b, A}	78.47±9.51 ^{b, A}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 12 ค่าความเหนียว (นิวตัน) ของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1-5 รอบ

ตัวอย่าง	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่				
		1	2	3	4	5
KDML 105	13.57±1.14 ^{b, B}	18.51±0.17 ^{a, A}	9.54±0.15 ^{c, C}	3.90±0.77 ^{c, D}	1.31±0.05 ^{b, E}	0.28±0.26 ^{a, E}
KDML 105 + 10% RD 6	14.67±0.88 ^{b, B}	20.25±2.41 ^{a, A}	15.13±0.31 ^{b, B}	6.24±0.21 ^{a, C}	2.12±1.08 ^{ab, D}	1.12±0.97 ^{a, D}
KDML 105 + 0.4% WRF	14.76±2.81 ^{b, B}	18.54±1.61 ^{a, A}	17.63±0.92 ^{ab, AB}	4.73±0.46 ^{abc, C}	1.65±0.26 ^{b, CD}	0.34±0.07 ^{a, D}
KDML 105 + 0.8% WRF	19.04±0.92 ^{a, B}	21.89±0.69 ^{a, A}	19.23±1.88 ^{a, AB}	5.95±1.22 ^{ab, C}	3.15±0.51 ^{a, D}	1.14±0.76 ^{a, D}
KDML 105 + 0.2% KGM	19.86±0.67 ^{a, AB}	21.44±0.02 ^{a, A}	18.82±0.23 ^{a, B}	4.18±0.23 ^{bc, C}	1.78±0.01 ^{ab, D}	0.44±0.08 ^{a, D}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวดิ่ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการศึกษาด้านลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียวจากผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 10 คน อายุระหว่าง 23-55 ปี แบ่งเป็นเพศชาย 2 คน และเพศหญิง 8 คน พบว่า เมื่อจำนวนรอบในการคั้นรูปจากเยือกแข็งเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างข้าวหุงสุกมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นและความเหนียวลดน้อยลง (ตารางที่ 13) โดยเฉพาะหลังจากการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3 ตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิผสมข้าวเหนียว กข 6 ร้อยละ 10 ยังคงมีความนุ่มและความเหนียวมากที่สุด ภายหลังจากการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 แต่ไม่แตกต่างจากทริตเมนต์อื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.4 และ 0.8 ซึ่งจากผลการทดลองทางประสาทสัมผัสนี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองทางด้านเนื้อสัมผัสจากการวัดโดยใช้เครื่องมือที่ว่า เมื่อมีการเติมข้าวเหนียวหรือแป้งข้าวเหนียวสามารถช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้

ตารางที่ 13 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	ตัวอย่าง	การคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่		
		1	3	5
ความแข็ง	KDML 105	1.84±0.35 ^{b,C}	4.86±0.04 ^{a,B}	5.78±0.06 ^{a,A}
	KDML 105 + 10% RD 6	1.53±0.17 ^{b,C}	3.74±0.30 ^{a,B}	5.31±0.01 ^{b,A}
	KDML 105 + 0.4% WRF	1.77±0.43 ^{b,B}	4.19±0.98 ^{a,A}	5.37±0.06 ^{b,A}
	KDML 105 + 0.8% WRF	1.76±0.34 ^{b,B}	4.61±0.36 ^{a,A}	5.38±0.12 ^{b,A}
	KDML 105 + 0.2% KGM	2.63±0.02 ^{a,C}	4.91±0.32 ^{a,B}	5.82±0.12 ^{a,A}
ความเหนียว	KDML 105	6.51±0.86 ^{ab,A}	1.99±0.26 ^{b,B}	1.27±0.10 ^{b,B}
	KDML 105 + 10% RD 6	7.21±0.76 ^{a,A}	3.86±0.04 ^{a,B}	2.52±0.21 ^{a,B}
	KDML 105 + 0.4% WRF	6.09±1.08 ^{ab,A}	3.82±0.83 ^{a,AB}	1.81±0.48 ^{ab,B}
	KDML 105 + 0.8% WRF	6.57±0.70 ^{ab,A}	2.57±0.06 ^{b,B}	2.04±0.43 ^{ab,B}
	KDML 105 + 0.2% KGM	4.90±0.40 ^{b,A}	3.04±0.45 ^{ab,B}	1.56±0.25 ^{b,C}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวดิ่ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- คะแนน 0-15 โดยคะแนนต่ำ แสดงว่า ตัวอย่างมีความแข็งและเหนียวน้อย และคะแนนสูง แสดงว่า ตัวอย่างมีความแข็งและเหนียวมาก

สำหรับผลการทดลองทางประสาทสัมผัสความชอบด้านความแข็งและความเหนียวจากผู้ทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน อายุระหว่าง 20-55 ปี แบ่งเป็นเพศชาย 8 คน และเพศหญิง 22 คน พบว่า ผู้ทดสอบมีความชอบตัวอย่างข้าวหุงสุกลดลงเมื่อตัวอย่างมีการคั้นรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้น (ตารางที่ 14) เนื่องจากข้าวหุงสุกมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นและมีความเหนียวลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า ผู้ทดสอบมีความชอบตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 ด้านความแข็งมากกว่าทริตเมนต์อื่นๆ เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 14 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	ตัวอย่าง	การคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่		
		1	3	5
ความแข็ง	KDML 105	6.50±1.31 ^{a,B}	3.10±1.37 ^{b,A}	2.80±1.54 ^{b,A}
	KDML 105 + 10% RD 6	6.20±1.81 ^{a,B}	3.23±1.43 ^{ab,A}	2.67±1.40 ^{b,A}
	KDML 105 + 0.4% WRF	6.20±1.52 ^{a,B}	3.12±1.67 ^{b,A}	2.50±1.46 ^{b,A}
	KDML 105 + 0.8% WRF	6.07±1.48 ^{a,B}	3.83±1.66 ^{a,A}	3.57±1.94 ^{a,A}
	KDML 105 + 0.2% KGM	6.03±2.08 ^{a,B}	3.20±1.88 ^{ab,A}	2.60±1.30 ^{b,A}
ความเหนียว	KDML 105	6.77±1.25 ^{a,A}	3.60±1.77 ^{a,B}	2.90±1.45 ^{a,B}
	KDML 105 + 10% RD 6	5.53±1.98 ^{b,A}	3.80±1.54 ^{a,B}	2.80±1.67 ^{a,C}
	KDML 105 + 0.4% WRF	6.27±1.62 ^{ab,A}	3.57±1.48 ^{a,B}	2.67±1.65 ^{a,C}
	KDML 105 + 0.8% WRF	6.12±1.42 ^{ab,A}	4.17±1.74 ^{a,B}	3.20±1.65 ^{a,C}
	KDML 105 + 0.2% KGM	5.90±1.86 ^{b,A}	3.60±1.67 ^{a,B}	2.77±1.30 ^{a,B}

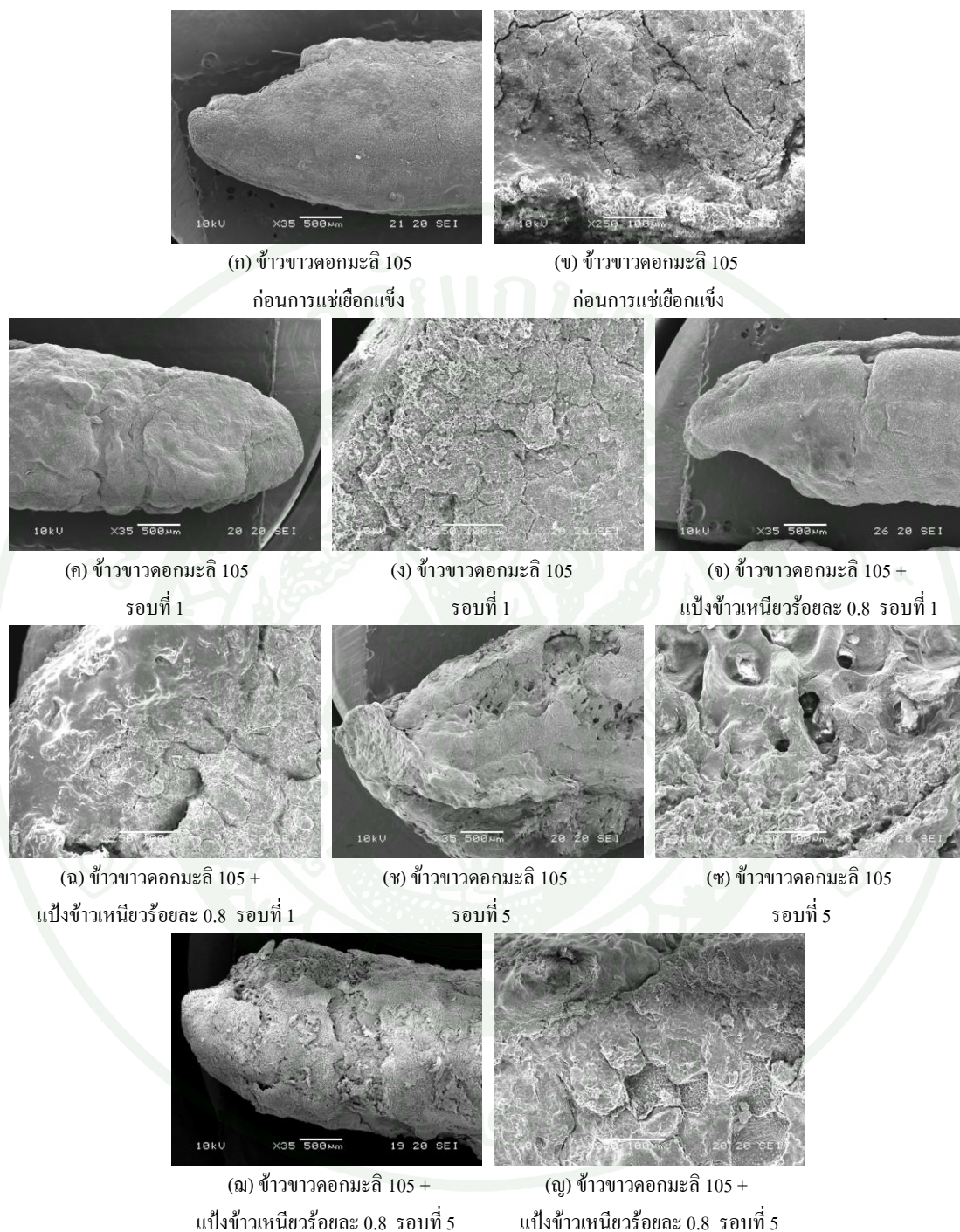
หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 1 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- คะแนน 1-9 โดย 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 คือ ชอบมากที่สุด

จากผลการทดลองด้านลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้ จึงเลือกตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 มาตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อหาความเชื่อมโยงของผลการทดลองที่ได้ ผลการตรวจสอบพบว่า โครงสร้างระดับจุลภาคบริเวณผิวรอบๆ และภาคตัดขวางของข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งมีลักษณะที่เรียบ (ภาพที่ 14 ก และ ข) แต่บริเวณผิวของเมล็ดข้าวหุงสุกเริ่มขรุขระเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 (ภาพที่ 14 ค) เนื่องจากเริ่มมีการสร้างโครงสร้างฟองน้ำขึ้นมา ดังนั้นได้ชัดเจนจากภาคตัดขวางของเมล็ดข้าว (ภาพที่ 14 ง) ความขรุขระและโครงสร้างฟองน้ำ

ของเมล็ดข้าวเกิดเพิ่มมากขึ้น เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 5 รอบ (ภาพที่ 14 ข และ ช) โครงสร้างฟองน้ำที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องมาจากการเกิดผลึกน้ำแข็งและเกิด ริโทเกรเดชันของเอมิโลสในระหว่างรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็ง โดยลักษณะการเกิดแบบนี้ยังสามารถพบได้ในสตาร์ชข้าวโพดและเพสท์ของแป้งสาลี (Ferrero *et al.*, 1993) รวมไปถึงเจลสตาร์ชข้าว (Charoenrein *et al.*, 2011) ด้วย ส่วนบริเวณผิวของตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 ในการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 และ 5 (ภาพที่ 14 จ และ ฉ) มีความเรียบมากกว่าตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ไม่ได้ผสมแป้งข้าวเหนียว เนื่องมาจากการเกิดโครงสร้างฟองน้ำน้อยกว่า แป้งข้าวเหนียวสามารถลดขนาดของรูพรุนผลึกน้ำแข็งเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งได้ถึง 5 รอบ (ภาพที่ 14 ฉ) โดยแป้งข้าวเหนียวเกิดเป็นเจลไปเคลือบเมล็ดข้าวในขณะที่หุงสุก ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากภาพที่ 14 ฉ นอกจากนี้อาจมีการแทรกซึมลงไปในเมล็ดข้าว จึงสามารถลดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างระดับจุลภาคและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่เนื่องมาจากการลดโครงสร้างฟองน้ำได้ จากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคจึงมีความสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง

จากการศึกษาของ Charoenrein and Preechathamwong (2010) พบว่า เจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวเหนียว เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1-5 รอบ มีโครงสร้างฟองน้ำน้อยกว่าเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งที่ไม่มีการเติมแป้งข้าวเหนียว เนื่องจากการกระจายตัวมากของเม็ดสตาร์ชข้าวเหนียวที่พองตัวแล้ว จึงช่วยลดระดับการเกิดริโทเกรเดชันของสตาร์ชข้าวได้ ดังนั้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ไม่ได้ผสมแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบจึงมีการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างระดับจุลภาคอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งและการลดลงของค่าความเหนียวจากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องมือและจากการทดสอบทางประสาทสัมผัส



ภาพที่ 14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิว (ก ค จ ซ และ ฉ) (35x, bar = 500 μ m) และภาคตัดขวาง (ข ง ฉ ซ และ ญ) (250x, Bar = 100 μ m) ของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมและไม่ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 หุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง และผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 และ 5 รอบ

จากผลทั้งหมดในการทดลองนี้มีความใกล้เคียงกับสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ โดยแป้งข้าวเหนียวมีประสิทธิภาพในการลดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสและโครงสร้างในระดับจุลภาคของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ อันเนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้ โดยมีประสิทธิภาพดีกว่าการเติมข้าวเหนียว และคอนยัคกลูโคแมนแนน

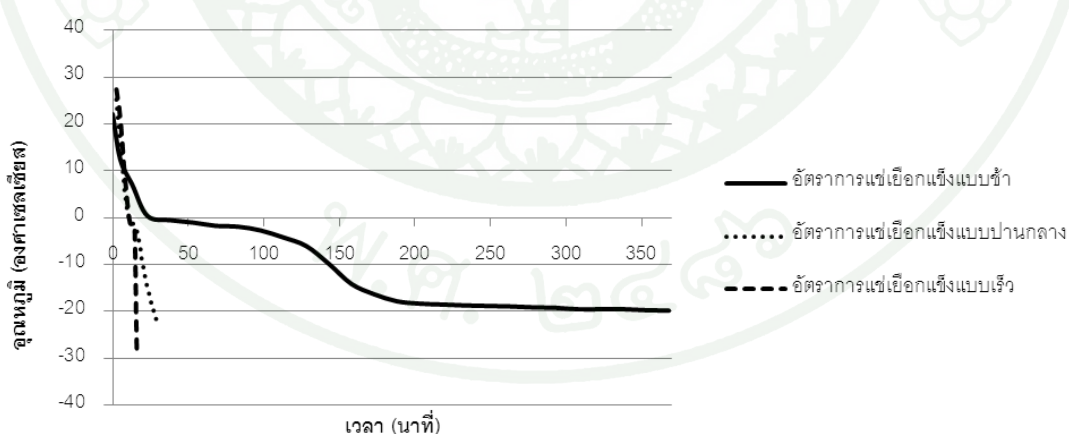
6. การศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง

จากผลการทดลองในข้อที่ 5 พบว่า การเติมแป้งข้าวเหนียวสามารถปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้ อย่างไรก็ตามคุณภาพของข้าวหุงสุกภายหลังการคั้นรูปจากเยือกแข็งยังขึ้นกับอัตราในการแช่เยือกแข็งอีกด้วย เนื่องจากอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถกำหนดขนาดของผลึกน้ำแข็งและอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชในข้าวหุงสุกเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาหาอัตราการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสม เพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง จากงานวิจัยของ Yu *et al.* (2010a) พบว่า เมื่อนำข้าวหุงสุกมาทำการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ($1.45^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) ร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C สามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้อย่างน้อย 7 เดือนตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา นอกจากนี้ยังได้มีงานวิจัยในผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก โดยพบว่า การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ($0.1^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชเกิดการเชื่อมโยงกัน เป็นผลให้เจลสตาร์ชข้าว (ชันยบูนธ์, 2551; Charoenrein and Preechathamwong, 2010) ขนมปังที่ผลิตจากโคแช่เยือกแข็ง (Le-Bail *et al.*, 2008; Yi and Kerr, 2009a) และเส้นพาสต้าหุงสุก (Olivera and Salvadori, 2009) มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งมากขึ้น ดังนั้นการทดลองนี้จึงตั้งสมมติฐานว่า หากใช้อัตราในการแช่เยือกแข็งแบบเร็วอาจช่วยรักษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งไว้ได้ เนื่องจากช่วยลดระยะเวลาในการแช่เยือกแข็ง การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชก็อาจจะลดลงไปด้วย

จากผลการทดลองพบว่า การนำข้าวหุงสุกมาทำการแช่เยือกแข็งด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน ทำให้ได้อัตราการแช่เยือกแข็งที่ต่างกันด้วย (ภาพที่ 15) โดยอัตราการแช่เยือกแข็งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกกำหนดขึ้น เพื่อเป็นตัวแทนของอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลางและเร็ว เพื่อเปรียบเทียบผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้ จากการตรวจเอกสารเกี่ยวกับการกำหนดอัตราการแช่เยือกแข็ง พบว่า International Institute of Refrigeration (IIR) (Ancos *et*

al., 2006) กำหนดเกณฑ์ของอัตราการแช่เยือกแข็ง คือ ถ้าการแช่เยือกแข็งมีอัตราเร็วต่ำกว่า 1, 1-5, 5-10 และมากกว่า 10 เซนติเมตร/ชั่วโมง จัดว่าเป็นอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า กึ่งเร็ว เร็ว และเร็วมาก ตามลำดับ แต่ยังไม่พบการกำหนดเกณฑ์ของอัตราการแช่เยือกแข็งที่มีหน่วยเป็น °ซ/นาที่ อาจเนื่องมาจากการกำหนดด้วยหน่วย °ซ/นาที่ มีความแตกต่างกันไปตามชนิดของอาหาร ซึ่งมีขนาดและปริมาณที่ต่างกัน โดย Yu et al. (2010a) ได้ศึกษาอัตราการแช่เยือกแข็งข้าวหุงสุกด้วยหน่วย °ซ/นาที่ พบว่า เมื่อแช่เยือกแข็งข้าวหุงสุกที่อุณหภูมิ -20°C ด้วยตู้แช่เยือกแข็ง ทำให้ได้อัตราการแช่เยือกแข็งเท่ากับ 0.09°ซ/นาที่ และเมื่อแช่เยือกแข็งข้าวหุงสุกที่อุณหภูมิ -40°C ด้วยแช่เยือกแข็งระบบไครโอจินิก ทำให้ได้อัตราการแช่เยือกแข็งเท่ากับ 0.33°ซ/นาที่ ซึ่งมีความแตกต่างจากอัตราที่ได้จากการทดลองนี้ อาจเนื่องมาจากปริมาณของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่นำไปแช่เยือกแข็งมีปริมาณต่างกัน ซึ่ง Yu et al. (2010a) ได้วัดอัตราการแช่เยือกแข็งจากตัวอย่างข้าวหุงสุก 1,300 กรัม แต่การทดลองนี้วัดอัตราการแช่เยือกแข็งจากข้าวหุงสุกเพียง 30 กรัม ดังนั้นขนาดและปริมาณของตัวอย่างจึงส่งผลต่ออัตราการแช่เยือกแข็ง

ในการศึกษาครั้งนี้จึงขอกำหนดอัตราการแช่เยือกแข็งที่ใช้ต่างกัน 3 ระดับเป็น (1) อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (0.082°ซ/นาที่) (2) อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (1.821 °ซ/นาที่) และ (3) อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (3.227°ซ/นาที่)



ภาพที่ 15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใจกลางของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกขณะผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน: ช้า (0.082°ซ/นาที่), ปานกลาง (1.821 °ซ/นาที่) และเร็ว (3.227°ซ/นาที่)

จากการหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน 3 อัตรา และผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1-5 รอบ พบว่า ตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งทั้งที่ผสมและไม่ผสมแป้งข้าวเหนียวไม่มีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงความชื้นในทุกกรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็ง โดยพบว่าตัวอย่างทั้งสองมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 61.71 – 64.12 (ตารางที่ 15) แต่มีแนวโน้มว่าการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถช่วยรักษาความชื้นได้ดีกว่าการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วปานกลางและช้า ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Yu *et al.* (2010a) ที่พบว่า ข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ($1.45^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) มีปริมาณความชื้นมากกว่าตัวอย่างที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วแบบช้า แสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งส่งผลต่อปริมาณความชื้นของตัวอย่าง อาจเนื่องมาจากในระหว่างการแช่เยือกแข็งแบบช้า โครงสร้างของเมล็ดข้าวถูกทำลายจากผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ น้ำจึงสามารถเคลื่อนย้ายออกจากตัวเมล็ดข้าวออกสู่ภายนอกได้ในระหว่างการคืนรูปจากเยือกแข็ง กระบวนการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กจำนวนมาก จึงทำให้โครงสร้างของเมล็ดข้าวถูกทำลายเพียงเล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับการทดลองในเส้นพาสต้าสุกแช่เยือกแข็ง (Olivera and Salvadori, 2009) ที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ($0.32^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) และเร็ว ($0.98^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) นอกจากนี้ Muadklay and Charoenrein (2008) พบว่า การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ($2.30^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) สามารถลดค่าร้อยละการแยกของของเหลวในตัวอย่างเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง รวมถึงในระบบของเจลสตาร์ชข้าว (Charoenrein and Preechathamwong, 2010) ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามอัตราการแช่เยือกแข็งไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในตัวอย่างข้าวหุงสุกในทุกกรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังเช่นผลของร้อยละการแยกของของเหลวในระบบของเจลสตาร์ช เนื่องจากในระบบของเจลสตาร์ชมีการอุ้มน้ำอยู่ในโครงสร้างมาก เม็ดสตาร์ชมีปริมาณน้ำและความร้อนเพียงพอในการเกิดเจลลิตีไนเซชัน ซึ่งการเกิดเจลลิตีไนเซชันสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อในระบบมีปริมาณน้ำและความร้อนเพียงพอต่อการที่เม็ดสตาร์ชนำไปใช้ในการพองตัว (Parker and Ring, 2005; Singh *et al.*, 2006) แตกต่างจากในระบบของข้าวหุงสุกที่ยังมีองค์ประกอบอื่นๆอยู่ในโครงสร้างมากมายเช่น โปรตีน ไขมัน เป็นต้น จึงอาจส่งผลต่อการดึงน้ำไปใช้ในการเกิดเจลลิตีไนเซชัน นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า เมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าข้าวหุงสุกใหม่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สันนิษฐานว่าเนื่องจากเมื่อจำนวนรอบในการคืนรูปจากเยือกแข็งมากขึ้น โครงสร้างของเมล็ดข้าวถูกทำลายจากผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 15 ปริมาณความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งและผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่ต่างกัน

ตัวอย่าง	อัตราการแช่เยือกแข็ง	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่				
			1	2	3	4	5
KDML 105	ช้า	62.73±0.31 ^A	62.79±0.64 ^{a,A}	62.78±0.60 ^{a,A}	62.82±0.09 ^{a,A}	62.58±0.67 ^{ab,A}	62.10±0.85 ^{a,A}
	ปานกลาง	62.73±0.31 ^A	62.75±0.61 ^{a,A}	62.55±0.21 ^{a,A}	62.18±0.54 ^{a,A}	62.84±0.26 ^{ab,A}	62.47±0.07 ^{a,A}
	เร็ว	62.73±0.31 ^A	63.32±0.42 ^{a,A}	64.05±1.18 ^{a,A}	63.16±0.91 ^{a,A}	63.34±1.85 ^{a,A}	63.08±0.48 ^{a,A}
KDML 105 + 0.8%WRF	ช้า	62.95±0.16 ^A	62.72±0.01 ^{a,AB}	63.00±0.34 ^{a,A}	61.71±0.43 ^{a,C}	61.79±0.20 ^{ab,C}	62.16±0.44 ^{a,BC}
	ปานกลาง	62.95±0.16 ^{AB}	63.28±0.03 ^{a,A}	62.89±0.15 ^{a,AB}	62.55±0.16 ^{a,AB}	60.76±0.51 ^{b,C}	62.10±0.68 ^{a,B}
	เร็ว	62.95±0.16 ^A	63.49±0.67 ^{a,A}	64.12±1.85 ^{a,A}	63.58±1.36 ^{a,A}	63.52±0.22 ^{a,A}	62.52±0.30 ^{a,A}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ไม่ได้วิเคราะห์สถิติในแนวตั้งสำหรับตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง
- อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า, ปานกลาง และเร็วเท่ากับ 0.082, 1.821 และ 3.227°ซ/นาท

การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชและลักษณะเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อคุณภาพของข้าวหุงสุก (Yu *et al.*, 2009) โดยอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก ค่าความแข็งและความเหนียวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันแสดงดังตารางที่ 16 และ 17 เห็นได้ว่าข้าวหุงสุกทั้งที่ผสมและไม่ผสมแป้งข้าวเหนียวมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและมีค่าความเหนียวลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการคืนรูปจากเยือกแข็ง โดยตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่าความแข็งมากกว่าและค่าความเหนียวน้อยกว่าตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียวในทุกๆ อัตราการแช่เยือกแข็ง สันนิษฐานว่าเนื่องมาจากการที่แป้งข้าวเหนียวเกิดเป็นเจลขณะหุงสุก จึงไปเคลือบบริเวณรอบๆ เมล็ดข้าวและอาจมีการแทรกซึมเข้าไปในเมล็ดข้าว จึงช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันและการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกน้ำแข็งได้ และเมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว พบว่า ค่าความแข็งของตัวอย่างทั้งสองในทุกๆ รอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งจะมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและช้าตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้อาหารที่มีองค์ประกอบหลักคือ สตาร์ช ผ่านช่วงอุณหภูมิที่เกิดสแตลิงหรือเกิดรีโทรเกรเดชันไปได้อย่างรวดเร็ว (Kock *et al.*, 1995; Muadklay and Charoenrein, 2008; Charoenrein and Preechathamwong, 2010) นอกจากนี้การแช่เยือกแข็งแบบช้ายังส่งผลให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้มาก ข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งจึงมีค่าความแข็งมาก การทดลองนี้ได้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชันยบูรณ์ (2551) ที่พบว่า เจลสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีความแข็งน้อยกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า เนื่องจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว นั้นทำให้ระบบผ่านสภาวะรับเบอร์รี่ (rubbery state) ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเกิดนิวเคลียสและการโตของผลึกของสายโมเลกุลสตาร์ชไปได้อย่างรวดเร็ว จึงช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินลงได้ (Ferrero *et al.*, 1994) นอกจากนี้ Yu *et al.* (2010a) ยังรายงานว่า การแช่เยือกแข็งแบบเร็วยังสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชและลดความแข็งของข้าวหุงสุกในระหว่างการเก็บรักษาได้ ยิ่งใช้อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งสูงยิ่งส่งผลให้ค่า ΔH และความแข็งของข้าวหุงสุกมีค่าต่ำลง

ตารางที่ 16 ค่าความแข็ง (นิวตัน) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่ต่างกัน

ตัวอย่าง	อัตราการแช่เยือกแข็ง	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่			
			1	2	3	5
KDML 105	ช้า	65.67±0.89 ^E	69.98±2.07 ^{a, D}	76.96±0.77 ^{a, C}	90.65±0.28 ^{a, B}	105.98±0.45 ^{a, A}
	ปานกลาง	65.67±0.89 ^D	65.24±0.31 ^{ab, D}	71.09±2.91 ^{a, C}	85.47±0.65 ^{b, B}	103.21±0.01 ^{a, A}
	เร็ว	65.67±0.89 ^E	57.97±1.28 ^{c, D}	70.68±1.38 ^{a, C}	79.32±1.75 ^{c, B}	97.86±1.25 ^{a, A}
KDML 105 + 0.8% WRF	ช้า	62.42±1.82 ^C	64.12±5.10 ^{ab, C}	75.43±7.30 ^{a, BC}	84.93±0.75 ^{a, AB}	98.14±0.01 ^{a, A}
	ปานกลาง	62.42±1.82 ^{CD}	60.39±0.52 ^{bc, D}	70.90±1.66 ^{a, BC}	79.56±3.23 ^{b, B}	96.66±7.32 ^{a, A}
	เร็ว	62.42±1.82 ^{CD}	55.05±0.45 ^{c, D}	68.61±1.79 ^{a, BC}	75.65±1.06 ^{b, B}	92.66±7.89 ^{a, A}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ไม่ได้วิเคราะห์สถิติในแนวตั้งสำหรับตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง
- อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า, ปานกลาง และเร็วเท่ากับ 0.082, 1.821 และ 3.227°ซ/นาที่ ตามลำดับ

จากการที่ความแข็งของข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเหนียวของข้าวหุงสุกลดลงไปด้วย การที่ความเหนียวของข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าลดลง เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน (Yu *et al.*, 2009) การแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งที่เร็วกว่าทำให้ลดระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งและลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ดังนั้นข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบรวดเร็วจึงมีค่าความเหนียวมากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้า (Yu *et al.*, 2010a)

ตารางที่ 17 ค่าความเหนียว (นิวตัน) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งและผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่ต่างกัน

ตัวอย่าง	อัตราการแช่เยือกแข็ง	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่			
			1	2	3	5
KDML 105	ช้า	14.14±0.58 ^A	9.67±0.98 ^{c,B}	8.27±0.16 ^{c,C}	3.26±0.33 ^{b,D}	0.19±0.06 ^{b,E}
	ปานกลาง	14.14±0.58 ^A	12.37±0.11 ^{b,B}	11.81±0.61 ^{c,B}	5.13±0.21 ^{b,C}	0.65±0.12 ^{b,D}
	เร็ว	14.14±0.58 ^A	14.93±0.73 ^{a,A}	13.71±0.78 ^{b,A}	8.60±0.46 ^{c,B}	0.56±0.45 ^{b,C}
KDML 105 + 0.8% WRF	ช้า	15.61±0.49 ^A	11.64±0.35 ^{bc,B}	9.67±0.02 ^{d,C}	7.67±1.01 ^{b,D}	0.51±0.12 ^{b,E}
	ปานกลาง	15.61±0.49 ^A	12.30±1.1 ^{b,BC}	14.05±0.48 ^{b,AB}	9.72±1.81 ^{ab,C}	1.97±0.24 ^{a,D}
	เร็ว	15.61±0.49 ^A	15.34±1.62 ^{a,A}	15.21±0.23 ^{a,A}	11.43±1.06 ^{a,B}	2.10±0.14 ^{a,C}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ไม่ได้วิเคราะห์สถิติในแนวตั้งสำหรับตัวอย่างข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง
- อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า, ปานกลาง และเร็วเท่ากับ 0.082, 1.821 และ 3.227°ซ/นาที่ ตามลำดับ

เมื่อทำการประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 10 คน อายุระหว่าง 23-55 ปี แบ่งเป็นเพศชาย 2 คน และเพศหญิง 8 คน (ตารางที่ 18) พบว่า ข้าวทั้งสองตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีความแข็งมากกว่าและความเหนียวน้อยกว่าการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและเร็ว ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องมือ นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีความแข็งมากและความเหนียวน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 ในทุกๆรอบของการคั้นรูปจากเยือกแข็ง โดยตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีความแข็งน้อยกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 และ 3 เนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชในเมล็ดข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่เกิดขึ้นได้มาก เมื่อเทียบกับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว และเมื่อทำการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 พบว่าตัวอย่างข้าวทั้ง 2 มีค่าความแข็งที่เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับ การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1



ตารางที่ 18 คะแนนจากการประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ ด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วย อัตราการแช่เยือกแข็งและผ่านการคั่วรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่ต่างกัน

ตัวอย่าง	อัตราการแช่เยือกแข็ง	การคั่วรูปจากเยือกแข็งรอบที่					
		1		3		5	
		ความแข็ง	ความเหนียว	ความแข็ง	ความเหนียว	ความแข็ง	ความเหนียว
KDML 105	ช้า	4.78±0.28 ^{a, B}	2.37±0.27 ^{d, A}	6.08±0.37 ^{a, A}	1.68±0.08 ^{b, B}	6.41±0.09 ^{ab, A}	1.38±0.16 ^{d, B}
	ปานกลาง	3.31±0.17 ^{b, B}	5.11±0.36 ^{b, A}	5.56±0.21 ^{ab, A}	1.85±0.32 ^{b, B}	6.13±0.34 ^{ab, A}	1.43±0.01 ^{cd, B}
	เร็ว	2.99±0.02 ^{b, C}	6.09±0.43 ^{a, A}	5.08±0.14 ^{b, B}	2.44±0.35 ^{b, B}	6.54±0.10 ^{a, A}	1.72±0.16 ^{bc, B}
KDML 105 + 0.8% WRF	ช้า	4.35±0.32 ^{a, A}	3.43±0.13 ^{c, B}	5.48±0.54 ^{ab, AB}	2.09±0.38 ^{b, A}	6.31±0.10 ^{ab, B}	1.72±0.08 ^{bc, A}
	ปานกลาง	3.15±0.33 ^{b, A}	5.97±0.08 ^{a, C}	4.99±0.12 ^{b, B}	3.45±0.36 ^{a, B}	5.61±0.60 ^{ab, B}	1.96±0.17 ^{ab, A}
	เร็ว	2.82±0.13 ^{b, A}	6.55±0.34 ^{a, C}	4.82±0.21 ^{b, B}	3.79±0.19 ^{a, B}	5.46±0.71 ^{b, B}	2.12±0.12 ^{a, A}

- หมายเหตุ**
- ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 - ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
 - ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
 - คะแนน 0-15 โดยคะแนนต่ำ แสดงว่า ตัวอย่างมีความแข็งและเหนียวน้อย และคะแนนสูง แสดงว่า ตัวอย่างมีความแข็งและเหนียวมาก
 - อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า, ปานกลาง และเร็วเท่ากับ 0.082, 1.821 และ 3.227^oซ/นาที่ ตามลำดับ

จากการประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วย อัตราการแช่เยือกแข็งและผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1, 3 และ 5 โดยใช้ผู้ทดสอบไม่ได้ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน อายุระหว่าง 20-55 ปี แบ่งเป็นเพศชาย 5 คน และเพศหญิง 25 คน ดังตารางที่ 19 พบว่า ผู้ทดสอบมีความชอบด้านความแข็งและความเหนียวในข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งทั้งที่ผสมและไม่ผสมแป้งข้าวเหนียวลดลงเมื่อจำนวนรอบในการคั้นรูปจากเยือกแข็งเพิ่มมากขึ้น โดยผู้ทดสอบมีความชอบลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกที่ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมากที่สุด ซึ่งผู้ทดสอบมีความชอบลักษณะเนื้อสัมผัสทั้งด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกทั้ง 2 ตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วกว่าการแช่เยือกแข็งแบบช้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 และ 3 ($p \leq 0.05$) แต่เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 ความชอบทั้งสองตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วไม่มีความแตกต่างจากตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้าอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) อาจเนื่องมาจากโครงสร้าง เจลของข้าวหุงสุกเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการทำลายโครงสร้างโดยผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่เมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบ จากการทำลายโครงสร้างนี้ส่งผลให้ค่าความแข็งของตัวอย่างข้าวหุงสุกเพิ่มขึ้น และความเหนียวลดน้อยลง เนื่องจากผนังรอบๆ รูพรุนผลึกน้ำแข็งมีความหนาและแข็งแรงขึ้นจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส (Charoenrein *et al.*, 2008)

ตารางที่ 19 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสความชอบด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็ง และผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	อัตราการแช่เยือกแข็ง	การคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่					
		1		3		5	
		ความแข็ง	ความเหนียว	ความแข็ง	ความเหนียว	ความแข็ง	ความเหนียว
KDML 105	ช้า	3.13±1.55 ^{b, A}	3.70±1.66 ^{b, A}	3.30±2.04 ^{b, A}	3.13±1.74 ^{d, AB}	2.67±1.45 ^{b, A}	2.60±1.52 ^{a, B}
	ปานกลาง	6.60±1.33 ^{a, A}	6.20±1.40 ^{a, A}	3.37±1.65 ^{a, B}	3.97±1.71 ^{bc, B}	2.90±1.75 ^{ab, B}	2.97±1.73 ^{a, C}
	เร็ว	6.43±1.33 ^{a, A}	6.43±1.22 ^{a, A}	4.50±1.81 ^{a, A}	4.60±1.63 ^{ab, A}	3.07±1.64 ^{ab, C}	2.93±1.51 ^{a, C}
KDML 105 + 0.8% WRF	ช้า	3.33±1.52 ^{b, A}	3.63±1.67 ^{b, A}	3.23±1.74 ^{b, A}	3.40±1.65 ^{cd, A}	2.87±1.83 ^{ab, A}	2.80±1.63 ^{a, A}
	ปานกลาง	6.30±1.53 ^{a, A}	6.43±1.63 ^{a, A}	4.50±2.03 ^{a, B}	4.63±1.97 ^{ab, B}	3.13±1.94 ^{ab, C}	3.00±1.62 ^{a, C}
	เร็ว	6.70±1.37 ^{a, A}	6.73±1.36 ^{a, A}	4.83±2.12 ^{a, B}	4.87±1.91 ^{a, B}	3.33±1.88 ^{a, C}	3.10±1.65 ^{a, C}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 1 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

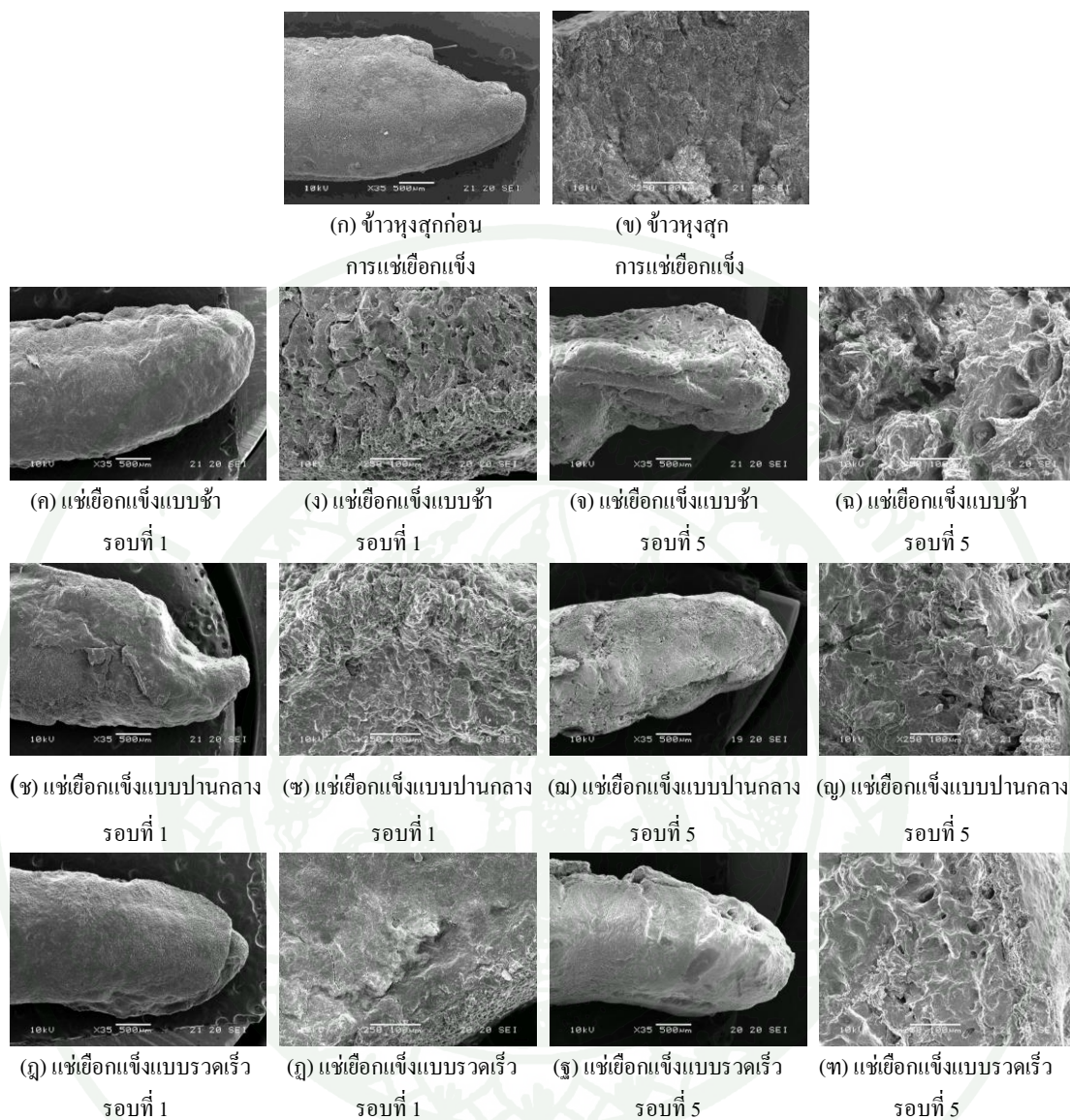
- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- คะแนน 1-9 โดย 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 คือ ชอบมากที่สุด
- อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า, ปานกลาง และเร็วเท่ากับ 0.082, 1.821 และ 3.227°ซ/นาที่ ตามลำดับ

ภาพที่ 16 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคบริเวณผิวและภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง พบว่า อัตราการแช่เยือกแข็งมีผลต่อโครงสร้างของเมล็ดข้าวหุงสุกดอกมะลิ 105 หุงสุก โดยข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็งมีลักษณะผิวภายนอกเมล็ดและภาคตัดขวางที่ค่อนข้างเรียบ (ภาพที่ 16 ก และ ข) แต่เมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็งในรอบที่ 1 ทำให้ผิวด้านข้างของตัวอย่างมีความขรุขระ (ภาพที่ 16 ค) และด้านภาคตัดขวางเกิดรูพรุนของผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (ภาพที่ 16 ง) นอกจากนี้ยังเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนทั้งที่บริเวณผิวและภาคตัดขวางมากขึ้นเมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 (ภาพที่ 16 จ และ ฉ) และเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 และ 5 ทั้งหมดพบว่า การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (ภาพที่ 16 ก-ค) ทำให้ตัวอย่างมีความเรียบมากกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (ภาพที่ 16 ช-ญ) และช้า (ภาพที่ 16 ค-ฉ) ตามลำดับ การแช่เยือกแข็งแบบช้าทำให้ผลึกน้ำแข็งที่ได้มีขนาดใหญ่ เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อยและมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ ในทางตรงกันข้ามหากใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในตัวอย่างมีขนาดเล็กจำนวนมากและเกิดอย่างสม่ำเสมอ (Bail, 2004; Zaritzky, 2006; Fellows, 2009) อีกทั้งการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทำให้อาหารที่มีองค์ประกอบหลักคือ สตาร์ช ผ่านช่วงอุณหภูมิที่เกิดสแตลิงหรือเกิดรีโทรเกรเดชัน ไปด้วยอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน (Kock et al., 1995; Muadklay and Charoenrein, 2008; Charoenrein and Preechathamwong, 2010)

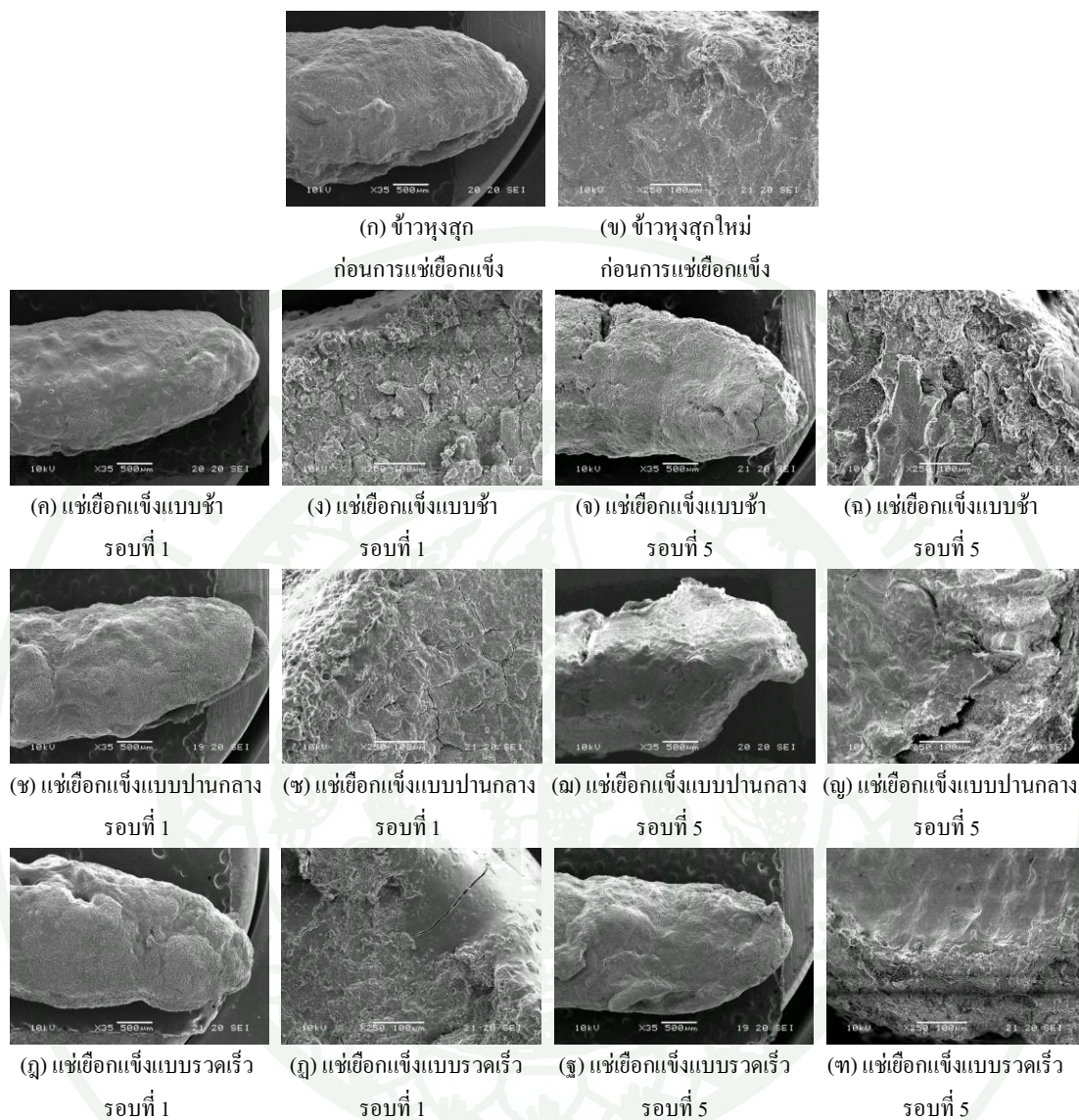
Charoenrein and Preechathamwong (2010) พบว่า การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าในเจลสตาร์ชข้าว ทำให้เกิดกระบวนการแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลานาน โดยไม่ผ่านช่วงความเย็นยิ่งยวด (undercooling) ผลึกน้ำแข็งจะมีขนาดใหญ่และมีจำนวนน้อยเกิดขึ้นในเมทริกซ์ที่หนา เป็นผลให้เกิดเป็นโครงสร้างฟองน้ำ ทำให้มีรูพรุนผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้นในตัวอย่าง เนื่องจากการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ทำให้ใช้ระยะเวลานานในกระบวนการแช่เยือกแข็ง โดยในช่วงการทำความเย็นก่อนถึงกระบวนการแช่เยือกแข็ง สายเอมิโลสในตัวอย่างเกิดรีโทรเกรเดชัน เมื่อแช่เยือกแข็งจึงทำให้เกิดเป็นเมทริกซ์ที่หนาล้อมรอบผลึกน้ำแข็ง

นอกจากนี้การเติมแป้งข้าวเหนียวลงไปในข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง พบว่า แป้งข้าวเหนียวสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้ (ภาพที่ 17) เนื่องจากการเกิดเจลของแป้งข้าวเหนียวเคลือบและแทรกซึมในเมล็ดข้าวหุงสุก โดยจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ดังภาพจากภาคตัดขวางของเมล็ดข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว และผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 (ภาพที่ 17 ก) ซึ่งตัวอย่างเมล็ดข้าวมีผิว (ภาพที่ 17 ก) และ

ภาคตัดขวางของเมล็ด ที่มีความเรียบ แทนจะไม่มีเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างจากข้าวผสมแป้งข้าวเหนียวก่อนการแช่เยือกแข็ง (ภาพที่ 18 ก และ ข) อีกทั้งข้าวหุงสุกที่ผสมแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า และนำมาผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 5 รอบ (ภาพที่ 17 จ และ ฉ) จะมีผิวที่เรียบกว่า และมีรูพรุนในเนื้อข้าวน้อยกว่าข้าวหุงสุกที่ไม่ผสมแป้งข้าวเหนียว (ภาพที่ 16 จ และ ฉ) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองที่ 5 ดังนั้นการเติมแป้งข้าวเหนียวจึงสามารถลดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างระดับจุลภาคและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งเนื่องมาจากการลดโครงสร้างฟองน้ำได้ นอกจากนี้เมื่อตัวอย่างผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้น ผิวของข้าวหุงสุกมีความขรุขระและมีรูพรุนจากผลึกน้ำแข็งในเนื้อข้าวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งรูพรุนในตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า (ภาพที่ 17 ค-ฉ) มีขนาดใหญ่กว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (ภาพที่ 17 ช-ญ) และเร็ว (ภาพที่ 17 ฉ-ท) ตามลำดับ



ภาพที่ 16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิว (ก ค จ ช ฉ ฎ และ ฐ) (35x, bar = 500 μ m) และภาคตัดขวาง (ข ง ฉ ญ ฎ และฑ) (250x, Bar = 100 μ m) ของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 ก่อนการแ่ช่เยื่อกแ่จ้งและที่ผ่านการแ่ช่เยื่อกแ่จ้งแบบซ้้า (0.082 $^{\circ}$ ซ/นาที่) ปานกลาง (1.821 $^{\circ}$ ซ/นาที่) และรวดเร็ว (3.227 $^{\circ}$ ซ/นาที่) โดยผ่านการคืนรูปจากเยื่อกแ่จ้งจำนวน 1 และ 5 รอบ



ภาพที่ 17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิว (ก ค จ ช ฉ ฎ และ ฐ) (35x, bar = 500 μm) และภาคตัดขวาง (ข ง ฉ ญ ฎ และฑ) (250x, Bar = 100 μm) ของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 0.8 ก่อนการแช่เยือกแข็งและที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า (0.082°/นาท) ปานกลาง (1.821°/นาท) และรวดเร็ว (3.227°/นาท) โดยผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1 และ 5 รอบ

เมื่อนำตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งมาตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่า ข้าวหุงสุกก่อนการแช่เยือกแข็ง และที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว แล้วนำมาทำการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 สำหรับทั้งตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผสมและไม่ผสมแป้งข้าวเหนียวไม่พบการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช สำหรับตัวอย่างที่พบการเกิดรีโทรเกรเดชันนั้น retrograded starch melting peak เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 49.0 – 65.2 °C (ตารางที่ 20) ตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้ามีการเกิดรีโทรเกรเดชันมากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า มีค่า ΔH ซึ่งแสดงถึงปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันที่มากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว เมื่อผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3 และ 5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ทำให้ใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งเป็นเวลานาน การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชจึงเกิดขึ้นได้มากในระหว่างกระบวนการ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Yu *et al.* (2010a) ที่พบว่าค่า ΔH ของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า และผลการวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชในการทดลองนี้ยังมีความสัมพันธ์กับค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งด้วย กล่าวคือ การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วสามารถรักษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ซึ่ง Perdon *et al.* (1999) พบว่า การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าความแข็งและค่าความเหนียวของข้าวหุงสุก แต่ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชันกับความเหนียวมีความซับซ้อนมากกว่า โดยจะขึ้นกับพันธุ์ข้าวและอุณหภูมิในการเก็บรักษาด้วย

นอกจากนี้การคืนรูปจากเยือกแข็งยังส่งผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช โดยเมื่อตัวอย่างข้าวหุงสุกผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น ค่า ΔH มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยตัวอย่างทั้งที่ผสมและไม่ผสมแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า และคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 มีค่า ΔH มากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 รวมถึงตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว และคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5 มีค่า ΔH มากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนการผสมแป้งข้าวเหนียว พบว่าสามารถช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในข้าวหุงสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งเดียวกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งด้วยจำนวนรอบที่เท่ากัน โดยตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมแป้งข้าวเหนียวมีค่า ΔH น้อยกว่าตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบช้า และคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 และ 3 รวมถึงที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว และคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการตรวจสอบ

โครงสร้างระดับจุลภาค ที่การเติมแป้งข้าวเหนียวสามารถลด โครงสร้างฟองน้ำที่เกิดจากการเกิดรีโพรเกรเดชันของข้าวได้

จากผลการทดลองทั้งหมดในการศึกษานี้ พบว่า มีความสอดคล้องกับสมมติฐานการทดลองที่ได้ตั้งไว้ว่า หากใช้อัตราในการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะสามารถช่วยรักษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส และโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งไว้ได้ เนื่องจากช่วยลดระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งและการเกิดรีโพรเกรเดชันของสตาร์ช



ตารางที่ 20 To, Tp, Tc และค่า ΔH ของข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1-5 รอบ

ตัวอย่าง	อัตราการแช่เยือกแข็ง	การคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่	To (°ซ)	Tp (°ซ)	Tc (°ซ)	ΔH (J/g) (น้ำหนักแห้ง)
		ก่อนการแช่เยือกแข็ง	nd	nd	nd	nd
KDML 105	ช้า	1	49.0 ± 0.7 ^a	56.9 ± 0.2 ^{ab}	65.2 ± 2.3 ^a	0.1 ± 0.0 ^f
	ช้า	3	50.3 ± 0.1 ^a	57.0 ± 0.0 ^{ab}	63.6 ± 0.3 ^{ab}	0.4 ± 0.0 ^{ab}
	ช้า	5	49.1 ± 0.2 ^a	56.1 ± 0.1 ^{cd}	62.0 ± 0.1 ^{bc}	0.5 ± 0.0 ^a
	เร็ว	1	nd	nd	nd	nd
	เร็ว	3	49.3 ± 2.4 ^a	56.5 ± 0.6 ^{bc}	62.7 ± 0.1 ^{bc}	0.2 ± 0.0 ^d
	เร็ว	5	49.3 ± 0.0 ^a	56.1 ± 0.0 ^{cd}	61.9 ± 0.0 ^{bc}	0.4 ± 0.0 ^{bc}
		ก่อนการแช่เยือกแข็ง	nd	nd	nd	nd
KDML 105 + 0.8%WRF	ช้า	1	50.1 ± 0.1 ^a	55.6 ± 0.2 ^{de}	61.7 ± 0.3 ^c	0.1 ± 0.0 ^g
	ช้า	3	50.9 ± 0.1 ^a	57.2 ± 0.2 ^a	63.2 ± 0.1 ^{bc}	0.4 ± 0.0 ^c
	ช้า	5	49.4 ± 0.1 ^a	56.0 ± 0.0 ^{cd}	61.9 ± 0.3 ^{bc}	0.4 ± 0.0 ^{abc}
	เร็ว	1	nd	nd	nd	nd
	เร็ว	3	51.0 ± 0.0 ^a	56.7 ± 0.1 ^{ab}	62.2 ± 0.0 ^{bc}	0.2 ± 0.0 ^c
	เร็ว	5	49.1 ± 0.2 ^a	55.4 ± 0.0 ^c	61.5 ± 0.1 ^c	0.4 ± 0.0 ^c

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- To, Tp, Tc และ ΔH คือ อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิที่จุดสูงสุด อุณหภูมิสุดท้าย และค่าพลังงานเอนทาลปีของการสลายรีโทรเกรดสตาร์ช
- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- nd หมายความว่า ไม่พบ retrograded starch melting peak
- อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า, ปานกลาง และเร็วเท่ากับ 0.082, 1.821 และ 3.227°ซ/นาที

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. วิธีการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธีการเอกซเรย์ชั้นเป็นวิธีการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องมือที่มีความสัมพันธ์กับการประเมินค่าทางประสาทสัมผัสด้านความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งมากที่สุด อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ใช้ได้ดีในกรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณมากเพียงพอต่อการวัด จึงเป็นวิธีที่บ่งบอกการรับรู้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผู้บริโภคได้แม่นยำ

2. การปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง โดยการเติมแป้งข้าวเหนียวความเข้มข้นร้อยละ 0.8 เป็นสูตรที่เหมาะสมในการปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง อีกทั้งยังช่วยลดขนาดของรูพรุนของผลิตภัณฑ์น้ำแข็งเมื่อผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบได้ดีกว่าการเติมข้าวเหนียว และคอนยัคกลูโคแมนแนน ซึ่งแป้งข้าวเหนียวช่วยลดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัส และ โครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวแช่เยือกแข็ง โดยเกิดเป็นเจลเคลือบผิวและแทรกซึมลงในเนื้อเมล็ดข้าวในขณะหุงสุก

3. ข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ($3.227^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) มีคุณภาพดีกว่าข้าวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง ($1.821^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) และช้า ($0.082^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) เนื่องจากช่วยลดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัส และ โครงสร้างระดับจุลภาค โดยลดการเกิดโครงสร้างแบบฟองน้ำ และขนาดของรูพรุนผลิตภัณฑ์น้ำแข็ง รวมถึงลดอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันเมื่อข้าวหุงสุกผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งหลายรอบได้

4. สภาวะที่สามารถลดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส และ โครงสร้างระดับจุลภาคได้ดีที่สุดในการทดลองนี้ หรือเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพ และลดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของข้าวแช่เยือกแข็งได้ดีที่สุด คือ การใช้แป้งข้าวเหนียวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.8 ร่วมกับการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ($3.227^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$)

ข้อเสนอแนะ

1. แป้งข้าวเหนียวสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ และลดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง ในระหว่างการคืนรูปจากเยือกแข็งหลายรอบได้ ดังนั้นควรมีการศึกษานำแป้งข้าวเหนียวไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งพร้อมบริโภครูปแบบอื่น ๆ ที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักด้วย เช่น ขนมชั้น ขนมเล็ก หรือเส้นก๋วยเตี๋ยว เป็นต้น

2. นอกจากแป้งข้าวเหนียวแล้ว อาจมีการนำวัตถุดิบอื่นมาช่วยในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง เช่น ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ และอาจมีการปรับใช้ความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ให้เหมาะสม เป็นต้น

3. เนื่องจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นพันธุ์ข้าวหอม ซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะประจำพันธุ์ ซึ่งในการทดลองนี้ยังไม่มีการทดสอบการเปลี่ยนแปลงด้านกลิ่นของตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมแป้งข้าวเหนียว ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงการเปลี่ยนแปลงด้านกลิ่นด้วย

4. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงอายุการเก็บรักษาและค่าใช้จ่ายในการผลิตข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง เพื่อเป็นแนวทางแก่การนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

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

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เกรียววัลย์ อัดตะวีริยะสุข. 2534. คุณภาพเมล็ดทางกายภาพและการแปรรูปเมล็ด. ศูนย์วิจัยข้าว ปทุมธานี. สถาบันวิจัยข้าว. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

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

ณัฐสุดา ปรีชาธรรมวงศ์. 2552. การปรับปรุงคุณภาพของเมล็ดข้าวแช่เยือกแข็งด้วยสารไขมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

น้ำฝน ศีตะจิตต์. 2548. การเกิดริโทเกรเดชันของข้าวขาวและข้าวเหนียวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงหุงสุกแช่เยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมพร ศรีสุข. 2545. ผลของสารเคลือบต่อคุณภาพของข้าวกล้องหุงสุกแช่เยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2549. กระบวนการแช่เยือกแข็งอาหาร, น. 154-186. ใน คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, ผู้รวบรวม. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- สิริกัญจน์ เกียรติชนะไพบูลย์. 2551. ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพทางเคมี ภายภาคลักษณะทาง
ประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา และความชอบของข้าวพันธุ์ต่างๆที่หุงต้มด้วยวิธีการต่างกัน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรรณดา ตูลชัย. 2551. เหมื่ออาหารของคาร์โบไฮเดรต. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- วิไล รังสาดทอง. 2547. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 4. บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล
พับลิเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ชนะบุลย์ สัจจอนันตกุล. 2533. Food Freezing ง่ายหรือยาก. วารสารอุตสาหกรรมเกษตร 1(1):
13-19.
- ชั้นขุมรณ์ อรัญนารถ. 2551. การปรับปรุงคุณภาพของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งด้วยคอนยัคกลูโค
แมนแนนและน้ำตาลชนิดต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรวรรณ ตติรัตน์. 2549. ผลของการแช่เยือกแข็งและคอนยัคกลูโคแมนแนนต่อความคงตัวของเจล
สตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- A.O.A.C. 2000. **Official Method of Analysis**. 17th ed., The Association of official Analytical
Chemists, Arlington, Virginia.
- Ancos, D.B., C. Sanchez-Moreno, S.D. Pascual-Teresa and M.P. Cano. 2006. Fruit freezing
principles, pp. 59-79. In Y.H. Hui ed. **Handbook of Fruits and Fruit Processing**.
Blackwell Publishing. Amsterdam.

- Arocas, A., T. Sanz, M.I. Hernando and S.M. Fiszman. 2011. Comparing microwave and water bath-thawed starch-based sauces: Infrared thermography, rheology and microstructure. **Food Hydrocolloid**. 25: 1554-1562.
- Arunyanart, T. and Charoenrein, S. 2008. Effects of sucrose, xylitol and konjac glucomannan on stability of frozen rice starch gels, pp. 1-6. *In* 34th Congress on Science and Technology of Thailand. **Science and Technology for Global Challenges**. The Science Society of Thailand Under the Patronage of H.M. the King, Bangkok.
- Bail, A.L. 2004. Freezing Processes: Physical Aspects. *In* Y.H. Hui, P. Cornillon, I.G. Legaretta, M.H. Lim, K.D. Murrell and W.K. Nip, eds. **Handbook of Frozen Foods Food Science and Technology 1**. Marcel Dekker, New York.
- Biliaderis, C.G. and J.R. Tonogai. 1991. Influence of lipids on the thermal and mechanical properties of concentrated starch gels. **J. Agric. Food Chem.** 39: 838-840.
- BeMiller, J. N. 2008. Hydrocolloids, pp. 203-214. *In* E.K., Arendt and F.D., Bello, eds. **Gluten-free cereal products and beverages 9**. Academic Press, Burlington.
- Bett-Garber, K.L., E.T. Champagne, A.M. McClung, K.A. Moldenhauer, S.D. Linscombe and K.S. McKenzie. 2001. Categorizing rice cultivars based on cluster analysis of amylose content, protein content and sensory attributes. **Cereal Chem.** 78: 551-558.
- Bhattacharya, M., T.M. Langstaff and W. Berzonsky. 2003. Effect of frozen storage and freeze-thaw cycles on the rheological and baking properties of frozen doughs. **Food Res. Int.** 36: 365-372.
- Cagampang, G. B., C.M. Perez and B.O. Juliano. 1973. A gel consistency test for eating quality of rice. **J. Sci. Food Agric.** 24: 1589 - 1594.

- Cameron, D.K. and Y.J. Wang. 2005. A better understanding of factors that affect the hardness and stickiness of long-grain rice. **Cereal Chem.** 82: 113-119.
- Champagne, E.T. 1996. Rice starch: composition and characteristics. **Cereal Food World** 41 (1): 833-383.
- _____, K.L. Bett, B.T. Vinyard, A.M. Mcclung, F.E. Barton, K. Moldenhauer, S. Linscombe and K. Mckenzie. 1999. Correlation between cooked rice texture and rapid viscoanalyzer measurements. **Cereal Chem.** 76: 764-771.
- _____, G. Lyonb, B.K. Min, B.T. Vinyard, K.L. Bett, F.E. Barton, D.B. Webb, A.M. Mcclung, K.A. Moldenhauer, S. Linscombes, K.S. Mckenzie and D.E. Kohlwey. 1998. Effects of postharvest processing on texture profile analysis of cooked rice. **Cereal Chem.** 75: 181-186.
- 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.
- 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.

- Coulter, T.P. 2002. **Food the Chemistry of Its Components**. Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Creed, P.G. 2006. Quality and Safety of Frozen Ready Meals, pp. 458-479. *In* D.W. Sun, eds. **Handbook of frozen food processing and packaging**. Taylor & Francis, New York.
- Delwiche, S.R., K.S. McKenzie and D.B. Webb. 1996. Quality characteristics in rice by nearinfrared reflectance analysis of whole grain milled samples. **Cereal Chem.** 73: 257-263.
- Derycke, V., W.S. Veraverbeke, G.E. Vandeputte, W. De Man, R.C. Hosney and J.A. Delcour. 2005. Impact of proteins on pasting and cooking properties of nonparboiled and parboiled rice. **Cereal Chem.** 82: 468-474.
- Ebuehi, O.A.T. and A.C. Oyewole. 2007. Effect of cooking and soaking on physical characteristics, nutrient composition and sensory evaluation of indigenous and foreign rice varieties in Nigeria. **African J. Biotech.** 6(8): 1016-1020.
- Eliasson, A.C., and H.R. Kim. 1992. Changes in rheological properties of hydroxypropyl potato starch pastes during freeze-thaw treatments. I. A rheological approach for evaluation of freeze-thaw stability. **J. Texture Stud.** 23: 279-295.
- _____ and N. Krog. 1985. Physical properties of amylose monoglyceride complexes. **J. Cereal Sci.** 3:239-246.
- Fellows, P.J. 2009. **Food Processing Technology: Principles and Practice**. Woodhead Publishing, New York.

Fennema, O.R., W.D. Powrie and E.H. Marth. 1973. **Low Temperature Preservation of Foods and Living Matter**. Marcel Dekker, New York.

Ferrero, C., M.N. Martino and N.E. Zaritzky. 1993. Stability of frozen starch pastes: Effect of freezing, storage and xanthan gum addition. **J. Food Process Pres.** 17: 191–211.

_____, _____ and _____. 1994. Corn starch-xanthan gum interaction and its effect on the stability during storage of frozen gelatinization suspensions. **Starch/Stärke**. 46: 300-308.

_____ and N.E. Zaritzky. 2000. Effect of freezing rate and frozen storage on starch-sucrosehydrocolloid systems. **J. Sci. Food Agric.** 80: 2149-2158.

Ghasemi, E., M.T.H. Mosavian and M.H.H. Khodaparast. 2009. Effect of stewing in cooking step on textural and morphological properties of cooked rice. **Rice Sci.** 16(3): 243-246.

Giannou, V. and C. Tzia. 2007. Frozen dough bread: Quality and textural behavior during prolonged storage – Prediction of final product characteristics. **J Food Eng.** 79:929-934.

George, M.R. 1997. Freezing systems, pp. 3-9. *In* M.C. Erickson and Yen-Con 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, eds. **Frozen Food Science and Technology** 10. Blackwell Publishing, Oxford.

Hamaker, B.R. and V.K. Griffin. 1990. Changing the viscoelastic properties of cooked rice through protein disruption. **Cereal Chem.** 67: 261-267.

Hanson, H.L., K.D. Nishita and H. Lineweaver. 1953. Preparation of stable frozen puddings.

Food Technol. 11: 462-465.

Hartel, R.W. 2001. **Crystallization in Foods**. An Aspen Publication, Maryland.

Hayakawa, T., S.W. Seo and I. Igaue. 1980. Electron microscopic observation of rice grain I.

Morphology of rice starch. **J. Jpn. Soc. Starch Sci.** 27: 173-179.

Hoshikawa, K. 1968. Studies on the development of endosperm in rice. Development of starch granules in endosperm tissue. **Nippon Sakumotsu Gakkai Kiji** 37: 207-216.

International Institute of Refrigeration. 1986. **Recommendations for the processing and handling of frozen foods (3rd ed.)**, Paris.

International Rice Research Institute (IRRI). 1971. **Annual report for 1970**, Los Baños, Philippines.

Iturriaga, L.B., B. L. D. Mishima and M. Anon. 2010. A study of the retrogradation process in five argentine rice starches. **LWT-Food Sci Technol.** 43: 670-674.

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, eds. **Rice Chemistry and Technology**. St Paul, MN.

Juliano, B. O. 1993. **Rice in human nutrition**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

_____ and C.P. Villareal. 1993. **Grain Quality Evaluation of World Rices**. International Rice Research Institute, Manila.

_____. 2001. Asian perspective on rice sensory quality. **Cereal Foods World 46**: 531–538.

_____, C. Perez, S. Barber, A.B. Blakeney, T. Iwasaki, N. Shibuya, K. Keneaster, S. Chung, B. Laignelet, B. Launay, A.M. Del Mundo, H. Suzuki, J. Shiki, S. Tsuji, J. Tokoyama, K. Tatsumi and B.D. Webb. 1981. International cooperative comparison of instrumental methods for cooked rice. **J. Text Stud.** 12:17-38.

_____, _____, E.P. Alyoshin, V.B. Romanov, A.B. Blakeney, L.A. Welsh, N.H. Choudury, L. Delgado, T.A. Iwasaki, N. Shibuya, A.P. Mossman, C.B. Siwi, D.S. Damardjati, H. Suzuki and H. Kimura. 1984. International cooperative test on texture of cooked rice. **J. Texture Stud.** 15:357-376.

Karim, A.A., P.S. Oo and C.C. Seow. 2007. Pulsed NMR measurements of freeze/thaw-induced retrogradation of corn and wheat starch gels: Correlation with rheological measurements. **Food Hydrocolloid.** 21:1041-1045.

Khanna, S. and R.F. Tester. 2006. Influence of purified konjac glucomannan on the gelatinization and retrogradation properties of maize and potato starch. **Food Hydrocolloid.** 20: 567-576.

Kim, S.K.. 2000. Analysing and improving the texture of cooked rice, pp. 451-474. *In D.*, Kilcast, eds. **Texture in Food Volume 2: Solid Foods**. CRC Press, New York.

- 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.
- Kontogiorgos, V., H.D. Goff and S. Kasapis. 2008. Effect of aging and ice-structuring proteins on the physical properties of frozen flour–water mixtures. **Food Hydrocolloid.** 22: 1135-1147.
- Lai, V.M.F., M.C. Shen, A.I. Yeh, B.O. Juliano and C.Y. Lii. 2001. Molecular and gelatinization properties of rice starch from IR24 and Sinandomeng cultivars. **Cereal Chem.** 78: 596-602.
- Le-Bail, A., C. Nicolitch and C. Vuillod. 2008. Fermented Frozen Dough: Impact of Pre-fermentation Time and of Freezing Rate for a Pre-fermented Frozen Dough on Final Volume of the Bread. **Food Bioprocess Technol.** 1-7.
- Lee, M.H., M.H. Baek, D.S. Cha, H.J. Park and S.T. Lim. 2002. Freeze-thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums. **Food Hydrocolloid.** 16: 345-352.
- Lee, S. J. and M. Peleg. 1988. Direct measurement of the attractive force between individual cooked rice grains of sticky and flaky cultivars. **J. Food Sci.** 53: 1113–15.
- Li, B.,B. Xie and J.F. Kennedy. 2006. Studies on the molecular chain morphology of konjac Glucomannan. **Carbohydr Polym.** 64: 510-515.
- Lii, C.Y., M.L. Tsai and K.H. Tseng. 1996. Effect of amylose content on the rheological properties of rice starch. **Cereal Chem.** 73: 415-420.

- Lii, C.Y., V.M.F. Lai and M.C. Shen. 2004. Changes in retrogradation properties of rice starches with amylose content and molecular properties. **Cereal Chem.** 81: 392-398.
- Little, R. P., G.B. Hilder and E.H. Dawson. 1958. Differential effect of dilute alkali on 25 varieties of milled white rice. **Cereal Chem.** 35: 111-126.
- Lyon, B.G., E.T. Champagne, B.T. Vinyard and W.R. Windham. 2000. Sensory and instrumental relationships of texture of cooked rice from selected cultivars and postharvest handling practices. **Cereal Chem.** 77(1): 64-69.
- Luh, B.S. 2001. Rice Production, pp. 79-108. *In* G. Owens, eds. **Cereals Processing Technology 5**. CRC Press, New York.
- _____ and Y.K. Liu. 1991. Rice Flours in Baking, pp. 9-34. *In* B.S., Luh, eds. **Rice: Utilization 2**, New York.
- Ma, Y. and D.W. Sun. 2007. Hardness of cooked rice as affected by varieties, cooling methods and chill storage. **J. Food Process Eng.** 32: 161-176.
- Mandara, I., A. Polaki and S. Yanniotis. 2009. Influence of frozen storage on bread enriched with different ingredients. **J. Food Eng.** 92: 137-145.
- Marshall, W.E., W.R. Goynes and F.L. Normand. 1990. Effect of lipid and protein removal on starch gelatinization in whole grain milled rice. **Cereal Chem.** 67(5): 458-463.
- Matsuo, T., Y. Futsuhara, F. Kikuchi and H. Yamakuchi. 1997. **Science of the Rice Plant Volume Three Genetics**. Food and Agricultural Policy Research Center, Tokyo.
- Maynard, L.A. 1948. **Principles of Food Freezing**. John Wiley & Son, Inc., New York.

- Meullenet, J.F.C., G. Jason, P.M. Bradley and D. Melissa. 1998. Sensory descriptive texture analyses of cooked rice and its correlation to instrumental parameters using an extrusion cell. **Cereal Chem.** 75(5): 714-720.
- _____, E.T. Champagne, K.L. Bett, A.M. McClung and D. Kauffmann. 2000. Instrumental assessment of cooked rice texture characteristics: A method for breeders. **Cereal Chem.** 77: 512-517.
- _____, V.K. Griffin, K. Carson, G. Davis, S. Davis, J. Gross, J.A. Hankins, E. Sailer, C. Sitakalin, S. Suwansri and A.L. Vasquez Caicedo. 2001. Rice external preference mapping for Asian consumers living in the United States. **J. Sensory Stud.** 16(1): 73-94.
- Mitchell, C.R. 2009. Rice Starches: Production and Properties, pp. 569-578. In J. BeMiller and R., Whistler, eds. **Starch: Chemistry and Technology 16**, Burlington.
- Mizukami, H., Y. Takeda and S. Hizukuri. 1999. The structure of the hot-water soluble components in the starch granules of new Japanese rice cultivars. **Carbohydr Polym.** 38(4): 329-336.
- Morris, V.J. 1990. Starch gelation and retrogradation. **Trends Food Sci. Tech.** 1: 2-6.
- Muadklay, J. and S. Charoenrein. 2008. Effect of hydrocolloids and freezing rates on freeze-thaw stability of tapioca starch gels. **Food Hydrocolloid.** 22: 1268-1272.
- Norton, I.T. and T.J. Foster. 2001. Hydrocolloids in Real Food Systems, pp. 187-200. In P.A., Williams and G.O., Phillips, eds. **Gums and Stabilisers for the Food Industry 11**. Royal Society of Chemistry, Cambridge.

- Okabe, M. 1979. Texture measurement of cooked rice and its relationship to the eating quality. **J. Texture Stud.** 10:131-152.
- Ohtsubo, K., H. Toyoshima and H. Okadome. 1998. Quality assay of rice using traditional and novel tools. **Cereal Foods World.** 43: 203–6.
- Ong, M.H. and J.M.V. Blanshard. 1995. Texture determinants of cooked, parboiled rice I: Rice starch amylose and the fine structure of amylopectin. **J. Cereal Sci.** 21: 251–260.
- Olivera, D. F. and V.O. Salvadori. 2009. Effect of freezing rate in textural and rheological characteristics of frozen cooked organic pasta. **J. Food Eng.** 90: 271-276.
- Parker, R. and S.G. Ring. 2005. The Physical Chemistry of Starch, pp. 591-604. In S., Dumitriu, eds. **Polysaccharides Structure Diversity and Functional Versatility 24.** Marcel Dekker, New York.
- Parry, J.M. 2010. Konjac Glucomannan, pp. 198-217. In A., Imeson, eds. **Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents 11.** Blackwell Publishing Ltd, Oxford.
- Perdon, A.A., 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. 1979. Indicators of eating quality for non-waxy rices. **Food Chem.** 4: 185–95.
- 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.

- Rahman, M.S. 1999. Food preservation by freezing, pp. 259-284. *In* M. S. Rahman, ed. **Handbook of Food Preservation**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Rajesh, N., N. Uma and R. Valluru. 2012. Natural Polymers – A Boon for Drug Delivery, pp. 429-455. *In* V. Mittal, eds. **Renewable Polymers: Synthesis, Processing, and Technology 10**. Scrivener Publishing LLC., Massachusetts.
- Ramesh, M., S.Z. Ali and K.R. Bhattacharya. 1999. Structure of rice starch and its relation to cooked-rice texture. **Carbohyd Polym.** 38: 337-347.
- Reddy, P.K., R. Subramanian, S.A. Zakiuddin and K.R. Bhattacharya. 1994. Viscoelastic properties of rice-flour pastes and their relationship to amylose content and rice quality. **Cereal Chem.** 71: 548-552.
- _____, S.Z. Ali and K.R. Bhattacharya. 1993. The fine structure of rice-starch amylopectin and its relation to the texture of cooked rice. **Carbohyd Polym.** 22: 267-275.
- Rousset, S., B. Pons and J.M. Martin. 1999. Identifying objective characteristics that predict clusters produced by sensory attributes in cooked rice. **J. Texture Stud.** 30: 509-532.
- Saeleaw, M. and G. Schleining. 2010. Effect of blending cassava starch, rice, waxy rice and wheat flour on physico-chemical properties of flour mixtures and mechanical and sound emission properties of cassava crackers. **J. Food Process Eng.** 100 (1): 12-24.
- 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.
- Sandhya, R.M. R., and K. R. Bhattacharya. 1985. Rheological properties of rice flour slurries and pastes. **J. Food Sci. Technol.** 22:322-326.

- Sandhya, R.M. R., and K. R. Bhattacharya. 1989. Rheology of riceflour pastes: Effect of variety, concentration, and temperature and time of cooking. **J. Texture Stud.** 20:127-137.
- Sesmat, A. and J.F. Meullenet. 2001. Prediction of rice sensory texture attributes from a single compression test, multivariate regression, and a stepwise model optimization method. **J. Food Sci.** 66: 124-131.
- Shibuya, N. and T., Iwasaka. 1982. Effect of the enzymatic removal of endosperm cell wall on the gelatinization properties of aged and un-aged rice flours. **Starch/Stärke** 34: 300–303.
- Shove, E. and D. Southerton. 2000. Defrosting the freezer: From Novelty to Convenience – a Narrative of Normalization. **J. Mater Culture** 5(3): 301-319.
- 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.
- Singh, N., L. Kaur, K.S. Sandhu, J. Jagdeep and K. Nishinari. 2006. Relationships between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. **Food Hydrocolloid.** 20: 532-542.
- Sitachitta, N., K. Yamirudeng and O. Naivikul. 2006. Processing of frozen parboiled rice product. **Kasetsart J (Nat. Sci.).** 40: 688-693.
- Sitakalin, C., and J. F. Meullenet. 2000. Prediction of cooked rice texture using extrusion and compression tests in conjunction with spectral stress strain analysis. **Cereal Chem.** 77, 501-506.

- 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.
- Srisook, S. and O. Naivikul. 2004. Effect of coating substance on texture and retrograded properties of frozen cooked brown rice. **Kasetsart J (Nat. Sci.)**, 4: 477-483.
- Sun, D.W. 2001. **Advances in Food Refrigeration**. Leatherhead Publishing, London.
- Sun, D.W. and L. Zheng. 2006. Innovations in freezing process, pp. 175-195. *In* D.W. Sun, eds. **Handbook of Frozen Food Processing and Packaging 8**. Taylor & Francis, New York.
- Szczesniak, A.S. and B.J. Hall. 1974. Application of the general food texturometer to specific food products. **J. Texture Stud.** 6:117-138.
- Takigami, S. 2000. Konjac mannan, pp. 413-424. *In* G.O. Phillips and P.A. Williams, eds. **Handbook of Hydrocolloids**. Woodhead Publishing Limited., New York.
- Taub, I.A. and Singh R.P. 1998. **Food storage stability**. CRC press, USA.
- Tye, R. 1991. Konjac flour: properties and applications. **Food Technol.** 45: 11-16.
- Vandeputte, G.E. and J.A. Delcour. 2004. From sucrose to starch granule to starch physical behaviour: a focus on rice starch. **Carbohydr Polym.** 58: 245-266.
- Wang, N., D.W. Hatcher, R. Toews and E.J. Gawalko. 2009. Influence of cooking and dehulling on nutritional composition of several varieties of lentils (*Lens culinaris*). **LWT-Food Sci and tech.** 42: 842-848.

- Wang, Y., C. Chang and L. Zhang. 2010. Effects of freezing/thawing cycles and cellulose nanowhiskers on structure and properties of biocompatible starch/PVA sponges. **Macromol Mater Eng.** 295: 137-145.
- Webb, B.D. 1991. Rice quality and grades, pp. 89-119. In B.S. Luh, eds. **Rice: Utilization. Volume II, 2nd ed.** Van Nostrand Reinhold, New York.
- Whistler, R.L. and J.N. BeMiller. 1999. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists.** Eagan Press, Minnesota.
- Yadav, B.K. and V.K. Jindal. 2007. Water uptake and solid loss during cooking of milled rice (*Oryza sativa* L.) in relation to its physicochemical properties. **J. Food Eng.** 80: 46-54.
- Yam, K.L. and C.C. Lai. 2004. Microwavable Frozen Food or Meals, pp. 576-588. In Y.H. Hui, P. Cornillon, I.G. Legarreta, M.H. Lim, K.D. Murrell and W.K. Nip, eds. **Handbook of Frozen Foods Food Science and Technology 32.** Marcel Dekker Inc., New York.
- Yi, J., J.W. Johnson and W.L. Kerr. 2009. Properties of bread made from frozen dough containing waxy wheat flour. **J. Cereal Sci.** 50: 364-369.
- _____ and W.L. Kerr. 2009a. Combined effects of freezing rate temperature and time on bread dough and baking properties. **LWT-Food Sci and Tech.** 42: 1474-1483.
- _____ and _____. 2009b. Combined effect of dough freezing and storage conditions on bread quality factors. **J. Food Eng.** 93: 495-501.
- Yoon, S. H. 2002. Physicochemical properties of rice differing in milled degrees. **M. S. Thesis.** Dankook University, Korea.

- Yoshimura, M., T. Takaya and K. Nishinari. 1998. Rheological studies on mixture of corn starch and konjac-glucomannan. **Carbohydr Polym.** 35: 71-79.
- Yuan, R.C., D.B. Thompson and C.D. Boyer. 1993. Fine structure of amylopectin in relation to gelatinization and retrogradation behavior of maize starches from three wx-containing genotypes in two inbred lines. **Cereal Chem.** 70: 81-89.
- _____, _____ and _____. 1998. Freeze-thaw stability of three waxy maize starch pastes measured by centrifugation and calorimetry. **Cereal Chem.** 75(4): 571-573.
- Yu, S., Y. Ma and D.W. Sun. 2009. Impact of amylose content on starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage. **J. Cereal Sci.** 50: 139-144.
- _____, _____ and _____. 2010a. Effects of freezing rates on starch retrogradation and textural properties of cooked rice during storage. **LWT-Food Sci Technol.** 43: 1138-1143.
- _____, _____, T. Liu, L. Menager and D.W. Sun. 2010b. Impacts of cooling rates on the staling behavior of cooked rice during storage. **J. Food Eng.** 96: 416-420.
- Zhou, Z., K. Robards, S. Helliwell and C. Blanchard. 2002. Review composition and functional properties of rice. **Int. J. Food Sci. Technol.** 37: 849-868.
- Zaritzky, N. 2006. Physical-chemical principles in freezing, pp. 3-31. *In* D.W., Sun, eds. **Handbook of Frozen Food Processing and Packaging 1.** Taylor & Francis, New York.
- Zhang, Z.H. and D.W. Sun. 2006. Effect of cooling methods on the cooling efficiency and quality of cooked rice. **J. Food Eng.** 77: 269-274.





ภาคผนวก ก
การตรวจคุณภาพทางกายภาพ

1. การวัดขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าว (ตัดแปลงตามวิธีการของเครือวัลย์, 2534)

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เวอร์เนียร์คาลิเปอร์

1.2 วิธีการวิเคราะห์

เลือกเมล็ดข้าวที่มีขนาดสมบูรณ์ ไม่แตกหัก 10 เมล็ด วัดความยาวและความกว้างของเมล็ดข้าวด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ คำนวณค่าเฉลี่ยและอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเมล็ด (L/W ratio) โดย

$$\text{L/W ratio} = \frac{\text{ความยาวเฉลี่ยของเมล็ดข้าว (มิลลิเมตร)}}{\text{ความยาวเฉลี่ยของเมล็ดข้าว (มิลลิเมตร)}}$$

2. การวัดค่าสี ในระบบ hunter

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องวัดสี Minolta

2.2 วิธีการวิเคราะห์

นำตัวอย่างใส่ในภาชนะจนเกือบเต็ม นำปากกระบอกเครื่องวัดสีกดทับลงบนภาชนะที่ใส่ตัวอย่างจนแนบสนิท กดปุ่มเพื่อวัดค่าสี และบันทึกค่าสี L^* , a^* และ b^*



1. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

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

1.2 วิธีการวิเคราะห์

1.2.1 ตัวอย่างแป้งข้าวที่ใช้วิเคราะห์ต้องผ่านการบดจนมีอนุภาคเล็กกว่าหรือเท่ากับ 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

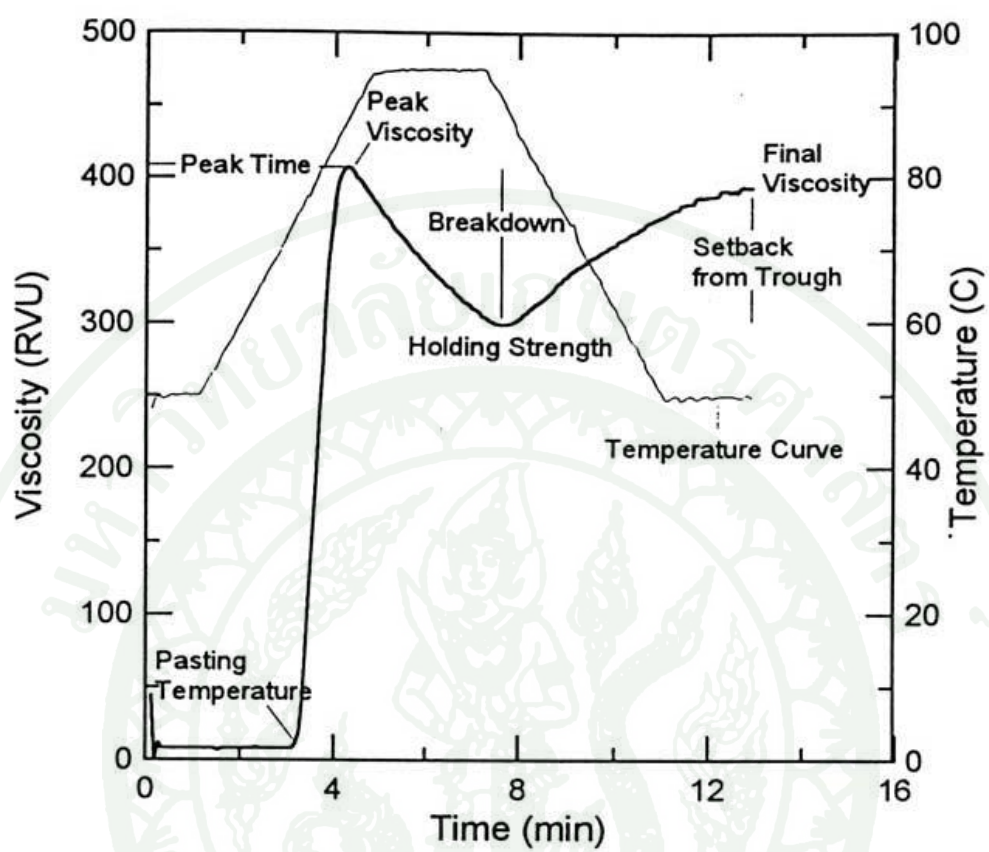
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที: วินาที)
50.0 (อุณหภูมิเริ่มต้น)	
50.0	1: 00
95.0	4: 45
95.0	7: 15
50.0	11: 00
สิ้นสุดการทดสอบ	12: 20

หมายเหตุ ความเร็วรอบเริ่มต้นที่ใช้คือ 960 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 160 รอบต่อนาทีจนถึงตลอดการทดสอบ

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

เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (อาร์วีเอ) ใช้ประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องพิจารณาจากความหนืดของผลิตภัณฑ์นั้นขณะให้ความร้อน โดยสามารถเปลี่ยนระดับอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ ปลอดภัยและสามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ การประเมินสมบัติความหนืดขึ้น (pasting properties) ด้วยเครื่องอาร์วีเอ สตาร์ชจะเปลี่ยนไปเป็นเจลมีผลทำให้ความหนืดสูงขึ้น โดยการควบคุมให้อยู่ที่สภาวะอุณหภูมิสูงภายใต้แรงเฉือนค่าหนึ่ง ทำให้ทราบความเสถียรของตัวอย่างที่ทดสอบ หลังจากนั้นทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลง เพื่อแสดงถึงค่าเซตแบคระหว่างการเปลี่ยนเป็นเจล ค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว ได้แก่

pasting viscosity	คือ อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเป็นลักษณะหนืดขึ้น (paste) (°ซ)
peak viscosity	คือ ความหนืดสูงสุดของการเปลี่ยนเป็นลักษณะหนืดขึ้นในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นถึงอุณหภูมิ 95 °ซ (อาร์วียู)
time to peak	คือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงความหนืดสูงสุด (นาที)
temperature at peak	คือ อุณหภูมิที่ความหนืดสูงสุด(องศาเซลเซียส)
break down	คือ ความหนืดต่ำสุดในช่วงอุณหภูมิ 95 - 50 องศาเซลเซียส
set Back	คือ ความหนืดที่สูงขึ้นหลังจากเบรกคาวน์เนื่องจากอุณหภูมิต่ำลงและโมเลกุลของสตาร์ชเริ่มยึดเหนี่ยวกันแข็งแรงขึ้น (อาร์วียู)
final viscosity	คือ ความหนืดสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ (อาร์วียู)



ภาพผนวกที่ ข1 ลักษณะเส้นความหนืดที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว



ภาคผนวก ค
การตรวจคุณภาพทางเคมี

1. การหาปริมาณความชื้น (AOAC, 2000 วิธีการที่ 925.10)

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1.1 กระจกพร้อมฝาอะลูมิเนียม

1.1.2 ตู้อบลมร้อน

1.1.3 เชชเคเตอร์

1.2 วิธีวิเคราะห์

นำกระจกพร้อมฝาอะลูมิเนียมอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเคชเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นใส่ตัวอย่างบดละเอียดที่ร้อนผ่าน 100 เมช ประมาณ 2-3 กรัม พร้อมทั้งจมน้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเปิดฝาไว้ เมื่อครบกำหนดเวลาก็ทำการปิดฝา แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเคชเคเตอร์ จากนั้นจึงนำออกมาชั่งน้ำหนัก เพื่อมาคำนวณหาร้อยละความชื้นในตัวอย่าง โดย

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

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 และโบรโมคริสซอลกรีน 0.1 กรัม ในเอทานอล 100 มิลลิลิตร)

2.2.7 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์แมล

2.3 วิธีการวิเคราะห์

2.3.1 ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในหลอดย่อย โดยระวังไม่ให้ติดข้างหลอด

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 ระวังไม่ควรรีบให้ไอกรดระเหยออกจากหลอดย่อย

2.3.5 ปรับให้ความร้อนที่เครื่องย่อย ย่อยจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเขียวใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่น 60-75 มิลลิลิตร (หรือเติมเป็น 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 จึงถือว่าถึงจุดยุติ บันทึกปริมาณกรดที่ใช้ไป แล้วนำมาคำนวณหาร้อยละของปริมาณไนโตรเจน ทำแบบลงคักควบคู่ไปด้วย โดยไม่มีตัวอย่างในหลอด

2.4 วิธีการคำนวณ

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

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

เมื่อ S หมายถึง ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไตเตรตกับสิ่งกลั่น (มิลลิลิตร)

B หมายถึง ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไตเตรตกับแบลงก์ (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 Thimble

3.1.4 Extraction cup

3.1.5 เดซิเคเตอร์ (Desicator)

3.1.6 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

3.2 สารเคมี

ปิโตรเลียมอีเทอร์

3.3 วิธีการวิเคราะห์

3.3.1 อดถ้วยสกัด (extraction cup) และทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (W1)

3.3.2 ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน (W2) ลงบนกระดาษกรองห่อให้มิดชิดและมีขนาดพอดีที่จะสามารถใส่ลงในทิมเบิล (thimble) ได้ จากนั้นจึงใส่ลงใน thimble

3.3.3 นำทิมเบิลใส่ลงในถ้วยสกัด แล้วเติมปิโตรเลียมอีเทอร์ปริมาตร 45 มิลลิลิตร ลงในถ้วยสกัด

3.3.4 นำถ้วยสกัดเข้าเครื่องวิเคราะห์ไขมัน ทำการสกัดเป็นเวลา 20 นาที และทำการชะล้างเป็นเวลา 45 นาที แล้วนำทิมเบิลออกจากถ้วยสกัด

3.3.5 นำถ้วยสกัดที่มีไขมันของตัวอย่างไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100°C 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. การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (ดัดแปลงตามวิธีการของ Juliano, 1971)

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

4.1.1 สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

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 กรดแอสिटิกความเข้มข้น 1 นอร์แมล (เตรียมโดยใช้กรดแอสिटิกเข้มข้นปริมาตร 60 มิลลิลิตร ใส่ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1 ลิตร)

4.2.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง

4.2.5 แอมิโลเพกทินบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง

4.2.6 สารละลายไอโอดีน (เตรียมโดยหั่งไอโอดีน 0.2 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2 กรัม ผสมกัน ละลายสารทั้งสองด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วเก็บไว้ในขวดสีชา)

4.3 วิธีการวิเคราะห์

4.3.1 ชั่งตัวอย่างข้าวสารบดละเอียดผ่าน 100 เมช 0.1000 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร

4.3.2 เติมเอทานอล 1 มิลลิลิตร ละลายตัวอย่างให้กระจายออก ระวังอย่าให้ตัวอย่างขึ้นมาเกาะที่ข้างขวด

4.3.3 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์แมล จำนวน 9 มิลลิลิตร พร้อมทั้งล้างตัวอย่างที่ข้างขวด

4.3.4 นำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 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 เติมกรดแอสिटิกความเข้มข้น 1 นอร์แมล จำนวน 1 มิลลิลิตรและสารละลายไอโอดีนจำนวน 2 มิลลิลิตร

4.3.8 เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

4.3.9 เตรียมแบลงค์ โดยเติมกรดแอสติกความเข้มข้น 1 นอร์แมล จำนวน 2 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีนจำนวน 2 มิลลิลิตร

4.3.10 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าแบลงค์ให้เป็นศูนย์

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 จากนั้นจึงเติมเติมกรดแอสติกความเข้มข้น 1 นอร์แมล ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ เติมสารละลายไอโอดีนจำนวน 2.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที

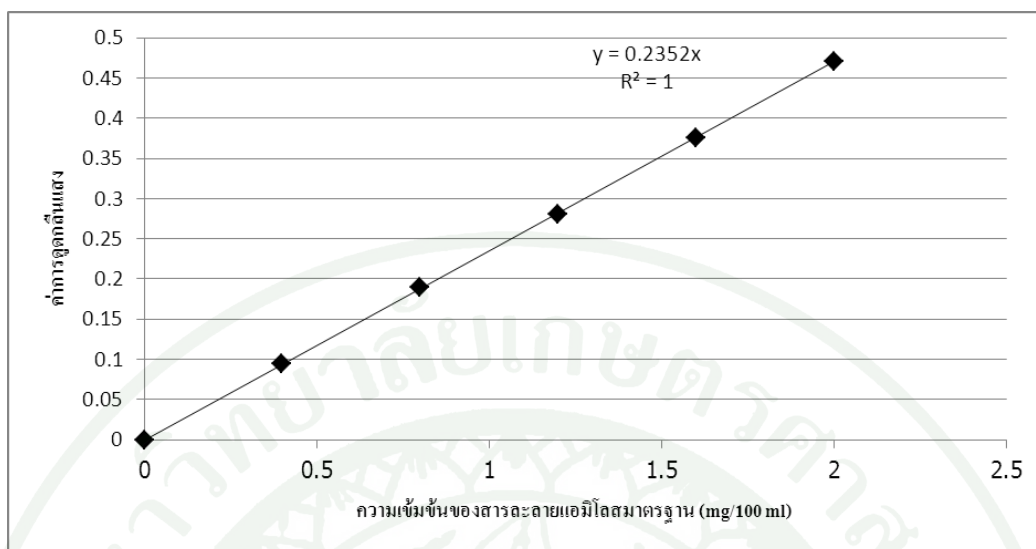
4.4.3 เตรียมแบลงค์โดยเติมกรดแอสติกความเข้มข้น 1 นอร์แมล ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีนจำนวน 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

4.4.4 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าแบลงค์ให้เป็นศูนย์

4.4.5 สร้างกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายแอมิโลมาตรฐาน (แกน X) และค่าการดูดกลืนแสง (Y)

4.5 วิธีการคำนวณ

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



ภาพผนวกที่ ๑1 ปริมาณเอมิไลสและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเอมิไลสที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

5. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AOAC, 2000 วิธีครั้งที่ 923.03)

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

5.1.1 เตา muffle furnace

5.1.2 เตาไฟฟ้าให้ความร้อนแบบแผ่นราบ

5.1.3 เป้า (crucible)

5.1.4 เคชิกเคเตอร์

5.2 วิธีการวิเคราะห์

5.2.1 เเผาเป้าในเตา muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสจนกว่าได้เถ้าเป็นสีขาวหรือสีเทา

5.2.2 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในเป้าแล้วนำไปเผาด้วยไฟอ่อน ๆ จนหมดควัน

5.2.3 นำไปเผาในเตา muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสจนกว่าได้เถ้าเป็นสีขาวหรือสีเทา

5.2.4 นำเบ้าออกมาใส่ในเครื่องเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

5.3 วิธีการคำนวณ

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

เมื่อ W_0 หมายถึง น้ำหนักของเบ้า หน่วยเป็นกรัม

W_1 หมายถึง น้ำหนักของเบ้าและตัวอย่างก่อนเผา หน่วยเป็นกรัม

W_2 หมายถึง น้ำหนักของเบ้าและตัวอย่างหลังจากเผาจนได้น้ำหนักคงที่ หน่วยเป็นกรัม



ภาคผนวก ง

ตัวอย่างอ้างอิงและแบบทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส

ตารางผนวกที่ 1 แสดงตัวอย่างอ้างอิงที่ใช้ในการประเมินทางประสาทสัมผัสคุณลักษณะด้าน
เนื้อสัมผัสของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง

คุณลักษณะ	ตัวอย่างอ้างอิง	ระดับความเข้ม
1. ความแข็ง (hardness)	เต้าหู้อ่อน ตราเกษตร	0.5
	วุ้น ตรานางเงือก 1.0% ผสมน้ำหวานเข้มข้นกลิ่น สละ ตราเฮลตี้ บลูบอย 9%	1
	วุ้น ตรานางเงือก 1.5% ผสมน้ำหวานเข้มข้นกลิ่น สละ ตราเฮลตี้ บลูบอย 9%	4.5
	วุ้น ตรานางเงือก 3% ผสมน้ำหวานเข้มข้นกลิ่น สละ ตราเฮลตี้ บลูบอย 9%	6
	<hr/>	
	2. ความเหนียว (stickiness)	ถั่วเขียว ตราไร้ทิพย์ ต้มสุก (ถั่ว 170 กรัม แช่ในน้ำ นาน 30 นาที จากนั้นนำไปต้มในน้ำ 600 กรัมที่ อุณหภูมิ 90°C นาน 25 นาที) ข้าวเหนียว ตราดอกบัว หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า โดยใช้อัตราส่วนข้าว:น้ำ = 1:1

ที่มา: คัดแปลงจาก สิริกาญจน์ (2551)

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณ
(Quantitative Descriptive Analysis, QDA)

ผู้ทดสอบชิม..... วันที่.....

เพศ ชาย หญิง อายุ.....ปี

ผลิตภัณฑ์ ข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง

คำชี้แจง โปรดทำเครื่องหมายเส้นตรงและเขียนรหัสของแต่ละตัวอย่างบนเครื่องหมายเส้นตรงนั้น เพื่อแสดงตำแหน่งที่ท่านได้ให้แก่แต่ละตัวอย่างในด้านความแข็งและความเหนียวของผลิตภัณฑ์ตามที่ท่านคิดว่าเหมาะสมที่สุด สำหรับค่าความแข็งให้ท่านเคี้ยวตัวอย่างด้วยฟันกรามเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง 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 โดยคะแนนอ้างอิงด้านความแข็งและความเหนียวได้ให้ไว้บนเส้นตัวอย่างแล้ว โปรดทำการทดสอบตามลำดับตัวอย่างที่จัดเรียงไว้ให้จากซ้ายไปขวา

ความแข็ง



ความเหนียว



รหัสตัวอย่างที่ท่านชอบ (ด้านเนื้อสัมผัส) มากที่สุดคือ.....

คำแนะนำ.....

ขอบคุณค่ะ

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบ (9-point hedonic scale)

ชื่อผู้ทดสอบชิม.....วันที่.....

เพศ ชาย หญิง อายุ.....ปี

คำชี้แจง กรุณาทดสอบตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งตามลำดับที่นำเสนอจากซ้ายไปขวา และให้คะแนนความชอบของตัวอย่างด้านเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็งและความเหนียว กรุณาเขียนปากระหว่างตัวอย่าง

- | | | |
|---------------------|--------------------|------------------|
| 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



ตารางผนวกที่ จ1 ค่าความแข็ง (นิวตัน) ของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 โดยใช้วิธีวัดลักษณะเนื้อสัมผัสแบบกดและแบบเอกซ์ทูรชัน

วิธีการทดสอบ	ตัวอย่าง	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่		
			1	3	5
แบบกด	KDML 105	26.01±2.04 ^{a, A}	23.08±4.45 ^{ab, A}	34.04±2.11 ^{ab, B}	30.49±0.68 ^{a, AB}
	KDML 105 + 10% RD 6	20.99±0.32 ^{a, A}	18.88±1.31 ^{a, A}	31.06±0.85 ^{a, C}	25.75±2.13 ^{a, B}
เอกซ์ทูรชัน	KDML 105	51.14±5.79 ^{b, AB}	36.94±7.71 ^{b, A}	61.78±9.33 ^{b, B}	64.63±3.01 ^{b, B}
	KDML 105 + 10% RD 6	49.60±2.64 ^{b, AB}	36.02±8.04 ^{b, A}	59.41±17.90 ^{ab, AB}	65.50±1.15 ^{b, B}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ จ2 ค่าความเหนียว (นิวตัน) ของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบโดยใช้วิธีวัดลักษณะเนื้อสัมผัสแบบกดและแบบเอกซ์ทรูชัน

วิธีการทดสอบ	ตัวอย่าง	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่		
			1	3	5
แบบกด	KDML 105	6.52±0.49 ^{a, C}	8.09±0.32 ^{a, D}	2.14±0.65 ^{a, B}	0.54±0.02 ^{a, A}
	KDML 105 + 10% RD 6	6.71±0.49 ^{ab, C}	7.46±0.43 ^{a, C}	4.01±1.06 ^{ab, B}	1.06±0.22 ^{ab, A}
เอกซ์ทรูชัน	KDML 105	6.93±0.20 ^{ab, C}	6.40±0.65 ^{a, C}	4.01±1.06 ^{ab, B}	0.78±0.27 ^{a, A}
	KDML 105 + 10% RD 6	8.34±1.00 ^{b, B}	6.29±1.56 ^{a, B}	5.52±1.66 ^{b, AB}	2.26±0.96 ^{b, A}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ จ3 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งจำนวน 1, 3 และ 5 รอบ

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	ตัวอย่าง	ก่อนการแช่เยือกแข็ง	การคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่		
			1	3	5
ความแข็ง	KDML 105	4.35±0.21 ^{a,B}	2.00±0.14 ^{a,A}	3.55±0.64 ^{a,B}	5.80±0.14 ^{a,C}
	KDML 105 + 10% RD 6	2.70±0.42 ^{b,A}	3.05±0.64 ^{a,A}	3.55±0.49 ^{a,A}	5.25±0.07 ^{b,B}
ความเหนียว	KDML 105	5.05±0.92 ^{a,B}	5.55±0.64 ^{a,B}	2.40±0.14 ^{a,A}	0.90±0.14 ^{a,A}
	KDML 105 + 10% RD 6	6.20±0.71 ^{a,C}	4.60±1.56 ^{a,BC}	3.15±0.64 ^{a,AB}	1.55±0.35 ^{a,A}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอน หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ จ4 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1

คนที่	ความแข็ง (ซ้ำที่ 1 และ 2)										ความเหนียว (ซ้ำที่ 1 และ 2)									
	KDML 105		KDML 105 +		KDML 105 +		KDML 105 +		KDML 105 +		KDML 105		KDML 105 +		KDML 105 +		KDML 105 +		KDML 105 +	
	10%	RD 6	0.4% WRF	0.8% WRF	0.2% KGM	10%	RD 6	0.4% WRF	0.8% WRF	0.2% KGM	10%	RD 6	0.4% WRF	0.8% WRF	0.2% KGM	10%	RD 6	0.4% WRF	0.8% WRF	0.2% KGM
1	0.6	0.8	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.7	1.0	0.9	5.5	6.0	7.7	7.4	6.0	8.2	6.8	5.2	7.7	4.7
2	1.2	1.8	1.7	1.5	1.5	2.0	2.0	1.3	3.4	3.7	9.0	4.0	5.2	5.9	7.9	3.4	6.0	9.3	4.4	5.1
3	1.0	3.0	0.8	1.5	0.7	2.5	1.0	2.5	2.5	3.5	6.0	4.5	8.0	5.0	2.5	2.0	5.0	5.0	3.0	1.5
4	1.2	1.2	1.5	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4	1.5	1.5	9.7	6.1	9.7	6.4	9.9	3.0	9.9	6.1	1.5	3.0
5	2.2	1.9	1.8	1.3	1.9	2.4	1.5	1.7	2.4	1.5	7.8	6.2	7.4	6.5	6.3	5.2	5.5	5.8	4.5	7.0
6	1.2	1.1	1.5	1.3	1.9	1.4	1.1	1.2	2.0	1.6	9.2	8.5	9.5	8.3	8.6	7.8	8.9	8.0	8.4	7.4
7	4.0	4.8	4.1	3.8	4.9	4.8	4.8	4.2	4.9	4.8	11.2	10.9	11.2	11.9	10.1	11.7	10.9	9.7	9.8	10.0
8	2.9	4.5	1.2	4.4	1.4	4.7	1.2	4.8	5.0	5.0	4.8	3.9	5.7	3.1	6.8	2.9	4.5	5.8	2.4	3.6
9	0.8	1.1	0.9	0.5	0.2	0.4	1.2	1.9	2.6	2.4	4.6	4.4	7.0	7.2	5.3	3.0	7.0	2.3	2.1	8.0
10	0.8	0.6	0.2	0.4	0.4	0.8	0.6	0.2	1.1	1.2	3.3	4.5	6.1	5.0	5.1	6.0	6.1	3.5	2.3	1.5

ตารางผนวกที่ ๑5 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง
ที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3

คนที่	ความแข็ง (ซ้ำที่ 1 และ 2)										ความเหนียว (ซ้ำที่ 1 และ 2)									
	KDML 105		KDML 105 +		KDML 105 +		KDML 105 +		KDML 105 +		KDML 105		KDML 105 +		KDML 105 +		KDML 105 +		KDML 105 +	
	10%	RD 6	0.4% WRF	0.8% WRF	0.2% KGM	10%	RD 6	0.4% WRF	0.8% WRF	0.2% KGM	10%	RD 6	0.4% WRF	0.8% WRF	0.2% KGM	10%	RD 6	0.4% WRF	0.8% WRF	0.2% KGM
1	1.8	3.0	2.1	3.4	3.7	2.1	4.0	3.8	3.0	2.6	3.8	2.9	3.1	3.4	2.0	6.2	1.5	2.2	2.5	4.7
2	5.0	5.0	3.6	3.6	4.8	3.2	5.2	4.7	5.4	4.1	4.6	2.0	5.6	6.9	8.6	2.8	3.4	4.4	7.7	5.5
3	2.0	2.3	1.5	1.8	2.5	1.0	2.0	2.0	3.0	1.5	1.3	1.0	1.5	4.0	2.5	7.0	1.0	2.0	1.5	5.5
4	5.8	6.0	5.8	5.9	5.8	5.7	5.8	5.8	5.9	6.0	1.1	0.8	1.3	1.2	0.9	1.3	0.9	1.2	0.6	0.8
5	4.9	5.0	1.6	3.4	3.9	2.5	4.7	4.7	5.2	5.8	1.9	1.3	7.5	2.0	5.3	5.0	3.4	3.0	3.4	4.0
6	5.0	3.0	2.3	3.3	4.3	3.0	4.1	3.9	4.8	3.7	2.6	5.2	5.7	6.2	4.4	5.2	5.0	3.7	1.9	4.1
7	4.9	5.2	4.1	4.7	6.8	5.1	5.9	4.9	7.0	5.1	0.8	1.4	2.7	2.4	0.8	3.4	3.5	1.6	3.8	2.2
8	9.3	8.8	6.9	6.4	8.5	6.7	7.4	4.6	8.2	7.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	1.5	1.5	0.6	0.8	1.5
9	5.3	5.4	3.4	4.1	3.9	2.8	5.0	4.6	4.6	5.8	3.6	1.8	6.4	7.5	5.2	8.7	2.8	4.5	1.5	3.2
10	4.9	4.7	3.9	2.9	4.7	3.0	4.5	4.5	4.3	4.7	1.5	1.0	4.3	4.0	1.9	3.0	3.1	2.1	3.5	2.1

ตารางผนวกที่ ๑๖ การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็ง
ที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5

คนที่	ความแข็ง (ซ้ำที่ 1 และ 2)					ความเหนียว (ซ้ำที่ 1 และ 2)														
	KDML 105		KDML 105 + 10% RD 6		KDML 105 + 0.4% WRF		KDML 105 + 0.8% WRF		KDML 105 + 0.2% KGM		KDML 105		KDML 105 + 10% RD 6		KDML 105 + 0.4% WRF		KDML 105 + 0.8% WRF		KDML 105 + 0.2% KGM	
1	5.7	5.4	5.6	5.3	5.5	5.5	5.3	5.8	5.7	5.9	1.0	1.6	1.4	1.9	1.6	1.4	1.7	1.0	1.3	0.7
2	5.6	4.9	4.7	4.8	4.9	4.6	5.1	4.7	5.8	5.0	2.7	1.3	5.3	5.3	3.3	4.1	4.8	4.6	3.6	2.1
3	5.0	5.0	4.5	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5	5.0	5.0	1.0	1.6	2.6	2.5	1.7	1.5	2.5	1.0	2.0	0.3
4	6.7	6.8	7.0	6.8	6.7	7.1	6.8	6.9	7.0	6.9	1.2	0.5	1.2	0.9	1.2	0.7	1.2	0.7	0.6	0.9
5	5.2	5.0	5.1	5.2	4.8	5.4	4.6	4.8	4.9	5.6	1.5	1	2.5	1.5	1.5	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5
6	5.9	5.8	5.0	4.8	5.1	4.5	5.6	5.1	6.3	6.0	0.7	0.8	2.3	4.0	1.5	2.6	1.1	3.4	2.0	3.7
7	5.5	6.4	5.6	5.3	4.9	5.8	4.7	6.0	5.1	6.4	0.9	1.4	1.1	3.3	0.9	2.2	0.9	1.4	0.9	1.1
8	7.1	6.7	5.9	5.8	6.7	5.9	8.0	5.6	7.1	6.7	0.3	0.3	0.7	0.8	0.5	0.5	0.3	0.8	0.5	0.3
9	4.7	4.6	3.7	4.0	4.3	3.4	4.0	3.6	4.4	4.8	1.0	3.9	5.1	5.5	1.6	3.0	2.4	6.0	4.1	2.3
10	6.8	6.7	6.0	6.7	6.8	6.0	6.0	6.0	6.0	6.7	1.7	1.0	1.5	1.0	0.9	3.0	0.9	3.0	0.9	1.0

ตารางผนวกที่ ๗ การประเมินผลทางประสาทสัมผัสความชอบด้านความแข็งและความเหนียวของ
ตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1

บล็อก	ความแข็ง					ความเหนียว				
	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML
	105	105 + 10% RD 6	105 + 0.4% WRF	105 + 0.8% WRF	105 + 0.2% KGM	105	105 + 10% RD 6	105 + 0.4% WRF	105 + 0.8% WRF	105 + 0.2% KGM
1	6	4	6	8	7	6	4	6	7	6
2	5	1	5	6	8	5	1	6	5	7
3	3	6	7	6	3	5	6	7	5	5
4	7	7	6	3	2	8	6	7	4	4
5	6	6	5	6	6	6	5	5	5	5
6	6	8	4	7	2	6	7	6	7	3
7	6	6	7	8	7	7	7	7	8	7
8	7	8	7	4	8	8	6	7	7	2
9	4	3	4	6	7	4	3	6	6	7
10	8	6	7	6	4	7	3	5	6	4
11	7	7	8	7	9	7	7	8	7	9
12	8	9	9	9	9	9	9	9	9	8
13	8	6	6	7	8	8	4	4	6	6
14	7	6	4	8	5	7	6	4	8	5
15	5	7	4	4	6	5	6	3	4	6
16	8	8	8	5	4	7	8	6	6	5
17	8	9	9	8	8	8	9	9	8.5	8
18	5	4	5	3	2	8	6	7	4	5
19	7	7	7	6	6	7	6	6	5	6
20	7	4	8	5	4	6	3	7	7	3
21	8	5	4	7	7	8	4	2	4	6
22	5	6	5	6	7	5	5	6	7	7
23	6	7	7	6	7	8	7	8	7	8
24	6	9	8	7	7	6	8	8	7	7
25	7	5	5	6	5	6	2	5	5	3
26	8	5	6	4	7	9	7	8	5	9
27	7	7	5	6	4	7	5	6	6	5
28	6	7	6	6	6	6	5	6	7	5
29	6	6	7	5	8	7	4	7	4	8
30	8	7	7	7	8	7	7	7	7	8

ตารางผนวกที่ ๑๘ การประเมินผลทางประสาทสัมผัสความชอบด้านความแข็งและความเหนียวของ
ตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3

บล็อก	ความแข็ง					ความเหนียว				
	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML
	105	105 + 10% RD 6	105 + 0.4% WRF	105 + 0.8% WRF	105 + 0.2% KGM	105	105 + 10% RD 6	105 + 0.4% WRF	105 + 0.8% WRF	105 + 0.2% KGM
1	4	4	5	4	1	5	4	5	4	1
2	4	6	4	6	2	2	6	2	5	2
3	4	2	2	4	1	3	3	3	3	2
4	5	5	3	2	2	5	4	3	2	3
5	2	5	1	3	3	1	5	1	2	1
6	4	3	3	3	6	4	3	3	3	6
7	2	5	2	4	5	4	5	4	5	6
8	4	2	2	4	2	6	4	4	6	4
9	6	3	2	4	1	6	4	4	4	4
10	3	2	4	4	2	3	2	4	4	2
11	4	3	4	7	3	6	4	4	8	3
12	5	6	7	7	4	7	6	7	7	4
13	4	4	3	5	4	6	6	6	6	5
14	2	3	7	4	1	2	3	6	6	1
15	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
17	3	2	1	3	5	6	5	4	5	4
18	3	4	3	4	4	3	4	3	4	4
19	4	4	6	7	6	5	6	6	6	7
20	2	3	3	3	5	2	4	3	4	4
21	3	5	5	4	5	3	6	4	4	5
22	1	2	2	2	3	1	1	2	2	4
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
24	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2
25	4	4	3.5	4	7	4	4	4	4	6
26	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4
27	5	4	4	7	6	4	4	4	7	6
28	1	2	1	3	1	4	4	3	4	4
29	2	1	3	4	1	2	1	3	4	1
30	2	3	3	3	5	2	4	3	4	4

ตารางผนวกที่ ๑๑ การประเมินผลทางประสาทสัมผัสความชอบด้านความแข็งและความเหนียวของ
ตัวอย่างข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งที่ผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5

บล็อก	ความแข็ง					ความเหนียว				
	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML	KDML
	105	105 + 10% RD 6	105 + 0.4% WRF	105 + 0.8% WRF	105 + 0.2% KGM	105	105 + 10% RD 6	105 + 0.4% WRF	105 + 0.8% WRF	105 + 0.2% KGM
1	3	3	2	3	3	2	2	2	2	2
2	3	2	1	2	2	3	2	1	2	2
3	2	1	1	3	1	1	1	2	1	1
4	2	2	2	3	1	3	2	3	3	2
5	4	2	3	2	1	4	2	3	3	2
6	6	5	6	8	4	6	5	8	7	4
7	2	3	1	2	2	2	3	2	2	2
8	4	1	2	2	3	4	4	4	4	4
9	1	1	2	1	2	1	1	2	1	2
10	3	4	5	3	5	6	1	1	2	5
11	2	2	2	2	3	5	5	5	5	5
12	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1
13	4	6	5	6	4	5	6	5	3	3
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	2	2	2	7	1	3	2	2	4	2
16	2	3	3	5	1	3	2	2	4	2
17	3	2	5	6	2	3	5	3	6	2
18	3	2	2	1	3	4	4	3	1	4
19	3	5	1	6	3	3	3	1	4	3
20	4	2	2	3	3	4	3	3	4	4
21	2	1	1	3	2	2	2	2	2	2
22	2	3	3	4	4	1	1	2	5	4
23	3	2	1	6	4	3	3	2	4	3
24	4	3	3	5	4	3	3	3	4	4
25	2	3	3	2	2	1	1	1	1	1
26	3	4	3	4	6	3	6	3	6	6
27	3	2	3	3	3	2	1	2	3	2
28	2	2	1	4	2	2	2	1	4	3
29	4	6	5	6	3	2	6	6	4	2
30	4	3	3	3	1	4	4	4	3	3

ตารางผนวกที่ 10 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคั้นรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1

คนที่	KDML 105						KDML 105 + 0.8% WRF																	
	ความแข็ง (ซ้ำที่ 1 และ 2)			ความเหนียว (ซ้ำที่ 1 และ 2)			ความแข็ง (ซ้ำที่ 1 และ 2)			ความเหนียว (ซ้ำที่ 1 และ 2)														
	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว												
1	9.8	4.1	0.9	1.0	0.9	0.8	1.6	2.2	4.2	3.8	4.6	5.3	9.0	4.0	0.8	1.0	1.0	0.8	2.2	2.5	2.9	5.0	4.6	5.3
2	2.8	5.9	4.6	5.1	4.4	4.7	0.7	1.3	4.2	2.3	6.0	3.9	2.5	5.0	4.5	5.1	4.1	4.7	0.7	3.0	3.2	1.3	6.7	3.3
3	6.4	5.9	4.0	5.6	3.5	4.8	3.6	5.4	4.4	6.0	7.1	6.3	5.6	5.9	3.6	5.4	4.5	4.8	4.6	6.0	6.8	6.8	7.1	7.1
4	2.6	3.2	2.2	1.3	1.8	2.0	5.2	4.9	6.8	7.2	8.4	6.8	3.0	3.0	1.1	2.3	1.9	0.9	4.9	4.5	8.7	6.4	7.3	7.6
5	4.0	4.0	2.5	2.5	2.0	2.0	1.0	1.5	4.0	2.0	3.5	3.5	3.5	3.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.5	3.5	5.0	4.5	3.5
6	4.8	4.6	4.0	5.2	4.4	4.1	0.8	1.0	9.2	2.2	9.4	9.1	4.9	4.6	4.3	5.0	4.1	4.0	2.9	1.2	9.0	9.5	9.7	9.8
7	5.2	4.9	4.1	3.7	3.9	3.5	2.8	2.7	7.3	8.5	7.9	7.5	4.6	4.6	3.7	4.1	3.5	3.2	6.3	4.0	8.4	6.7	9.1	9.4
8	4.3	4.0	3.2	3.0	3.0	2.2	1.7	1.5	2.8	6.8	4.3	3.9	3.5	2.4	3.8	2.7	2.6	2.0	4.6	3.0	4.8	7.5	5.3	4.5

ตารางผนวกที่ ๑11 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 3

คนที่	KDML 105						KDML 105 + 0.8% WRF					
	ความแข็ง (ซ้ำที่ 1 และ 2)			ความเหนียว (ซ้ำที่ 1 และ 2)			ความแข็ง (ซ้ำที่ 1 และ 2)			ความเหนียว (ซ้ำที่ 1 และ 2)		
	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว
1	4.8 4.4	4.9 4.9	4.9 4.9	0.9 0.9	0.9 1.1	2.3 0.9	4.8 4.4	4.0 3.9	3.9 4.4	0.9 1.1	2.8 1.4	2.8 3.3
2	9.2 9.0	6.4 9.4	7.5 10.9	0.4 0.6	1.8 0.7	0.6 0.6	7.8 9.6	6.2 10.5	6.1 8.8	0.6 0.5	1.4 0.8	1.1 0.6
3	5.4 5.8	8.1 7.4	5.4 7.1	2.6 2.0	3.5 2.5	4.6 2.1	5.5 5.8	5.2 5.6	5.4 6.4	4.3 2.1	3.0 4.3	4.3 3.4
4	5.6 6.6	5.2 5.8	4.4 5.4	1.5 1.5	1.8 1.1	3.1 2.4	5.6 5.6	5.2 4.6	4.3 4.8	1.2 1.8	2.2 3.8	3.4 4.2
5	4.0 6.0	5.0 5.0	3.5 5.0	6.0 0.5	2.0 2.0	5.0 3.0	6.0 5.5	3.5 4.0	3.0 4.8	1.5 3.5	7.0 3.3	4.5 5.0
6	5.5 2.4	4.6 2.0	5.3 2.0	1.3 2.3	3.0 1.0	4.0 1.9	5.6 2.2	4.7 1.6	4.4 1.9	2.3 4.8	7.2 7.4	6.1 8.5
7	7.4 14.7	6.8 2.7	4.6 2.5	1.0 0.9	1.5 1.7	2.6 2.2	6.4 3.0	5.6 5.2	6.7 5.2	1.0 2.2	1.0 3.3	2.6 3.3
8	6.7 5.3	5.2 5.3	5.2 5.0	1.0 1.7	1.0 1.2	0.7 2.1	5.2 4.8	4.6 4.6	4.5 5.0	0.7 2.8	2.1 2.8	2.1 3.2
9	5.3 4.4	4.8 5.8	4.0 3.8	0.9 4.2	3.2 3.3	1.3 4.6	5.8 5.0	5.0 5.6	3.8 3.5	3.9 2.5	2.1 6.3	6.0 3.8

ตารางผนวกที่ ๑12 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสแบบพรรณนาเชิงปริมาณด้านความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่เยือกแข็งด้วย
อัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 5

คนที่	KDML 105									KDML 105 + 0.8% WRF								
	ความแข็ง (ซ้ำที่ 1 และ 2)			ความเหนียว (ซ้ำที่ 1 และ 2)			ความแข็ง (ซ้ำที่ 1 และ 2)			ความเหนียว (ซ้ำที่ 1 และ 2)								
	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว	ซ้ำ	ปานกลาง	เร็ว						
1	5.5 5.8	4.7 5.4	4.7 5.4	0.7 0.2	1.0 0.5	0.8 0.2	5.5 5.0	4.6 4.9	4.8 4.8	0.3 0.8	1.0 0.9	0.8 0.8						
2	7.0 10.8	8.5 10.1	8.5 10.3	0.5 0.5	0.5 0.7	0.5 0.5	9.3 10.1	8.1 10.0	4.7 10.0	0.5 0.8	0.5 0.8	0.8 0.5						
3	5.3 5.6	5.2 5.4	5.6 6.3	0.8 2.3	1.1 2.5	1.5 2.3	6.2 6.8	6.5 6.5	5.5 5.8	1.5 2.4	1.1 2.9	1.7 2.9						
4	10.6 7.4	10.6 9.0	10.6 9.6	0.7 2.1	1.5 0.7	1.1 0.9	8.5 8.0	7.6 7.7	6.5 6.7	1.8 1.1	1.9 1.5	1.8 1.8						
5	4.3 4.0	4.5 4.8	3.0 5.0	1.0 0.5	1.3 0.8	0.8 1.0	4.0 4.5	1.5 4.0	2.0 3.8	2.0 1.0	2.2 1.5	3.0 1.0						
6	5.3 5.4	1.8 4.8	5.7 2.2	2.2 1.8	2.9 4.0	4.4 2.7	4.6 5.4	3.0 5.7	1.3 1.5	4.1 2.2	3.4 5.2	4.7 4.6						
7	5.3 5.7	5.2 5.9	5.1 5.4	1.1 0.6	1.5 0.9	1.1 0.8	5.8 5.1	5.1 4.9	5.0 5.8	2.2 1.3	1.8 2.6	2.6 1.5						
8	7.6 7.4	6.4 6.3	7.6 7.4	0.8 1.0	0.8 1.0	0.8 1.0	6.4 6.8	6.2 7.4	6.4 7.4	1.1 1.0	1.1 1.0	1.1 1.0						
9	6.9 7.6	6.5 6.8	7.9 8.7	4.0 4.1	2.3 2.6	6.9 6.3	6.2 6.3	3.9 3.6	7.6 8.3	3.2 5.5	3.2 3.5	3.2 7.4						
10	5.7 5.0	5.6 5.2	5.9 5.8	0.8 1.8	1.4 0.7	0.5 0.4	5.8 5.7	5.3 5.6	5.7 5.6	1.0 0.5	2.2 0.9	0.6 0.5						

ตารางผนวกที่ 13 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่
 เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง
 รอบที่ 1

บล็อก	KDML 105						KDML 105 + 0.8% WRF					
	ความแข็ง			ความเหนียว			ความแข็ง			ความเหนียว		
	ช้า	ปานกลาง	เร็ว	ช้า	ปานกลาง	เร็ว	ช้า	ปานกลาง	เร็ว	ช้า	ปานกลาง	เร็ว
1	4	6	8	5	5	6	4	3	8	5	8	7
2	4	8	8	7	7	6	4	6	8	5	6	7
3	2	5	8	4	3	8	5	7	7	5	4	6
4	1	6	5	1	7	4	4	6	5	3	3	6
5	2	8	6	2	7	6	4	5	7	5	7	6
6	6	6	8	5	7	7	4	8	7	4	7	8
7	3	8	8	3	7	7	4	8	8	4	6	8
8	3	4	8	3	6	8	4	7	7	7	8	8
9	6	5	5	5	6	6	7	5	6	6	7	7
10	4	6	5	3	6	5	6	7	6	7	6	7
11	1	5	7	1	5	7	2	5	8	2	8	8
12	3	8	5	6	8	7	2	6	4	1	7	7
13	3	7	7	3	7	6	4	6	6	3	6	7
14	3	5	6	3	5	6	4	9	7	4	9	8
15	3	8	5	5	6	4	2	8	8	2	5	7
16	5	7	7	5	6	7	4	6	4	5	4	6
17	2	7	5	3	6	6	1	7	7	1	7	8
18	3	5	5	2	3	6	4	5	6	4	7	4
19	2	9	9	2	9	9	3	9	9	3	9	9
20	3	7	6	3	6	6	3	6	6	4	3	4
21	7	8	7	7	8	7	2	7	7	2	7	8
22	4	7	7	4	6	7	3	6	6	3	6	6
23	1	8	7	6	8	7	1	3	9	2	6	4
24	2	8	7	2	6	8	3	8	4	3	7	8
25	3	6	7	5	6	7	6	6	6	6	6	4
26	5	7	7	4	6	6	3	5	6	3	6	6
27	2	4	4	4	5	7	2	7	7	4	7	6
28	4	7	6	4	7	4	3	6	6	3	4	7
29	1	6	4	1	4	5	1	8	7	2	8	8
30	2	7	6	3	8	8	1	4	9	1	9	7

ตารางผนวกที่ 14 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่
 เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง
 รอบที่ 3

บล็อก	KDML 105						KDML 105 + 0.8% WRF					
	ความแข็ง			ความเหนียว			ความแข็ง			ความเหนียว		
	ช้า	ปานกลาง	เร็ว	ช้า	ปานกลาง	เร็ว	ช้า	ปานกลาง	เร็ว	ช้า	ปานกลาง	เร็ว
1	2	6	4	3	3	4	4	6	4	4	6	3
2	3	3	5	4	3	7	3	6	7	3	7	7
3	8	5	6	6	6	8	7	7	6	4	7	5
4	7	5	4	7	5	4	5	6	6	6	5	6
5	5	6	4	4	7	3	4	3	2	2	4	3
6	6	3	7	5	5	6	2	4	5	4	3	5
7	5	4	5	2	4	3	4	6	7	2	6	7
8	2	4	6	2	4	4	1	5	4	1	5	3
9	2	3	4	2	3	4	1	3	2	1	3	2
10	4	6	6	4	6	6	4	4	6	4	4	6
11	5	3	7	5	5	6	5	4	6	4	6	4
12	4	5	5	2	5	3	4	6	5	2	6	3
13	1	2	2	4	4	4	1	1	3	4	4	4
14	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1
15	1	1	3	1	1	3	3	2	4	3	2	5
16	4	3	9	5	7	6	6	8	7	4	9	8
17	1	2	4	1	2	6	3	5	2	6	5	4
18	3	4	4	3	4	4	4	6	8	4	6	8
19	5	6	7	5	7	7	7	7	7	8	6	5
20	1	4	6	2	4	6	3	6	4	3	5	6
21	2	1	3	1	2	4	2	2	2	1	2	3
22	6	1	3	6	4	4	2	6	7	4	7	7
23	1	2	2	2	2	2	2	2	6	3	2	4
24	1	2	3	1	4	5	1	1	5	1	1	5
25	3	3	5	3	4	6	3	6	7	5	6	7
26	4	4	2	2	2	2	3	5	9	4	4	9
27	6	5	7	5	6	6	5	6	5	4	7	4
28	2	2	3	2	2	3	4	3	3	4	3	4
29	2	4	4	2	4	6	2	6	3	4	4	4
30	2	1	3	2	3	4	1	1	2	2	2	4

ตารางผนวกที่ 15 การประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านความชอบของตัวอย่างข้าวหุงสุกที่แช่
 เยือกแข็งด้วยอัตราในการแช่เยือกแข็งต่างกันและผ่านการคืนรูปจากเยือกแข็ง
 รอบที่ 5

บล็อก	KDML 105						KDML 105 + 0.8% WRF					
	ความแข็ง			ความเหนียว			ความแข็ง			ความเหนียว		
	ช้า	ปานกลาง	เร็ว	ช้า	ปานกลาง	เร็ว	ช้า	ปานกลาง	เร็ว	ช้า	ปานกลาง	เร็ว
1	2	2	4	2	3	2	2	3	2	1	3	3
2	6	5	7	1	2	2	6	7	8	1	1	2
3	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1
4	1	3	2	2	3	1	2	2	1	2	2	2
5	3	3	2	2	3	1	2	2	1	3	2	2
6	6	5	4	6	5	5	7	4	6	6	5	4
7	2	2	3	3	4	4	4	3	3	2	3	2
8	3	3	4	3	3	2	3	6	2	3	6	4
9	2	4	6	4	5	5	4	5	5	5	5	5
10	2	2	2	4	2	6	4	3	2	2	2	2
11	2	2	2	1	1	1	1	1	4	1	1	1
12	1	2	2	3	2	2	3	2	2	1	2	2
13	3	3	3	3	3	4	3	3	4	3	3	3
14	1	1	2	2	1	3	1	2	2	4	3	3
15	3	1	2	3	2	3	3	1	5	3	2	2
16	7	4	3	6	5	4	5	7	6	4	7	5
17	4	9	5	6	9	4	8	7	6	8	5	7
18	4	4	3	2	4	4	3	4	4	4	4	3
19	2	1	2	2	1	2	2	2	3	1	2	2
20	2	2	3	2	2	4	1	3	4	2	3	3
21	3	3	2	1	2	1	1	2	1	2	1	1
22	2	6	7	3	3	2	4	7	5	3	4	6
23	2	1	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1
24	2	3	2	2	4	3	2	2	2	3	3	2
25	2	4	2	5	5	5	2	2	2	5	5	5
26	3	2	4	2	2	4	3	4	6	3	4	3
27	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2
28	2	3	1	2	3	3	4	1	2	3	4	5
29	2	3	4	1	3	3	1	2	3	2	2	4
30	2	2	5	1	4	5	1	3	4	2	3	6

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวพรพิสาข์ ประเสริฐไทยเจริญ
เกิดวันที่	21 เมษายน 2530
สถานที่เกิด	อุบลราชธานี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีอาหาร) มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผลงานทางวิชาการ	<p>1. พรพิสาข์ ประเสริฐไทยเจริญ และสงวนศรี เจริญเหรียญ. 2553. ผลของอุณหภูมิต่อการพองตัว ลักษณะของเม็ดสตาร์ช และสมบัติความหนืดของแป้งข้าวสองชนิด. ใน รายงานการประชุมวิชาการข้าวแห่งชาติ “ขับเคลื่อนงานวิจัยข้าวสู่นวัตกรรม” ครั้งที่ ๑๖ มฤค (สาขาผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่าข้าว (กระบวนการแปรรูป)), 15-17 ธันวาคม 2553, กรุงเทพฯ. (นำเสนอผลงานแบบปากเปล่า)</p> <p>2. Prasertthaijaroen, P. and S. Charoenrein. 2011. Correlation between instrumental parameters of texture and sensory evaluation of frozen cooked rice. The 11st IFT Annual Meeting & Food Expo, June 11-14, 2011, Louisiana, USA. (Poster presentation)</p> <p>3. Prasertthaijaroen, P. and S. Charoenrein. 2011. Improving the Texture of Frozen Cooked Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) cv. Khao Dawk Mali 105. The 6th International Conference on Starch Technology, February 13-14, 2012, Bangkok, Thailand. (Oral presentation)</p>
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	<p>1. ทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2554 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้โครงการวิจัย “การปรับปรุงคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุกแช่เยือกแข็ง”</p> <p>2. ทุนผู้ช่วยสอนจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2553)</p>
ประสบการณ์งานวิจัย	ผู้ช่วยวิจัยโครงการ “ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งของไทย” ทุนอุดหนุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (สวพ. มก.) (พ.ศ. 2554)