



รายงานการวิจัย

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวในระหว่างการเก็บรักษาและการเร่ง/ชะลออายุข้าว
(Quality Changes during Rice Storage and Age Accelerating/Delaying)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวในระหว่างการเก็บรักษาและการเร่ง/ชะลออายุข้าว
(Quality Changes during Rice Storage and Age Accelerating/Delaying)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ผู้ร่วมวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550-2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2554

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้งบประมาณทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2550-2552 ทำให้ผลงานวิจัยโครงการนี้เกิดขึ้นได้ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าว อุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี และศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้าว เพื่อใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับอาคาร สถานที่ และเครื่องมือในการวิจัย และงานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จหากขาดผู้ช่วยวิจัยเหล่านี้ คือนางสาวนราพร ดาลัย และนางสาวทานตะวัน วัฒนอมพลกรัง จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย



บทคัดย่อ

การเก็บรักษาข้าวสารพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 เดือน พบว่า ข้าวสารทั้งสามพันธุ์มีค่าความชื้นลดลง ค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น และเวลาในการหุงต้มเพิ่มขึ้น แต่อัตราการดูดซับน้ำมีค่าลดลง อัตราการขยายปริมาตรของข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนของข้าวเหนียวมีค่าลดลง ปริมาณยางข้าวมีค่าลดลง เนื้อสัมผัสของข้าวสุกทุกพันธุ์มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของแป้งสาร์ชกับแป้งฟลาวัวร์ พบว่า แป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา มีค่าอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยน (pasting temperature, PT) เพิ่มขึ้น เบรกดาว์น (breakdown, BD) มีค่าลดลง ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity, PV) ค่าการคืนตัว (setback, SB) ของข้าวที่ผ่านการเก็บมีค่าเปลี่ยนแปลงจากของข้าวใหม่ ค่ากำลังการพองตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการละลายมีแนวโน้มลดลง ขณะที่สมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ในแป้งสาร์ชไม่แตกต่างกันตลอดการเก็บ นอกจากนี้ปริมาณหมู่ซัลไฟดริลของโปรตีนมีค่าลดลง และเกิดการรวมตัวกันของโปรตีนด้วยอันตริกรียาไฮโดรโฟบิก ทำให้โปรตีนมีขนาดใหญ่ขึ้นหลังเก็บรักษา ส่วนอุณหภูมิในการเกิดเจลาติเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o) ของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวเก่ามีค่ามากกว่าของข้าวใหม่

การเก็บรักษาข้าวเป็นระยะเวลา 1-4 ปี ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าค่าความชื้นลดลง ค่าสีเหลืองมากขึ้น ใช้เวลาในการหุงต้มนานขึ้น ข้าวสุกของข้าวสุพรรณบุรี 90 มีอัตราการดูดซับน้ำและอัตราการขยายปริมาตรมีค่ามากขึ้น ส่วนข้าวข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 มีอัตราการดูดซับน้ำและอัตราการขยายปริมาตรมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื้อสัมผัสของข้าวสุกทางด้านความแข็งของข้าวทั้งสามพันธุ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ความเหนียวของข้าวเหนียว กข 6 มีค่าลดลง แต่ความเหนียวของข้าวเจ้าไม่เปลี่ยนแปลง สมบัติทางการเกิดเพสท์ของแป้ง ฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาทั้งสามพันธุ์ พบว่า PT มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน BD, PV และ SB มีค่าลดลง ขณะที่แป้งสาร์ชมีค่า PT, BD, PV และ SB ไม่เปลี่ยนแปลง

การเร่งอายุการเก็บรักษาข้าวสารเต็มเมล็ดทำด้วยวิธี heat moisture treatment (HMT) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความชื้น 12% เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง ทำให้ข้าวใช้เวลาในการหุงต้ม อัตราการขยายปริมาตร อัตราการดูดซับน้ำ ค่าความแข็ง ค่าความเหนียวเปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกับข้าวเก่า ส่วนการเร่งอายุการเก็บรักษาข้าวเพื่อผลิตแป้งข้าว ทำด้วยวิธี annealing ที่อุณหภูมิ 53 องศาเซลเซียส ความชื้น 70% เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง และด้วยวิธี HMT ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความชื้น 12% และ 30% เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง พบว่า ค่า PT ของแป้งฟลาวัวร์ทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการ annealing และ HMT มีค่ามากกว่าข้าวใหม่ ค่า BD มีค่าน้อยกว่า ส่วนค่า

SB มีการเปลี่ยนแปลงทั้งมากกว่าและน้อยกว่า ข้าวเจ้าทั้งสองพันธุ์เมื่อผ่านการ HMT ที่ความชื้น 30% มีค่ากำลังการพองตัวของแป้งฟลาวร์มากกว่าข้าวใหม่ ค่าความสามารถในการละลาย และปริมาณอะไมโลสที่ถูกชะมีค่าน้อยกว่า ค่า T_0 และปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของแป้งฟลาวร์ทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการ annealing และ HMT มีค่ามากกว่าของข้าวใหม่

ข้าวสารที่เก็บไว้ที่เก็บที่ -18 องศาเซลเซียส มีสมบัติกายภาพและเคมีกายภาพต่างๆไม่แตกต่างจากของข้าวใหม่ ส่วนการเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ทำให้ข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียว กข6 มีค่า PV เพิ่มขึ้น และ ค่า SB ของข้าวขาวดอกมะลิ105 และสุพรรณบุรี90 มีค่าเพิ่มขึ้น แต่สมบัติอื่น ๆ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงจากข้าวใหม่



Abstract

The storage of milled rice, Suphanburi 90 (SP90), Khaodokmali 105 (KDML105) and RD6 waxy rice at a storage temperature of 35°C for 12 months was investigated. After storage, the moisture content of milled rice was decreased. The yellowness and the cooking time were increased but the water uptake was reduced. The expansion volume of non-waxy aged rice was higher but it was decreased for waxy rice. The glue content of cooked aged rice was lower. The hardness of cooked rice from all cultivars was higher while the stickiness was lower. The flour and starch of rice during storage were investigated. It was found that the pasting temperature (PT) of rice flours was increased but the breakdown (BD) was decreased. The peak viscosity (PV) and setback (SB) showed a significant change from those of the fresh rice. The swelling power of aged rice flours was slightly higher but the degree of solubility was lower. However, the properties of the starches from all cultivars did not change from those of the fresh ones. The sulfhydryl group content was decreased during the storage time. In addition, the aggregation of proteins occurred via hydrophobic interaction and disulfide bonds, leading to a higher molecular size of proteins. The onset gelatinization temperature (T_o) of aged rice flours storage was higher than that of fresh rice flours.

The storage of milled rice at the room temperatures for 1-4 years was studied. A decrease in moisture content, higher yellowness and longer cooking time were found. The water uptake and the expansion volume of SP 90 were higher but those of KDML105 and RD6 did not alter. The hardness of cooked rice from all cultivars showed a tendency of harder. The stickiness of RD6 was lower but that of KDML105

and SP90 did not alter. The PT of rice flours was increased but BD, PV and SB was decreased. However, the PT, BD, PV and SB of all of the starches did not change.

The ageing acceleration of milled rice was conducted by heat moisture treatment (HMT) at 90°C with 12% moisture content for 0.5 and 1.0 hour. The cooking time, the water uptake, the expansion volume, the hardness and stickiness of cooked rice with ageing acceleration were similar to those of aged rice. The ageing acceleration of rice for flour preparation was treated by annealing at 53°C with 70% water content for 12 and 24 hours and HMT at 90°C with 12% and 30% water content for 0.5 and 1.0 hour. The PT of accelerated aged rice flours from all treatments was higher than that of the fresh rice flours but the BD was lower. The SB was higher or lower. The swelling power of accelerated aged non-waxy rice flours with HMT at 30% water content was higher than that of the fresh rice. The degree of solubility and amylose leaching of the flours were lower. Accelerated aging by all treatments for all cultivars resulted in higher T_0 and higher starch digestibility with α -amylase as compared to the fresh rice.

The milled rice stored at -18°C showed that the physical and physico-chemical properties were not different from those of the fresh rice. An increase in PV of KDML105 and RD6 was observed at the 10°C storage. In addition, the higher SB of SPR90 and KDML105 was noticed but the other physical and chemical properties did not change from those of the fresh rice.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ง
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	4
3. วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	16
1. การเตรียมตัวอย่าง.....	16
1.1 การศึกษาผลของการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและ กายภาพของข้าว.....	16
1.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะโปรตีนหลังการเก็บรักษา.....	17
1.2.1 การสกัดโปรตีนในตัวอย่างแป้งข้าว.....	17
1.2.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโปรตีนในข้าวสุก.....	17
1.2.1 การสกัดโปรตีนจากตัวอย่างเจลดข้าวสุก.....	18
1.3 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวในระหว่างการเก็บรักษาระยะยาว.....	19
1.4 การศึกษาผลการใช้ความร้อนขึ้น (Hydrothermal treatment) ในการเร่งอายุการเก็บ	19
1.4.1 การเร่งอายุการเก็บด้วยการใช้ความร้อนขึ้น แบบ heat moisture treatments (HMT) เพื่อการผลิตข้าวสารเก่า.....	19
1.4.2 การเร่งอายุการเก็บด้วยการใช้ความร้อนขึ้น แบบ HMT เพื่อการผลิตแป้ง.....	19
1.4.3 การเร่งอายุการเก็บด้วยการใช้ความร้อนขึ้นแบบ annealing เพื่อผลิตแป้ง.....	20
1.5 การชะลออายุการเก็บ.....	20

สารบัญ (ต่อ)

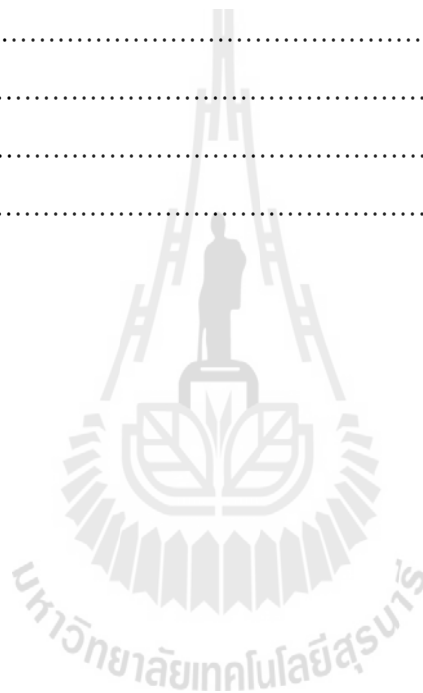
	หน้า
2. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ.....	21
2.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น.....	21
2.2 การวิเคราะห์ค่าสีเหลือง (b*).....	21
2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางการหุงต้ม	21
2.4 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของข้าวสุก.....	22
2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบในยางข้าว.....	22
2.6 การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสที่ถูกละ.....	22
2.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเพสท์.....	23
2.8 การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายและกำลังการพองตัว.....	23
2.9 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์.....	24
2.10 การวิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส	24
2.11 การเกิดเจลลิตีในเซชัน.....	24
2.12 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึก.....	25
2.13 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่ผิวไฮโดรโฟบิกของโปรตีน.....	25
2.14 การวิเคราะห์ปริมาณหมู่ซัลไฮดริลอิสระ.....	26
2.15 การวิเคราะห์ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล และหมู่ไธอไซลไฟด์	27
(Total SH + SS).....	
2.16 การวิเคราะห์โปรตีนด้วยเทคนิค SDS-AGE	28
3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	28
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล...	
1. ผลของการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าว	
1.1 ความชื้นของเมล็ดข้าวสาร.....	29
1.2 ค่าสีเหลือง (b*) ของข้าวสาร.....	30
1.3 สมบัติทางการหุงต้มของข้าวสุก.....	31
1.4 องค์ประกอบของยางข้าวสุก.....	34
1.5 เนื้อสัมผัสของข้าวสุก.....	36
1.6 สมบัติการเกิดเพสท์.....	38
1.7 ปริมาณหมู่ซัลไฮดริลอิสระ.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.8 กำลังการพองตัว ความสามารถในการละลายและอะมิโลส ที่ถูกชะ.....	43
1.9 สมบัติการเกิดเจลลาคีในเซชัน.....	46
1.10 ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส.....	47
1.11 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา.....	47
1.12 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึก.....	49
2. การเปลี่ยนแปลงลักษณะโปรตีนข้าวหลังการเก็บรักษา	
2.1 ขนาดโมเลกุลโปรตีนในฟลาร์ข้าวด้วยอิเล็กโตรโฟรีซิส (SDS-PAGE)	49
2.2 โปรตีนที่สกัดได้จากตัวอย่างเจดข้าวสุก.....	
2.3 ขนาดโมเลกุลของโปรตีนในตัวอย่างข้าวสุกด้วยอิเล็กโตรโฟรีซิส	63
2.4 ค่าพื้นผิวความเป็นไฮโดรโฟบิก (Surface hydrophobicity).....	63
2.5 ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล (-SH) และไดซัลไฟด์ (-SS-) ของโปรตีนจาก ฟลาร์และข้าวสุก.....	66
3. ผลการเก็บรักษาระยะยาวต่อสมบัติทางการหุงต้ม เนื้อสัมผัสและการเกิดเพสท์ของข้าว.....	
3.1 ความชื้น.....	67
3.2 ค่าสีเหลือง.....	68
3.3 สมบัติทางการหุงต้ม.....	69
3.4 สมบัติทางเนื้อสัมผัส.....	71
3.5 สมบัติการเกิดเพสท์.....	72
4. ผลของการใช้ความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวและแป้งข้าว	
4.1 การเร่งอายุข้าวสารเต็มเมล็ด.....	75
4.1.1 สมบัติทางการหุงต้ม.....	77
4.1.2 เนื้อสัมผัสของข้าวสุก.....	77
4.2 การเร่งข้าวหักให้เป็นข้าวเก่าเพื่อใช้ในการผลิตแป้ง.....	79
4.2.1 ค่าสีเหลืองของข้าว.....	79
4.2.2 สมบัติการเกิดเพสท์.....	80
4.2.3 กำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย และปริมาณ อะมิโลสที่ถูกชะ.....	85

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 สมบัติการเกิดเจลาตินในเซชัน.....	89
4.2.5 ปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส....	92
4.2.6 ปริมาณผลึก.....	92
5. การชะลออายุการเก็บ	
1.2 ผลของอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส.....	94
1.3 ผลของอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส.....	98
บทที่ 4 บทสรุป.....	100
บรรณานุกรม.....	103
ภาคผนวก.....	114
ประวัติผู้วิจัย.....	117



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	อุณหภูมิของการเกิดเจลาตินในเซชัน (T_0) และช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาตินในเซชัน ($T_c - T_0$) ของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา	46
2	แสดงปริมาณ โปรตีนที่สกัดจากตัวอย่างฟลาวัวร์ข้าวด้วยตัวทำละลายที่ต่างกัน..	51
3	แสดงปริมาณ โปรตีนที่สกัดได้จากเจลาตินข้าวสุกที่ได้จากข้าวใหม่และข้าวเก่า.....	63
4	แสดงค่าพื้นผิวความเป็นไฮโดรโฟบิกของตัวอย่าง โปรตีนที่สกัดจากข้าวสุก...	66
5	ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล และไดซัลไฟด์ของ โปรตีนจากฟลาวัวร์และตัวอย่างข้าวสุก	67
6	เวลาในการหุงต้ม (นาท) อัตราการดูดซับน้ำ อัตราการขยายปริมาตรของข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT.....	76
7	ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวสุกจากข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT.....	78
8	ค่าสีเหลือง (b^*) ของข้าวสารเต็มเมล็ดที่ผ่านการเก็บรักษาและข้าวหักที่ผ่านการ annealing และ HMT.....	80
9	ค่าอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยน ค่าเบรกควาน์ และค่าการคืนตัวของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT.....	84
10	ค่าอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยน ค่าเบรกควาน์ และค่าการคืนตัวของแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT.....	87
11	กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT.....	88
12	ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT.....	89
13	อุณหภูมิในการเริ่มเกิดเจลาตินในเซชัน และช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชัน ของแป้งฟลาวัวร์ข้าว ที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT...	91
14	ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT.....	93
15	ปริมาณผลึกในแป้งฟลาวัวร์ที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT.....	94
16	ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าว ตั้งแต่เดือนที่ 0 -12 ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส.....	95
17	ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าว ตั้งแต่เดือนที่ 0 - 12 ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส.....	99

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน.....	29
2	ค่าสีเหลือง (b*) ของเมล็ดข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษา ไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน.....	30
3	เวลาในการหุงต้มของข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน.....	31
4	อัตราการดูดซับน้ำของข้าวสุกจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0-12 เดือน.....	32
5	อัตราการขยายปริมาตรของข้าวสุกจากที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน.....	33
6	ปริมาณยางข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน.....	34
7	(ก)ปริมาณอะมิโลส (ข)ปริมาณคาร์โบไฮเดรตและ(ค) ปริมาณโปรตีนใน ยางข้าวของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0-12 เดือน.....	35
8	ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวสุกจาก (ก) ข้าวเจ้า และ (ข) ข้าวเหนียว จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน.....	37
9	อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยนของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่าน การเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน.....	39
10	ความหนืดสูงสุดของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน.....	39
11	ค่าเบร็กคดาวน์ ของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน.....	40
12	ค่าการคืนตัวของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ใน อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน.....	41
13	ปริมาณหมู่ซัลไฟดริลของแป้งฟลาวัวร์ของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ใน อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน.....	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	กำลังการพองตัวของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน.....	43
15	ความสามารถในการละลายของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน.....	44
16	ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน.....	45
17	ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน.....	47
18	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน.....	48
19	ปริมาณผลึกของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน.....	49
20	SDS-PAGE pattern ของตัวอย่างโปรตีนที่ได้จากฟลาวัวร์ข้าวใหม่ (n) และเก่า ... ที่ความเข้มข้นของอะคริลาไมด์เท่ากับ 12.5 เปอร์เซ็นต์ในทริตเมนต์บัฟเฟอร์ที่ไม่เติม BME.....	55
21	SDS-PAGE pattern ของตัวอย่างโปรตีนที่ได้จากฟลาวัวร์ข้าวใหม่ (n) และเก่า ... ที่ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 12.5 เปอร์เซ็นต์ ในทริตเมนต์บัฟเฟอร์ที่เติม BME.....	57
22	SDS-PAGE pattern ของตัวอย่าง โปรตีนที่ได้จากฟลาวัวร์ข้าวใหม่ (n) และเก่า ... ที่ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ในทริตเมนต์บัฟเฟอร์ที่ไม่เติม BME.....	58
23	SDS-PAGE pattern ของตัวอย่าง โปรตีนที่ได้จากฟลาวัวร์ข้าวใหม่ (n) และเก่า ... ที่ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ในทริตเมนต์บัฟเฟอร์ที่เติม BME.....	59
24	SDS-PAGE pattern ของตัวอย่าง โปรตีนที่ได้จากฟลาวัวร์ข้าวใหม่ (n) และเก่า ... ที่ความเข้มข้นของอะคริลาไมด์เท่ากับ 14 เปอร์เซ็นต์ ในทริตเมนต์บัฟเฟอร์ที่ไม่เติม BME.....	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
25 SDS-PAGE pattern ของตัวอย่างโปรตีนที่ได้จากฟลาร์วข้าวใหม่ (m) และเก่า ... ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 14 เปอร์เซ็นต์ ในทริตเมนต์บัฟเฟอร์ที่ เติม BME.....	61
26 SDS-PAGE pattern ของโปรตีนที่สกัดได้ข้าวสุกใหม่ (Cn) และเก่า (Ca)	63
27 SDS-PAGE pattern ของโปรตีนที่สกัดได้ข้าวสุกใหม่ (Cn*) และเก่า (Ca*)	64
28 ความชื้นของข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี.....	68
29 ค่าสีเหลืองของข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี.....	69
30 ระยะเวลาในการหุงต้มของข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษา เป็นเวลา 1-4 ปี	69
31 อัตราการดูดซับน้ำของข้าวสุกจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา เป็นเวลา 1-4ปี	70
32 อัตราการขยายปริมาตรของข้าวสุกจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา เป็นเวลา 1-4 ปี	71
33 ความแข็งของข้าวสุกจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา เป็นเวลา 1-4 ปี	72
34 ความเหนียวของข้าวสุกจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา เป็นเวลา 1-4 ปี.....	72
35 อุณหภูมิที่ความเหนียวเปลี่ยนแปลง ของแป้งข้าวจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาเป็น เวลา 1-4 ปี.....	73
36 ความเหนียวสูงสุดของแป้งข้าวจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็น เวลา 1-4 ปี.....	74
37 ค่าเบรกดาว์นของแป้งข้าวจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็น เวลา 1-4 ปี.....	74
38 ค่าการคืนตัวของแป้งข้าวจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็น เวลา 1-4 ปี.....	75
39 ค่าความแข็ง และความเหนียว ของตัวอย่างข้าวสุกที่หุงด้วยสารละลายโซเดียม ซัลไฟด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	96
40 ค่าความแข็ง และความเหนียว ของตัวอย่างข้าวสุกที่หุงด้วยสารละลายแอล แอลคอปิก แอสิค ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	97
41 ค่าความแข็ง และความเหนียว ของตัวอย่างข้าวสุกที่หุงด้วยสารละลาย แอลซีเอสทีอินที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	97
42 ค่าความแข็งและความเหนียวของตัวอย่างข้าวสุกที่หุงด้วยน้ำกลั่นปรับ pH ให้เทียบเท่าสารละลาย โซเดียมซัลไฟด์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ข้าวเป็นอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานแก่ร่างกาย และมีกรดอะมิโนไลซีน ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต ประชากรกว่าครึ่ง โลกบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก โดยเฉพาะชาวเอเชีย ซึ่งมีข้าวสายพันธุ์เอเชีย คิดเป็น 90 % ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด (สุทัศน์ ศรีวัฒนพงศ์, 2549) ประเทศไทยถือเป็นประเทศหนึ่งปลูกข้าวมากเป็นอันดับต้นของเอเชีย และยังเป็นประเทศผู้ส่งออกรายใหญ่รองจากอินเดีย (กรมการข้าว, 2550) ประเทศไทยส่งข้าวเป็นสินค้าออก 4 ใน 10 ส่วน ของปริมาณข้าวในแต่ละปีโดย 3 ส่วนของข้าวที่ส่งออกจัดอยู่ในกลุ่มข้าวหอมมะลิ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และคณะ, 2546) นอกจากนี้ข้าวยังมีสินค้าออกที่แปรรูปจากปลายข้าว เช่น แป้งฟลาวัวร์ (flour) และแป้งสตาร์ช (starch)

ข้าวและแป้งข้าวได้ถูกแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายชนิดตามแต่วัฒนธรรมของท้องถิ่นนั้น ๆ เช่น ขนมโมจิของชาวญี่ปุ่น ก๊วยเตี๋ยวของชาวจีน แผ่นแป้งของชาวเวียดนาม เป็นต้น และยังเป็นส่วนประกอบหนึ่งในอุตสาหกรรม เช่น สารเคลือบผิวผ้าให้เรียบเนียน สารผสมอาหารให้เป็นชิ้นเดียวกัน แป้งคัดหน้าหรือแป้งฟูทาตัวและส่วนประกอบของยาเม็ด เป็นต้น (งามชื่น คงเสรี, 2539; วราทัศน์ วงศ์สุรไกร, 2539) อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการบริโภคเป็นข้าวสุกเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปหรือส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมนั้นต้องมีการเลือกข้าวและแป้งข้าวให้มีความเหมาะสมกับความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งข้าวแต่ละพันธุ์จะมีคุณภาพและคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามปริมาณอะมิโลสและอายุของข้าว สถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ (International Rice Research Institute : IRRI) จัดแบ่งข้าวออกเป็น 4 ประเภท ตามปริมาณอะมิโลส คือ กลุ่มแรกอะมิโลสน้อยกว่า 1.0% จัดอยู่ในประเภทข้าวเหนียวเมื่อสุกจะเหนียวมาก กลุ่มที่สองปริมาณอะมิโลสต่ำกว่า 10% หรือข้าวอะมิโลสต่ำ ข้าวสุกนุ่มค่อนข้างเหนียว กลุ่มที่สามปริมาณอะมิโลส 10-25 % หรือข้าวอะมิโลสปานกลาง ข้าวสุกค่อนข้างร่วนนุ่ม และกลุ่มสุดท้ายปริมาณอะมิโลสมากกว่า 25% หรือข้าวอะมิโลสสูง ข้าวสุกจะร่วนแข็ง สำหรับข้าวไทยนั้น รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และคณะ (2546) ได้จัดแบ่งข้าวไทยออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ข้าวเหนียว เช่น ข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 และเหนียวสันป่าตอง ข้าวอะมิโลสปานกลาง เช่น ข้าวขาวดอกมะลิ 105 พิษณุโลก 1 ปทุมธานี 1 กข15 และ สังข์หยด เป็นต้น ข้าวอะมิโลสสูง เช่น พิษณุโลก 2 สุพรรณบุรี 90 สุพรรณบุรี 1 และ เหลืองประทิว โดยข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ เมื่อสุกจะนุ่ม ข้าวที่มีอะมิโลสสูงเมื่อสุกจะแข็งและหุงขึ้นหม้อ แต่เมื่อเก็บข้าวไว้นานขึ้น ความนุ่มจะลดลงและความร่วนแข็งจะเพิ่มมากขึ้นตามอายุ

การเก็บ ซึ่งจากการสำรวจความต้องการของผู้บริโภค พบว่า ข้าวเหนียวนิยมนบริโภคเมื่อมีอายุการเก็บน้อยกว่า 6 เดือน เพราะมีความนุ่มเหนียวและมีกลิ่นหอม ส่วนข้าวหอมมะลินิยมนบริโภคเมื่อข้าวมีอายุ 1-2 ปี เพราะข้าวสุกจะนุ่มพอดีและไม่แฉะจนเกินไป (สุทัศน์ ศรีวัฒนพงศ์, 2549) ข้าวที่มีอะมิโลสสูงนิยมนบริโภคเมื่อมีอายุประมาณ 6 เดือน เพราะหุงขึ้นหม้อ (คลฤดี ใจสุทธิ, สมเกียรติ ปรัชญาวารการ, วารุณี วารุญญานนท์, พัชรี ตั้งตระกูล และ สมชาติ โสภณ รณฤทธิ์, 2550) สำหรับภาคอุตสาหกรรมการผลิตแป้งฟลาวร์และแป้งสตาร์ชข้าวนั้นมักจะมีการผสมวัตถุดิบข้าวหัก 2-4 พันธุ์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ตรงตามที่ควบคุม ทั้งนี้เพราะว่าคุณภาพของข้าวนั้นเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ปัจจัยที่ทำให้ข้าวมีคุณภาพเปลี่ยนแปลงไประหว่างการเก็บได้แก่ ระยะเวลา อุณหภูมิ และวิธีการเก็บรักษา นอกจากนี้การเก็บข้าวเป็นเวลานานยังทำให้เกิดปัญหาหมอด มด หนู สัตว์กัดแทะ และสิ้นเปลืองค่าการจัดการในการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นและพื้นที่ในการจัดเก็บ

ข้าวแต่ละพันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของข้าวเนื่องจากการเก็บรักษานั้นแตกต่างกัน เพราะข้าวแต่ละพันธุ์มีปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชไม่เท่ากัน ซึ่งทำให้การปฏิสัมพันธ์ระหว่างสตาร์ชกับโปรตีนและไขมันแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ในระหว่างการเก็บรักษาของข้าว เพื่อที่จะเป็นองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงและเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบหาวิธีการเร่งอายุของข้าวเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากการเก็บรักษา นอกจากนี้การวิจัยทางด้านการเปลี่ยนแปลงอายุการเก็บของข้าว ไทยนั้นยังมีอยู่น้อย มีเพียงข้าวหอมมะลิ 105 เท่านั้นที่มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางเพราะเป็นพันธุ์เศรษฐกิจที่สำคัญ แต่ข้าวที่ปลูกในประเทศนั้นมีหลากหลายพันธุ์ และส่วนใหญ่เป็นข้าวที่มีอะมิโลสสูง เพราะปลูกได้ทุกท้องที่ ดังนั้นจึงเลือกศึกษาทั้งข้าวเหนียว ข้าวอะมิโลสปานกลาง และข้าวอะมิโลสสูง เพื่อให้ครอบคลุมกลุ่มของข้าวไทย ภายใต้ระยะเวลาการเพาะปลูกข้าวคือปีละครั้ง โดยมุ่งที่จะศึกษาทั้งวิธีการชะลอและการเร่งอายุการเก็บ

ความเข้าใจถึงกลไกและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงให้มีคุณสมบัติของข้าวเก่านั้น เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการที่นำเอาเทคโนโลยีใหม่ๆ มาใช้ในระหว่าง rice aging เพื่อเปลี่ยนหรือชะลอคุณสมบัติของข้าวใหม่เป็นข้าวเก่าเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ของข้าว ดังนั้นการศึกษาถึงกลไกหรือกระบวนการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าว ในระหว่างการเก็บรักษาจึงเป็น กลไกหนึ่งที่จะช่วยพัฒนาเทคโนโลยีการเร่งหรือการชะลอข้าวเก่าได้ และความเข้าใจผลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมในระหว่างการเก็บรักษาข้าว จะช่วยพัฒนากรรมวิธีการเร่งหรือการชะลออายุข้าวเก่าได้ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นสิ่งที่อุตสาหกรรมแปรรูปข้าวกำลังมีความต้องการเป็นอย่าง

ยั้ง เพื่อให้ได้ทั้งข้าวสารและแป้งข้าวเพื่อการแปรรูปที่มีคุณภาพตามที่ตลาดต้องการ อันจะช่วยให้เป้าหมายความต้องการเป็นผู้นำด้านข้าวของประเทศไทยนั้นบรรลุวัตถุประสงค์ด้วย

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 2.1 เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีต่างๆของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา
- 2.2 เพื่อตรวจสอบผลของอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของข้าว
- 2.3 เพื่อศึกษาวิธีการเร่งคุณสมบัติของข้าวเก่า ด้วยวิธี hydrothermal treatment

3. วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (Reviewed literature)

3.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวและแป้งข้าวในระหว่างการเก็บรักษา

3.1.1 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี

3.1.1.1 กิจกรรมของเอนไซม์

ในระหว่างการเก็บรักษามีรายงานเกี่ยวกับกิจกรรมของเอนไซม์หลายชนิด เช่น กิจกรรมของเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (α -amylase) ในข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 เพิ่มขึ้นทั้งการเก็บที่อุณหภูมิใน 25 และ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 เดือน (จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร, เพลงพิณศิริรักษ์ และทรงศิลป์ พจน์ชนะชัย, 2547; สุณีย์ เสริมสิริโสภณ, 2546) ส่งผลให้ปริมาณอะมิเลสเพิ่มขึ้น และการติดตามกิจกรรมของเอนไซม์เบต้าอะไมเลส (β -amylase) ในข้าวเปลือกโดยวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ระหว่างการเก็บพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น (Dhaliwal, Sekhon and Nagi, 1991) ส่วนกิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส (lipase) และเอนไซม์ไลพอกซิจีเนส (lipoxygenase) ในข้าวเปลือกสายพันธุ์จาโปนิกา ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการเก็บ 7 เดือน (Zhou, Robards, Helliwell and Blanchard, 2002) แต่ Sodhi, Singh and Arora (2003) และ Nishiba, Sato and Suda (2000) รายงานว่ามีปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น จากผลของกิจกรรมเอนไซม์ไลเปสย่อยไขมันให้กลายเป็นกรดไขมัน ในการเก็บข้าวเปลือกสายพันธุ์เดียวกัน ส่วนกิจกรรมเอนไซม์ที่เก็บในรูปแบบข้าวสาร ได้แก่ เอนไซม์โปรติเอส (peotase) อะไมเลสฟอสโฟเทส (phosphotase) และฟอสโฟไลเปต (phospholipase) ที่อุณหภูมิ 4 25 และ 37 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาในการเก็บผ่านไป 10 เดือน กิจกรรมของเอนไซม์ต่างๆ เหล่านี้มีค่าน้อยกว่า 0 เดือน (Charstil, 1990) นอกจากนี้ข้าวสารที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิห้อง พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส (peroxidase) (Desikachar and Subrahmanyam, 1960) คาตาเลส (catalase) (Matsukura, Kaneko and Momma, 2000) ไลเปส

และ ไลพอกซีจีนีส (Chrastil, 1994; Sirisoontaralak and Noomhorm, 2007) มีค่าลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ

3.1.1.2 สตาร์ช

ปริมาณสตาร์ชไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา (Teo et al., 2000) ส่วนอะมิโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบของสตาร์ชนั้น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดการเก็บรักษาในรูปข้าวเปลือก พบในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร, เพลงพิน ศิวรักษ์ และทรงสิทธิ์ พจน์ชนะชัย, 2547; สุณีย์ เสริมสิริ โสภณ, 2546) แต่ในข้าวเปลือกพันธุ์ Bengal และ Cypress พบว่าปริมาณอะมิโลส และอะมิโลเพกตินสายสั้นๆ มีค่าลดลง ซึ่งมีผลให้สัดส่วนของอะมิโลสต่ออะมิโลเพกตินลดลง อาจเกิดจากกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือการแตกตัว (degradation) ของสตาร์ช เนื่องจากอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งสตาร์ชและแป้งฟลาวร์ข้าวเก่า มีค่าต่ำกว่าข้าวใหม่ (Patindol, Wang and Jane, 2005) แต่การลดลงของปริมาณอะมิโลสในข้าวพันธุ์ Basmati-370 และ Sharbati มีผลให้อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งฟลาวร์ข้าวเก่าอายุ 2 ปี มีค่ามากกว่าข้าวอายุ 1 ปี เพราะวามิเลกุลของอะมิโลสอิสระที่ลดลงในระหว่างการเก็บ 2 ปี ไปเกี่ยวพันระกับโครงสร้างส่วนผลึก เสริมให้โครงสร้างส่วนผลึกแข็งแรงยิ่งขึ้น ทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้น (Sodhi, Singh and Arora, 2003) นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของอะมิโลสลดลงเมื่อเก็บรักษาข้าวไว้เป็นเวลานาน (Chrastil, 1990)

3.1.1.3 โปรตีน

ปริมาณโปรตีนรวมในข้าวสารอายุไม่เกิน 1 ปี มีปริมาณคงที่ตลอดการเก็บ (ละมุน วิเศษ และคณะ, 2546; Noomhorm et al, 1997; Zhou et al, 2002; Noomhorm et al, 1997) แต่ค่าการละลายของโปรตีนลดลง (Chrastil, 1990; Juliano, 1985) โดยโปรตีนที่ละลายในน้ำและน้ำเกลือ (แอลบูมิน และ โกลบูลิน) มีปริมาณลดลง โดยเฉพาะแอลบูมินที่มีปริมาณลดลงอย่างมาก และโปรตีนที่ละลายในด่างและแอลกอฮอล์ (กลูเทลินและ โปรลามิน) มีปริมาณเพิ่มขึ้น (Chrastil and Zarins, 1992) Ohno and Ohisa (2005) รายงานว่า เมื่อเปรียบเทียบขนาดโปรตีนของข้าวใหม่กับข้าวเก่าอายุ 8 เดือน พบว่าโปรตีนที่มีขนาดใหญ่ของข้าวเก่ามีปริมาณมากกว่าข้าวใหม่ ส่วนโมเลกุลที่มีขนาดเล็กมีปริมาณน้อยกว่า และจำนวนพันธะไดซัลไฟด์ในข้าวเก่ามีมากกว่าในข้าวใหม่ ซึ่งพันธะไดซัลไฟด์ไม่ถูกทำลายที่อุณหภูมิการหุงต้ม ทำให้โครงสร้างของโปรตีนไม่ถูกเปิด การละลายของโปรตีนจึงลดลง ดังนั้นโปรตีนที่ผิวเมล็ดข้าวเก่าจึงขัดขวางการพองตัวของเมล็ดสตาร์ชที่ผิวเมล็ดข้าวถูกขัดขวางการพองตัวด้วยโปรตีนที่ไม่ละลาย (Ohno, Tomatsu, Toeda and Ohisa, 2007) นอกจากนี้ การสูญเสียกรดอะมิโนที่ชั้นเยื่อหุ้มผล (outer layer) ของข้าวระหว่าง

การเก็บเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ระหว่างกรดอะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ มีผลให้ความขาวลดลง (Barber, 1972) ซึ่ง Rehman, (2006) พบว่ากรดอะมิโนไลซีน (lysine) และไทอะมีน (Thiamine) ของข้าวอายุการเก็บ 6 เดือนน้อยกว่าข้าวอายุการเก็บ 1 เดือน

3.1.1.4 ไขมัน

ปริมาณไขมันทั้งหมดในข้าวสารและข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการเก็บ 16 เดือน (Zhou et al., 2002) แต่ปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นใน 3 เดือนแรกของข้าวกล้องที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35-40 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (จรัสศักดิ์ คงเกียรติขจร และคณะ, 2547) แต่หากเก็บข้าวกล้องที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน จะทำให้ปริมาณไขมันลดลง (จรัสศักดิ์ คงเกียรติขจร และคณะ, 2547; Shin, Yoon, Rhee and Kwon, 1986; Wiset, Kongkiattikajorn and Potchanachai, 2005; Zhou, Blanchard, Helliwell and Robard, 2003) ทั้งนี้เกิดจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่ผิวเมล็ดข้าว (Free lipids) ถูกออกซิไดซ์ เกิดเป็นสารเปอร์ออกไซด์ (peroxide) และเปลี่ยนเป็นสารประกอบคาร์บอนิลหลายอย่าง เช่น อะเซทอลดีไฮด์ (acetaldehyde) โพรพานอล (propanal) เพนทานอล (pentanal) และเฮกซานอล (hexanal) ซึ่งทำให้เกิดกลิ่นหืน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2546) การเก็บข้าวสารที่อุณหภูมิต่ำและพ้นจากแสงสว่าง จะช่วยลดการเกิดกระบวนการออกซิเดชัน (Barber, 1972) ส่วนการเก็บข้าวที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติได้เพิ่มขึ้น (Meullenet, Marks, Hankins, Griffin, and Daniels, 2000; Sowbhagya and Bhattacharya, 1976) ส่วนปริมาณกรดไขมันอิสระที่เก็บในรูปข้าวเปลือก มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บ เนื่องจากไขมันถูกไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ไลเปสทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ (Sodhi et al., 2003)

3.1.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพ

3.1.2.1 สีของเมล็ดข้าวหรือแป้งข้าว

เมล็ดข้าวหรือแป้งข้าวที่ผ่านการเก็บเป็นเวลานานๆ ข้าวจะเปลี่ยนเป็นสีคล้ำ (เพลงพิน และ ศิวาพรรักษ์, 2541; คลฤดี ใจสุทธิ และคณะ, 2550; Soponronnarit, Chiawet, Prachayawarakorn, Tungtrakul and Taechapairoj, 2008) ข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิในการเก็บสูงจะมีสีคล้ำว่าการเก็บที่อุณหภูมิต่ำ (จรัสศักดิ์ คงเกียรติขจร และคณะ, 2547; Chrastil, 1994) การเปลี่ยนแปลงทางด้านสีของเมล็ดข้าวหรือแป้งข้าวนั้นเกิดขึ้นจาก 2 สาเหตุ คือ การเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเชื้อรา เช่น *Fusarium* sp. ทำให้เมล็ดเกิดสีเหลือง และ *Curvalaria* sp. ทำให้เกิดสีดำเป็นต้น ซึ่งข้าวที่มีความชื้นสูงจะทำให้แบคทีเรียและเชื้อราเจริญเติบโตได้ดีและเกิดสีคล้ำยิ่งขึ้น (ภัทรพร รัชญวณิชกุล, 2540) และอีกสาเหตุหนึ่ง คือ สีคล้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard

reaction) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ โดยมีอุณหภูมิสูงและแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Hamaker, 1993)

3.1.2.2 พฤติกรรมทางความหนืดของแป้งข้าว

การเก็บข้าวสารและข้าวเปลือกไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (4 องศาเซลเซียส) ไม่ทำให้พฤติกรรมทางความหนืดเปลี่ยนแปลง (Patindol et al., 2005; Zhou, Robards, Helliwell and Blanchard, 2003) แต่เมื่อเก็บรักษาข้าวเปลือกที่อุณหภูมิห้อง (35-37 องศาเซลเซียส) ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity, PV) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บ (จิสต์คี่ และคณะ 2547; ละมุล วิเศษ และคณะ, 2546; Soponronnarit et al. 2008; Patindol et al., 2005; Sowbhagya and Bhattacharya, 2001; Teo et al., 2000; Daniels, Mark, Siebenmorgen, Mcnew and Meullenet, 1998; Perdon, Siebenmorgen, Buescher and Gbur, 1999; Dhaliwal, Sekhon and Nagi, 1991) ส่วนการเก็บรักษาข้าวสารที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่า PV มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ (Sirisoontaralak and Noomhorm, 2007; Tulyathan and Lecharatanaluk, 2007; Zhou, Robards, et al., 2003; Martin and Fitzgerald, 2002; Noomhorm et al., 1997; Charstil, 1994) และไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงค่า PV ของข้าวเปลือกหรือข้าวสาร ก็พบว่า ที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนแปลงเร็วกว่า และเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่เวลาการเก็บเท่ากัน (Patindol et al., 2005; Zhou, Robards et al., 2003) นอกจากนี้ข้าวสารที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีค่า PV ลดลงเร็วกว่าข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ

การเพิ่มขึ้นของค่า PV นั้นสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมเอนไซม์อะไมเลส (จิสต์คี่ และคณะ, 2547; ละมุล วิเศษ และคณะ, 2546; Dhaliwal et al., 1991) เพราะอะมิโลสในเมล็ดสารถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลสที่มีกิจกรรมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษา ทำให้เมล็ดสารถองตัวและจับกับน้ำได้มากขึ้น จึงทำให้แป้งข้าวเก่ามีค่า PV เพิ่มขึ้น แต่เมื่อแยกวิเคราะห์เฉพาะแป้งสารถ้วน กลับพบว่าค่า PV ของแป้งสารถ้วนที่สกัดจากข้าวที่ผ่านการเก็บไม่ต่างกันตลอดการเก็บ มีเพียง PV ของแป้งฟลาวร์ที่เพิ่มขึ้น (Patindol et al., 2005; Teo et al. 2000) การเพิ่มขึ้นของ PV จึงเกิดจากองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่สารถ้วน หรือเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบอื่นกับสารถ้วน (Hamaker and Griffin, 1990)

การลดลงของค่า PV ในข้าวสารที่ผ่านเก็บเกิดขึ้นเฉพาะในแป้งฟลาวร์ แต่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในแป้งสารถ้วน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในระหว่างการเก็บรักษาจึงมีผลให้ค่า PV ลดลง ซึ่ง Chrastil (1992) และ Ohno and Ohisa (2005) รายงานว่า น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของโปรตีนในข้าวเก่ามีค่ามากกว่าข้าวใหม่และพบจำนวนพันธะไดซัลไฟด์ มากขึ้น ซึ่งเมื่อย่อยโปรตีนในข้าวเก่าด้วยเอนไซม์โปรติเอส พบว่ามีค่า PV สูงกว่าข้าวเก่าปกติ (Zhou, Robards

et al., 2003; Martin and Fitzgerald, 2002) เนื่องจากเมื่อโปรตีนที่ผิวของเม็ดสตาร์ชถูกย่อยให้มีขนาดเล็กกลง ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้มากขึ้น เช่นเดียวกันกับการทำลายพันธะไดซัลไฟด์ด้วย β -mercaptoethanol ทำให้โปรตีนมีขนาดเล็กกลงและมีค่าความหนืดมากกว่าข้าวเก่าปกติ (Zhou, Robards et al., 2003; Martin and Fitzgerald, 2002) นอกจากนี้ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไขมันและอะมิโลส (amylose-lipid complex) ในระหว่างการเก็บรักษา มีผลในการยับยั้งการพองตัวของสตาร์ช (Kaur and Singh, 2000)

ส่วนค่า BD มีรายงานว่า มีค่าลดลงตามระยะเวลาในการเก็บทั้งการเก็บในรูปแบบข้าวเปลือกและข้าวสาร (Soponronnarit et al. 2008; Patindol et al., 2005; Sowbhagya and Bhattacharya, 2001; Dhaliwal Sekhon and Nagi, 1991) แสดงว่าเม็ดสตาร์ชแข็งแรงต่อการถูกทำลายด้วยแรงกวนและความร้อน (Singh, Kaur, Sodhi and Sekhon, 2005) หรืออาจเกิดจากโปรตีนที่ผิวของเม็ดสตาร์ชขัดขวางการแตกตัวของเม็ดสตาร์ชเนื่องจากโปรตีนแย่งจับน้ำ (Martin and Fitzgerald, 2002) นอกจากนี้ค่า BD ของข้าวสารที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะลดลงช้ากว่าข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ (Zhou et al., 2003)

การคืนตัว (setback, SB) ของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บนั้นมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ ซึ่งในข้าวเหนียว กข8 (Noomhorm et al., 1997) และข้าวเจ้าขาวดอกมะลิ 105 (Soponronnarit et al., 2008) ที่ผ่านเก็บมีค่า SB เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บตลอด 8 เดือน Zhou et al. (2003) ก็รายงานว่าข้าวที่มีอะมิโลสต่ำมีค่า SB เพิ่มขึ้น แต่ข้าวที่มีอะมิโลสสูงนั้นมีค่า SB ลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ 16 เดือน

3.1.2.3 การเกิดเจลลิตินในเซชัน

มีรายงานว่า อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวผ่านการเก็บในรูปแบบข้าวสารและข้าวเปลือกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน โดยการเก็บข้าวเปลือกพันธุ์ Crypress และ Bengal ไร่ที่อุณหภูมิ 4, 21 และ 38 องศาเซลเซียส (Patindol et al., 2005) และข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ไร่ที่อุณหภูมิ 25 และ 37 องศาเซลเซียส (สุนีย์ เสริมสิริโสภณ, 2546) ไร่ระยะเวลาหนึ่ง จะทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o ; peak gelatinization temperature, T_p และ conclusion gelatinization temperature, T_c) และค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) มีค่ามากกว่าข้าวใหม่ Teo et al. (2000) รายงานว่า เมื่อสกัดแยกวิเคราะห์ระหว่าง สตาร์ชกับโปรตีน พบว่าโปรตีนโอริซินิน ที่ผ่านการเก็บนั้นมีค่า T_o , T_p , T_c และ ΔH เพิ่มขึ้น แต่ T_o , T_p , T_c และ ΔH ของแป้งสตาร์ชที่ผ่านการเก็บไม่เปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของโปรตีนเป็นเหตุให้ส่วนผลึกของสตาร์ชถูกทำลายด้วยอุณหภูมิและพลังงานสูง แต่เมื่อเก็บในรูปแบบ

ข้าวสารที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอด 14 สัปดาห์ การเก็บข้าวสารที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียสพบว่าค่า T_p และ T_c เพิ่มขึ้น และ ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชัน ($T_c - T_p$) กว้างขึ้น (Teo et al., 2000) โดยการเก็บข้าวที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ค่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งข้าวเพิ่มขึ้น ด้วยระยะเวลาสั้น ขณะที่การเก็บข้าวที่อุณหภูมิต่ำทำให้ค่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันเพิ่มขึ้นช้ากว่า (Teo et al 2000) Zhou et al. (2003) รายงานว่า ข้าวสารญี่ปุ่นพันธุ์ Koshihikari Kyeema และ Doongara ที่มี อะมิโลสต่างกัน เมื่อผ่านการเก็บไว้ในอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 เดือน ทำให้มีค่า T_p และ T_c มากกว่าข้าวสารที่ผ่านการเก็บไว้ในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.1.2.4 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางการหุงต้มและทางเนื้อสัมผัส

เนื้อสัมผัสของข้าวของข้าวสุกที่ผ่านการเก็บรักษาจะมีความแข็งของข้าวสุกเพิ่มขึ้น และความเหนียวลดลง (Sirisoontaralak and Noomhorm, 2007; Perdon et al., 1999; Lima and Singh, 1993; Moritaka, Sawada and Yasumatsu, 1971; Daniels et al., 1998; Juliano, 1985; Charstil, 1994) การเกาะตัวของเมล็ดลดลง (Perdon et al., 1999) ความแข็งของข้าวเก่ามากกว่าข้าวใหม่และความเหนียวน้อยกว่าข้าวใหม่พบตั้งแต่เดือนที่ 3 (Meullenet et al., 1999; Mossman, Fellers and Suzuki, 1983; Tamaki, Tashiro, Ishikawa and Ebata, 1993) การเก็บที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ข้าวสุกจะแข็งกว่าและเหนียวน้อยกว่าการเก็บที่อุณหภูมิต่ำ (Tsugita, Ohta and Kato, 1983; Meullenet et al., 1999, 2000) การเก็บข้าวไว้ที่ความชื้นต่ำ (ความชื้น 12%) จะมีค่าความแข็งของข้าวสุกมากกว่าข้าวที่ผ่านการเก็บไว้ที่ความชื้นสูง (ความชื้น 15 และ 18%) (Tamaki et al., 1993) อย่างไรก็ตาม Champagne, Lyon, Min, Vinyard, Bet tBarton, Webb, Moldenhauer, Linscombe and Kohlwey (1998) กลับพบว่า ความแข็งไม่ได้ต่างกันถึงแม้จะเก็บด้วยความชื้นต่างกัน Furukawa, Tanaka, Masumura, Ogihara, Kiyokawa and Wakai (2006) รายงานว่า การเติมโปรตีนโปรลามินและกลูทีลินซึ่งเป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ ลงไปในข้าวก่อนหุงต้มทำให้ค่าความแข็งของข้าวสุก มีค่ามากกว่าแบบไม่เติม เนื่องจากโปรตีนลดพองตัวของสตาร์ชที่ผิวของเมล็ดข้าว (Ohno and Ohisa, 2005) การเปลี่ยนแปลงของไขมันและสตาร์ชก็มีผลต่อการหุงต้มและเนื้อสัมผัส ในระหว่างการเก็บรักษาทำให้ความแข็งแรงของเมล็ดสตาร์ชเพิ่มขึ้น การพองตัวของเมล็ดสตาร์ชลดลง เนื้อสัมผัสจึงแข็งขึ้น ไขมันจะผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ไลเปสเกิดเป็นกรดไขมันอิสระซึ่งสามารถรวมตัวกับอะมิโลส มีผลในการยับยั้งการพองตัวของเมล็ดสตาร์ชทำให้มีผลต่อคุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัสด้วยเช่นกัน การที่ไขมันถูกไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ไลเปสได้กรดไขมันอิสระ จะส่งผลให้เกิดกลิ่นเหม็นหืน ทำให้อายุการเก็บรักษาลดลง เมื่อไขมันถูกออกซิไดซ์ด้วยเอนไซม์

ไลพอกซีจีเนส ทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์และคาร์บอนิลที่สามารถระเหยได้ทำให้เกิดกลิ่น การเกิด ปฏิกริยาออกซิเดชันในโปรตีนเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของพันธะภายในโครงสร้างโปรตีน จะยับยั้งการพองตัวของเมล็ดสตาร์ช การเกิดออกซิเดชันที่ผนังเซลล์ในระหว่างการเก็บรักษาทำให้เมล็ดข้าวมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งร่วน นอกจากนี้กรดอะมิโนในโปรตีนอาจเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดทำให้เกิดสีคล้ำซึ่งมีผลต่อลักษณะปรากฏของข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าวได้

3.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะโปรตีนหลังการเก็บรักษา

โปรตีนที่มีอยู่ในธัญพืชถือเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญเพราะเป็นแหล่งสารอาหารที่มีคุณภาพสูงสำหรับมนุษย์ และสัตว์กินพืช ชนิด การกระจายตัว ลักษณะทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงหน้าที่ ลักษณะโครงสร้างของโปรตีนในเมล็ดขอมเป็นสิ่งที่จะต้องทราบและทำความเข้าใจ เนื่องจากโปรตีนเหล่านี้มีผลต่อคุณสมบัติเมล็ด รวมถึงคุณภาพสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปมาจากเมล็ดธัญพืช โดยได้มีการแบ่งประเภทของโปรตีนในเมล็ดออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1. storage proteins 2. structural and metabolic proteins และ 3. protection proteins ปกติแล้วปริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในเมล็ดธัญพืชนั้นมีค่าเท่ากับ 10-15 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแห้ง โดยพบว่า storage protein ถือเป็นโปรตีนหลักซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติสุดท้ายของการใช้งานในเมล็ดธัญพืชเอง (Shewry and Halford, 2002a)

เป็นที่ทราบกันดีว่าในโปรตีนในข้าว (rice proteins) จัดเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับธัญพืชอื่น ๆ เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ผลิตภัณฑ์ของข้าวจึงได้รับความนิยมอย่างมากเพราะให้ประโยชน์แก่ร่างกายผู้บริโภค (health benefits) เนื่องจากคุณค่าสารอาหาร (nutritional) โดยประกอบด้วยกรดอะมิโนไลซีน ซึ่งจำเป็นต่อร่างกาย (Limiting amino acid) มากถึง 3.8 กรัมต่อ 16 กรัมไนโตรเจน ซึ่งมากกว่าธัญพืชชนิดอื่น ๆ (Juliano, 1985) และยังไม่มีการทำให้เกิดอาการแพ้ (hypoallergenic) เหมือนกับโปรตีนในกลุ่มเมล็ดถั่ว (Eggum, Cabrera, and Juliano, 1992; Ficochi, Travaini, D'Auria, , Banderali, Bernardo and Riva, 2003) โปรตีนในข้าวส่วนใหญ่จะกระจายตัวอย่างในส่วนของเอ็นโดสเปิร์ม (endosperm) (Agboola, Ng and Milled, 2005; Ju, Hettiarachchy and Rath, 2001; Teo, Karim, Cheah, Norziah and Seow, 2000) โปรตีนในข้าวมีประมาณ 7.3 เปอร์เซ็นต์ แม้จะมีปริมาณน้อยแต่เป็นโปรตีนส่วนที่ใช้ประโยชน์ได้ (net protein utilization) มากถึง 73.8 เปอร์เซ็นต์ มากที่สุดเมื่อโปรตีนในธัญพืชชนิดอื่นๆ (ข้าวสาลี 10.6 เปอร์เซ็นต์ ข้าวโพด 9.8 เปอร์เซ็นต์ ข้าวบาร์เลย์ 11.0 เปอร์เซ็นต์ และ ข้าวฟ่าง 11.5 เปอร์เซ็นต์ net protein utilization) (Bean and Nishita, 1985) ในปี 1924 Osborne ได้แบ่งชนิดของโปรตีนในเมล็ดพืชออกเป็น 4 ชนิดตามความสามารถในการสกัดและคุณสมบัติการละลาย คือ 1. โปรตีนที่ละลายในน้ำ (อัลบูมิน) 2.

โปรตีนที่ละลายในสารละลายเกลือเจือจาง (โกลบูลิน) 3. ละลายในสารละลายผสมระหว่างน้ำกับ แอลกอฮอล์ (โพรลามิน) และ 4. โปรตีนที่ละลายในกรดหรือด่างอ่อน ๆ (กลูทีลิน) ซึ่งในข้าวก็มี โปรตีนอยู่ทั้ง 4 ชนิดเช่นกัน โดยในเมล็ดข้าวที่พืชส่วนใหญ่จะมี prolamins เป็น storage protein ซึ่ง แตกต่างจาก เมล็ดข้าวซึ่งมี glutelin เป็น storage protein (Shewry and Halford, 2002b) คือ มีอยู่ ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ของโปรตีนทั้งหมด (Tecson, Esmama, Lontok and Juliano, 1971; Padhye and Salunkhe, 1979) (1-5 เปอร์เซ็นต์ อัลบูมิน 4-15 เปอร์เซ็นต์ โกลบูลิน และ 2-8 เปอร์เซ็นต์ โพร ลามิน เมื่อเทียบต่อปริมาณโปรตีนทั้งหมดในเมล็ดข้าว (Cagampang, Cruz, Espiritu, Santiago and Juliano, 1966; Houston, Iwasaki, Mohammad and Chen, 1968)) ซึ่งถือว่าเป็นโปรตีนที่มีปริมาณ มากที่สุด โดยเป็นโปรตีนกลุ่มที่มี hydrophobic และเป็นโปรตีนขนาดใหญ่ที่ประกอบขึ้นจาก โปรตีนหน่วยย่อยขนาดเล็ก ที่เชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ (Wen and Luthe, 1985) ทั้ง intra และ extra molecular disulfide bond และแรงไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic interactions) (Utsumi, 1992) ซึ่ง Kqczkowski, ได้รายงานไว้ในปี 2000 ว่าพันธะไดซัลไฟด์ (-S-S-) นี้จะเกิดขึ้นในระหว่างการ เติบโตของเมล็ดพืช โดยการออกซิเดชันของหมู่ซัลไฮดริล (-SH) ในสายโปรตีนทำให้เกิดเป็น โปรตีนขนาดใหญ่ขึ้น (Highmolecular weight complexes) โดยในปี 2008 Oszvald, Tomoskozi, Larroque, Keresztyeni, Tomas และ Bekes กล่าวว่าสายพอร์ลิเมอร์ของโปรตีน และขนาดโมเลกุลที่ แตกต่างกันของโปรตีน มีผลเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของฟลาร์วีข้าวแต่ละพันธุ์ และจาก งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณโปรตีนในข้าวรวมถึงพันธะไดซัลไฟด์ในโครงสร้างโปรตีนมีผลต่อ ความเหนียวและเนื้อสัมผัสของข้าวอย่างชัดเจน ปริมาณโปรตีนที่ต่างกันมีผลต่อค่าเนื้อสัมผัสของข้าว โดยข้าวที่มีโปรตีนน้อยจะให้เนื้อสัมผัสที่นุ่มกว่าข้าวที่มีโปรตีนปริมาณมาก (Lyon, Champagne, Windham, Barton, Webb, McClung, Moldenhauer, Linscombe, McKenzie and Kohlwey, 1999) การเติม เอนไซม์โปรติเอสเพื่อย่อยโปรตีน หรือการเติม DTT เพื่อตัดพันธะไดซัลไฟด์ของโปรตีนมี ผลต่อการลดลงของเส้นกราฟความเหนียวของฟลาร์วีข้าว (Martin and Fitzgerald, 2002). และการ เติม DTT ยังมีผลต่อการเพิ่มความเหนียวและความนุ่มของเนื้อสัมผัสข้าวสุกได้ด้วย (Derycke , Veraverbeke, Vandeputte, De Man, Hosney, and Delcour, 2005; Hamaker and Griffin, 1990) โปรตีนที่น่าจะมีส่วนต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของข้าวก็คือ กลูทีลิน หรือที่เรียกอีกชื่อว่า ออไรซินิน โดย Chrastil (1993) พบว่า อุณหภูมิเล็ก ๆ ที่ปกคลุมอยู่ที่ผิวหน้าของข้าวสุกนี้มีผลต่อความเหนียวของ ข้าวสุกโดยพบว่าอุณหภูมิที่กล่าวถึงนี้ประกอบด้วยสององค์ประกอบหลัก คือ สตาร์ชและโปรตีนออไรซินิน โดยมีโปรตีนอื่นอยู่ในปริมาณน้อยมาก ๆ เมื่อโปรตีนมีผลต่อลักษณะของข้าวแล้วการ เปลี่ยนแปลงของโปรตีนในข้าวก็ย่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ของข้าวด้วยเช่นกัน จากงานวิจัยของ Chrastil ในปี 1994 เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชและโปรตีนเปรียบเทียบ

กันระหว่างก่อนและหลังการเก็บรักษา พบว่า ขนาดโมเลกุล ปริมาณอะไมโลส และค่าความเหนียวของสตาร์ชไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ ความเหนียวของโปรตีนออโรซิโนน หรือสารผสมระหว่างออโรซิโนนกับสตาร์ชมีค่าลดลงระหว่างการเก็บ โดยเขาได้ให้เหตุผลว่าการเปลี่ยนแปลงของความเหนียวที่เกิดขึ้นนี้เกี่ยวข้องกับขนาด โมเลกุลเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของโปรตีน และพันธะไดซัลไฟด์ของโปรตีนออโรซิโนนด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการรายงานของ Ohno และ Ohisa ในปี 2005 ที่พบว่าระหว่างการเก็บรักษาโปรตีนที่ผิวหน้าของเมล็ดข้าวจะเกิดการออกซิเดชันของซัลโฟไฮดรอกซิลเป็นพันธะไดซัลไฟด์ และพบว่าโปรตีนมีขนาด โมเลกุลใหญ่ขึ้น แสดงว่าหลังการเก็บรักษาปริมาณไดซัลไฟด์ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมกันของโปรตีนขนาดย่อยเป็นขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น

3.3 การเปลี่ยนแปลงของข้าวและสตาร์ชข้าวเนื่องจากความร้อนขึ้น

3.3.1 การเร่งความเก่าของข้าวสารโดยการอบในภาชนะปิด

วินิต ชินสุพรรณ และ ภูมิสิทธิ์ วรรณชาติ (2545) รายงานว่า การอบข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยความชื้น อุณหภูมิและเวลา ดังต่อไปนี้ จะทำให้ข้าวมีสมบัติทางความหนืดใกล้เคียงข้าวเก่าอายุ 6 เดือน คือ ข้าวเปลือกที่มีความชื้น 24.64% อบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 26 ชั่วโมง หรืออบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ส่วนข้าวเปลือกที่มีความชื้น 13.00 % อบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเมื่ออบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการอบ 6 ชั่วโมง นอกจากนี้การอบข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง ทำให้ข้าวมีสมบัติทางการหุงต้มใกล้เคียงกับข้าวเก่าที่เก็บไว้เป็นเวลา 6 เดือน (คลฤดี ใจสุทธิและคณะ, 2550) หรือการอบข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิสูงถึง 130 และ 150 องศาเซลเซียส และความชื้น 27.7 และ 33.2% เป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที มีผลให้ความขาวลดลง ค่า PV ลดลง ค่าการสูญเสียของแข็งในน้ำ (Solid loss) ลดลง การดูดซับน้ำ และสัดส่วนการขยายตัวด้านยาว (Elongation ratio) มากขึ้นตามระดับอุณหภูมิ ความชื้นและเวลาที่มากขึ้น (Soponronnarit et al., 2008) ซึ่งมีทิศทางการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงของข้าวที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 เดือน นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการเร่งความเก่าในข้าวสาร โดยไกรสิทธิ์ พิธิษฐ์กุล, ศักดา จงแก้ววัฒนา, สุกัญญา วงศ์พรชัย, วรรณนาตุลยธัญ และ สาวิตร มีชัย (2549) ด้วยการอบที่อุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15-120 นาที มีผลให้ค่าความขาว ค่า PV และค่าการสูญเสียของแข็งในน้ำลดลง การดูดซับน้ำและสัดส่วนการขยายตัวของเมล็ดข้าวสุกเพิ่มขึ้น การอบข้าวเปลือกทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน สูงกว่าข้าวเปลือกที่ไม่ได้อบ แต่มีผลให้ ค่า PV

และปริมาณฟลาวอร์ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลสมีค่าลดลง (Takahashi, Miura, Ohisa, Mori and Kobayashi, 2005)

3.3.2 การดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนชื้น (hydrothermal modified starch)

การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของสตาร์ช เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature; T_g) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization temperature) (Jacob et al., 1998) การดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมี 2 วิธี ได้แก่ การให้ความร้อนสูงความชื้นต่ำ (heated moisture treatment, HMT) และการให้ความร้อนต่ำความชื้นสูง (annealing)

3.3.2.1 การดัดแปรสตาร์ชด้วยการให้ความร้อนสูงความชื้นต่ำ (HMT)

HMT เป็นการให้ความร้อนกับสตาร์ชที่มีความชื้นน้อยกว่า 35% ด้วยอุณหภูมิ 90-150 องศาเซลเซียส โดยการใช้หม้อนึ่งมาเชื่อมความดันสูง (autoclave) (Lim et al., 2001) การใช้ตู้อบลมร้อน (hot-air oven) (Adebowale and Lawal, 2003; Hoover and Manuel, 1996) และการใช้ไมโครเวฟ (Anderson and Guraya, 2006; Anderson, Guraya, James and Salvaggio, 2002) การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึก ด้วยเครื่อง X-ray diffraction พบว่า สตาร์ชจากข้าวโพดข้าวเหนียว ข้าวโพดอะมิโลสปานกลาง และข้าวโพดอะมิโลสสูงที่มีความชื้น 30% และผ่านการดัดแปรด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง มีรูปแบบผลึกคงเดิม แต่ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น โดยสตาร์ชข้าวเหนียวมีปริมาณผลึกเพิ่มมากที่สุด รองลงมา คือ สตาร์ชจากข้าวโพด และข้าวโพดอะมิโลสสูง (Hoover et al., 1996) เนื่องจากความร้อนในการดัดแปรทำให้ส่วนอสัณฐานอ่อนตัวแล้วเคลื่อนที่เสริมส่วนที่เป็นผลึกให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น (Vermeulen et al., 2006) แต่การดัดแปรสตาร์ชมันฝรั่งที่มีความชื้น 20-25% ด้วยหม้อนึ่งความดันสูงที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที พบว่าความเป็นผลึกลดลง (Lim et al., 2001) ซึ่งส่วนที่เป็นผลึกถูกทำลายด้วยความร้อนชื้น (Jacob et al., 1998) โดยที่รูปแบบของผลึกยังคงเดิม แต่สตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยอุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที (Kawabata et al., 1994) และที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (Miyoshi, 2002) และที่ 90-130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Vermeulen et al., 2006) ทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแบบ B เป็น A เนื่องจากความร้อนในการดัดแปรทำให้สายเกลียวคู่ในอะมิโลเปกติน ซึ่งเป็นส่วนของชั้นผลึกเกิดการเคลื่อนที่แล้วเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นผลึกที่มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

(Vermeylet et al., 2006) นอกจากนี้สตาร์ชข้าวโพดผ่านการตัดแปรที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ เป็นเวลา 5 และ 20 นาที ยังพบรูปแบบผลึกเป็นแบบ V ซึ่งแสดงถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (Kawabata et al., 1994; Miyoshi, 2002) ส่วนการเปลี่ยนแปลงสมบัติของการเกิดเจลลิตินในเซชันโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC พบว่า สตาร์ชข้าวเจ้าและข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อความดันสูงที่อุณหภูมิ 100 และ 121 องศาเซลเซียส (Anderson and Guraya, 2006) และ สตาร์ชถั่วที่ผ่านการตัดแปรด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (Adebowale et al., 2003) นั้นทำให้สตาร์ชมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (T_0 , T_p และ T_c) สูงขึ้น นอกจากนี้การสตาร์ชข้าวสาลีที่ผ่านการตัดแปรด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชันของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (Fukui and Nikuni, 1969; Kawabata et al., 1994) ส่วนช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (T_c - T_0) ของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรอาจกว้างขึ้นหรือไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชไม่ตัดแปร ขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช อุณหภูมิ เวลาและความชื้นในการตัดแปร (Eerlingen et al., 1996; Hoover and Manuel, 1996) เช่น สตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการตัดแปรด้วยอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงนั้นมี T_c - T_0 อาจกว้างขึ้น (Hoover and Manuel, 1996) แต่สตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านการตัดแปรด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงนั้นมี T_c - T_0 ไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ตัดแปร (Schierbaum and Kettlitz, 1994; Franco et al., 1995) ส่วนค่าเอนทัลปีของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรมีค่าลดลง พบในการตัดแปรสตาร์ชจากมันสำปะหลังด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (Lorenz and Kulp, 1982) การตัดแปรสตาร์ชข้าวสาลี ด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (Kulp and Lorenz, 1981) การตัดแปรสตาร์ชข้าวไรย์ ด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (Schierbaum and Kettlitz, 1994) และการตัดแปรสตาร์ชจากข้าวฟ่างที่มีความชื้น 18-27% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง (Adebowale, Olu-Owolabi, Olayinka, and Lawal, 2005) นอกจากนี้สตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรมีกำลังการพองตัวและการละลายลดลง ซึ่งพบในสตาร์ชข้าวโพดที่มีความชื้น 30% และผ่านการตัดแปรด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง (Perera, Hoover and Martin, 1997)

3.3.2.2 การตัดแปรสตาร์ชด้วยการให้ความร้อนต่ำความชื้นสูง (annealing)

annealing เป็นการแช่แป้งสตาร์ชในน้ำปริมาณมากเกินพอ ภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature; T_g) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มการเกิดเจลลิตินในเซชัน (onset gelatinization temperature; T_0) ซึ่งมักจะใช้อุณหภูมิในช่วง

50-80 องศาเซลเซียส (Jacob and Delcour, 1998) ผลของการ annealing ทำให้โครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ แล้วจัดเรียงตัวกันใหม่ทั้งส่วนที่เป็นผลึก และส่วนอสัณฐาน ส่งผลต่อลักษณะทางโครงสร้างและสมบัติต่าง ๆ Seow and Teo (1993) ได้ศึกษาผลของ annealing ต่ออุณหภูมิ T_g โดยทำ annealing สตาร์ชข้าวที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แปรระดับอัตราส่วนของแป้งสตาร์ชข้าวต่อปริมาณน้ำ 1:4, 1:2, 3:4, 1:1, 4:3, 5:3 พบว่า อัตราส่วนที่มีน้ำน้อยจะมี T_g สูงกว่าอัตราส่วนที่มีน้ำมาก โดยให้เหตุผลว่าน้ำทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายเกลียวคู่ภายในผลึกของสตาร์ช สอดคล้องกับ การทดลองของ Tester et al., (2000) ซึ่งพบว่า ชั้นอสัณฐานของสตาร์ชข้าวที่ผ่านการ annealing มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายอะมิโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดสถานะ glassy ภายในชั้นอสัณฐานมากขึ้น จึงทำให้ค่า T_g เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การ annealing สตาร์ชข้าวสาลีที่อุณหภูมิ 42 และ 47 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้ปริมาณน้ำ 50 % (Yost and Hosoney, 1986) และสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวพันธุ์ธรรมดา และพันธุ์ที่มีอะมิโลสสูงที่อุณหภูมิ 50 และ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่า 60% (Krueger et al., 1987) มีผลทำให้ค่า T_o , T_p และ T_c ของแป้งสตาร์ชสูงขึ้นเนื่องจากการทำ annealing มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในชั้นผลึก ภายในชั้นผลึกมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในเกลียวคู่ขึ้น (Yost and Hosoney, 1986; Eerlingen et al., 1996) การ annealing ยังมีผลให้ $T_c - T_o$ ของสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวแคบลง (Tester et al., 2000) การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ชที่ผ่านการ annealing ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบ viscoamylograph พบว่า สตาร์ชมันฝรั่ง ที่ทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่า 60% (Krueger and Kitamura 1985) และสตาร์ชถั่วที่ผ่านการ annealing ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่า 60% (Hoover and Vasanthan, 1994) มีผลให้อุณหภูมิเริ่มหนืด (pasting temperature) สูงขึ้น โดยที่ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ต่ำลง และค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ไม่เปลี่ยนแปลง ตรงข้ามกับการทดลองของ Eerlingen et al. (1996) ซึ่งรายงานว่า สตาร์ชมันฝรั่ง เมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 52 และ 54 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ปริมาณน้ำ 60% มีค่าความหนืดสุดท้ายสูงขึ้น

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่าง

1.1 การศึกษาผลของการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าว

ข้าวเปลือกอายุการเก็บน้อยกว่า 30 วัน ที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน ได้แก่ ข้าวเหนียว กข6 (ปริมาณอะมิโลสต่ำ) และข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ปริมาณอะมิโลสปานกลาง) จากศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี และข้าวเจ้าสุพรรณบุรี 90 (ปริมาณอะมิโลสสูง) จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี นำข้าวเปลือกมากระเทาะเปลือกและขัดสี ด้วยเครื่องสีข้าวแบบหินขัดขนาดกลาง (รุ่น SB-4, トラช่างน้อย, ประเทศไทย) นำข้าวสารใหม่แต่ละพันธุ์ บรรจุในถุงพลาสติกแห้งถ่วงละ 500 กรัม ปิดให้สนิท แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้บ่ม (35 องศาเซลเซียส) เก็บตัวอย่างออกมาตรวจวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพและเนื้อสัมผัสของข้าวและแป้งข้าวทุก ๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 12 เดือน โดยนำข้าวสารถ่วงมาวางไว้ในที่อุณหภูมิห้อง 4 ชั่วโมง เพื่อให้เมล็ดข้าวปรับสมดุลทางความชื้น เมื่อเปิดถุงแล้วนำข้าวสารไปหาความชื้นทันที แล้วแบ่งข้าวออกเป็น 2 ส่วน

ส่วนแรกเก็บไว้วิเคราะห์สมบัติทางการหุงต้มของข้าวสุก เนื้อสัมผัสของข้าวสุก สมบัติของยางข้าว และวัดสีด้วยเครื่องวัดสี ส่วนที่สองนำไปเตรียมแป้งฟลาวัวร์ (flour) ด้วยเครื่องบดแบบหมุนเหวี่ยง (centrifugal mill, ZM-1000, Retsch, Germany) แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์เมช 100 (เส้นผ่านศูนย์กลางรูตะแกรง 120 ไมโครเมตร) แบ่งแป้งฟลาวัวร์ออกเป็น 2 ส่วน ด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์เมช 140 (เส้นผ่านศูนย์กลางรูตะแกรง 106 ไมโครเมตร) นำส่วนบนตะแกรงไปวิเคราะห์สมบัติทาง ความหนืด สมบัติการเกิดเจลาคีโนเซชัน สมบัติทางโครงสร้างผลึก กำลังการพองตัว ความสามารถในการละลาย ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะ ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วย เอนไซม์ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณหมู่ซัลโฟฮิดริล

ส่วนล่างของตะแกรงนำไปสกัดสตาร์ช (starch) ตามวิธีของ รุ่งนภา พงศสวัสดิมานิต (2546) โดยนำแป้งฟลาวัวร์ข้าว 200 กรัม แช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.35% เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แล้วจึงล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างมีค่าพีเอช เท่ากับ 7 แล้วอบแห้งตะกอนแป้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์เมช 140 อีกครั้ง นำแป้งสตาร์ชไปวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการสกัด โดยให้มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่า 1% แล้วนำแป้งสตาร์ชไปวิเคราะห์สมบัติทางความหนืด การพองตัว และการละลาย

1.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะโปรตีนข้าวขาวดอกมะลิ105 หลังการเก็บรักษา 1 ปี

1.2.1 การสกัดโปรตีนในตัวอย่างแป้งข้าว

คัดแปลงจากวิธีการของ Ohno และคณะฯ (2007) ซึ่งตัวอย่างแป้งน้ำหนัก 250 mg ในหลอด ปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร เติม 5 มิลลิลิตร ของสารละลาย NaOH เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ หรือ 5 มิลลิลิตร ของสารละลาย NaOH 10 มิลลิโมลาร์ ที่ประกอบด้วย 1 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dodecylsulfate; SDS) ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex นำหลอดใส่ตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าตัวอย่าง ที่ความเร็ว 240 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบ 10000 xg เป็นเวลา 10 นาที ดูดสารละลายส่วนใสเก็บใส่ หลอดไมโครเซ็นตริฟิวส์ (microcentrifuge tube) ขนาด 1.5 มิลลิลิตร และนำตัวอย่างเก็บที่ 4 องศาเซลเซียส ส่วนตัวอย่างที่สกัดด้วยสารละลายที่มีการเติม SDS ให้เก็บที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปวิเคราะห์โปรตีนต่อไป (ตัวอย่างที่จะนำไปวิเคราะห์ควรเก็บไว้ไม่เกิน 24 ชั่วโมง)

1.2.2 หาสภาวะเหมาะสมในการสกัดโปรตีนจากตัวอย่างข้าวสุก (Cooked rice)

ในส่วน of ตัวอย่างข้าวสุกนั้นพบปัญหาในการเตรียมตัวอย่าง โดยเมื่อผสมกับสารที่ใช้สกัดแล้วจะเกิดลักษณะที่เป็นเจลข้นเหนียวทำให้เป็นปัญหาสำคัญในการสกัดโปรตีนออกจากตัวอย่างซึ่งใช้วิธีการเขย่า ดังนั้นจึงต้องทำให้ความเหนียวของตัวอย่างลดลง ซึ่งวิธีการที่นำมาพิจารณาคือ การใช้เอนไซม์ในการย่อยเจลแป้งให้ความเหนียวลดลง โดยจะต้องหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างก่อน ในการย่อยตัวอย่างเจลข้าวสุกให้ความเหนียวลดลงก่อนทำการสกัดตัวอย่างต่อไปโดยคัดแปลงจากวิธีการของ Zihua Ao และคณะฯ (2007) และ Yook และคณะฯ (2002) ตัวอย่างข้าวสุกที่เตรียมได้มาบดให้ละเอียดด้วยโกรนบดตัวอย่าง จนกลายเป็นเจลแป้งที่มีความเหนียวหนืด จากนั้นชั่งตัวอย่าง 800 มิลลิกรัมใส่หลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มล. เติมน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตรผสมให้เข้ากันแล้วบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (shaking water bath) ที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเติม 1 มิลลิลิตร ของ 0.05 เปอร์เซ็นต์ เอนไซม์ แอฟา-อะไมเลส (วิธีการเตรียมดูได้จากภาคผนวก) ลงไปและผสมกับตัวอย่างทันที แล้วเริ่มเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีเป็นเวลาต่าง ๆ กันคือ ที่ 1 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อครบเวลา นำหลอดปั่นเหวี่ยงที่ใส่ตัวอย่างแช่ที่อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ โดยตั้งอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ปั่นเหวี่ยงตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 10,000 xg เป็นเวลา 10 นาที เก็บสารละลายส่วนใสมาวิเคราะห์หาสภาวะเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการย่อยตัวอย่างแป้งเจลแป้งข้าวสุกโดยตรวจสอบได้จากการสังเกตการลดลงของความเหนียวด้วยสายตา และการวัดปริมาณ

น้ำตาลรีดิวซ์ซิง (วิธีการวิเคราะห์หาค่าได้จากภาคผนวก) ที่เกิดขึ้นหลังจากการย่อยตัวอย่างที่เวลานั้น ๆ แล้วเลือกเวลาที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความหนืดของในการย่อยเจลแข็งมีค่าต่ำสุด โดยพิจารณาควบคู่กับการเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิงหลังจากเจลแข็งถูกย่อยด้วยเอนไซม์

1.2.3 การสกัดโปรตีนจากตัวอย่างเจลข้าวสุก

จากผลการวิเคราะห์หาเวลาที่เหมาะสมในการย่อยตัวอย่างแข็งข้าวสุกโดยใช้เอนไซม์อะไมเลส และตรวจสอบการลดลงของความหนืดของเจลแข็งเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิง ตามข้อ 4.3.5 พบว่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการย่อยตัวอย่างคือที่ การย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสความเข้มข้น 0.01 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เมื่อทราบสถานะและเวลาย่อยแล้ว จึงทำการสกัดโปรตีนจากข้าวสุก โดยเริ่มต้นจากการใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างข้าวสุก (ปริมาณน้ำ ตัวอย่างที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการหุงข้าว) เช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างวัดเนื้อสัมผัสในบทที่ 3 ข้อ 3.3.12.2 โดยปริมาณของตัวอย่างและสารละลายที่ใช้แสดงดังตารางข้างล่างนี้

ตารางแสดงลำดับการเติมสารสกัดในตัวอย่างข้าวสุก

วิธีการที่ใช้สกัด	เจลข้าวสุก (มก.)	น้ำกลั่น (มล.)	อะไมเลส (มล.)	เวลาย่อย (ชม.)
Cooked rice + Enz + NaOH	800	3	1	1
Cooked rice + Enz + NaOH + 1%SDS	800	3	1	1
Cooked rice + Enz + NaOH + 5%SDS	800	2	1	1

หลังจากย่อยตัวอย่างด้วยเอนไซม์อะไมเลสที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้เติมสารละลายตามลำดับดังนี้

วิธีการที่ใช้สกัด	1 M NaOH (ul)	20% SDS (ml)	H ₂ O (ml)	เวลาสกัด (h)
Cooked rice + Enz + NaOH	50	-	0.950	4
Cooked rice + Enz + NaOH + 1%SDS	50	0.25	0.700	4
Cooked rice + Enz + NaOH + 5%SDS	50	1.25	0.700	4

จากนั้นนำหลอดตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 xg เป็นเวลา 10 นาที ดูดสารละลายส่วนในสเปกโตรเมตริก microcentrifuge ขนาด 1.5 มิลลิลิตร เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไปโดยตัวอย่างที่มีการเติม SDS จะเก็บที่อุณหภูมิห้อง ส่วนตัวอย่างที่ไม่เติม SDS เก็บที่ 4 องศาเซลเซียส

1.3 ผลของการเก็บรักษาระยะยาวต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางการหุงต้ม เนื้อสัมผัสและการเกิดเพสท์ของข้าว

ข้าวเปลือกอายุการเก็บน้อยกว่า 30 วัน ที่มีปริมาณอะไมโลสต่างกัน ได้แก่ ข้าวเหนียว กข6 (ปริมาณอะไมโลสต่ำ) และข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ปริมาณอะไมโลสปานกลาง) จากศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี และข้าวเจ้าสุพรรณบุรี 90 (ปริมาณอะไมโลสสูง) จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี นำข้าวเปลือกมากระเทาะเปลือกและขัดสี ด้วยเครื่องสีข้าวแบบหินขัดขนาดกลาง (รุ่น SB-4, คราข้างน้อย, ประเทศไทย) มาเก็บที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 ปี แล้ว จากนั้นแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก นำข้าวสารเต็มเมล็ดไปวิเคราะห์สมบัติทางการหุงต้มและเนื้อสัมผัส ส่วนที่สองนำไปเตรียมแป้งด้วยวิธีการโม่แห้ง ตามวิธีในข้อ 1.1 แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติการเกิดเพสท์

1.4 การศึกษาผลการใช้ความร้อนขึ้น (Hydrothermal treatment) ในการเร่งอายุการเก็บ

1.4.1 การเร่งอายุการเก็บด้วยการใช้ความร้อนขึ้น แบบ heat moisture treatments (HMT) เพื่อการผลิตข้าวสารเก่า

นำข้าวสารใส่ขวดโหลแก้ว ปิดฝาขวดโหลแก้วให้สนิท นำไปวางเก็บในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (วัดอุณหภูมิภายในขวดโหลแก้วได้ 90 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง เขย่าเบาๆ เพื่อให้ความร้อนกระจายได้อย่างทั่วถึงทุก 15 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วนำขวดโหลแก้วมาตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 20 นาที เทใส่ถาดแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนมีความชื้นไม่เกิน 13 % นำไปเก็บในภาชนะปิดสนิทเพื่อรอการทดสอบสมบัติทางการหุงต้มและเนื้อสัมผัส

1.4.2 การเร่งอายุการเก็บด้วยการใช้ความร้อนขึ้น แบบ HMT เพื่อการผลิตแป้ง

นำข้าวสารมาลดขนาดให้มีขนาดเล็กจนสามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 8 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 นิ้ว) แต่ไม่ผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 7 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.069 นิ้ว) ได้ จากนั้นหาความชื้นในเมล็ดข้าวแล้วคำนวณปริมาณน้ำสำหรับปรับให้มีความชื้น 10 และ 30% จากนั้นนำข้าวสาร แช่น้ำด้วยอัตราส่วนข้าวหักต่อน้ำ 3 ต่อ 7 ส่วน ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ข้าวมีความชื้นประมาณ 30% (Kerr, 1950) นำขึ้นสะเด็ดน้ำ นำข้าวสารใส่ขวดโหลแก้ว แล้วปรับความชื้นจนมีน้ำหนักตามที่คำนวณไว้ (ความชื้น 30%) โดยการฉีดพรมน้ำเพิ่มจนมีน้ำหนักตามต้องการ หากน้ำหนักมากกว่าที่คำนวณไว้ต้องผึ่งลมไว้สักครู่ก่อนนำไปชั่งใหม่ จากนั้น

ปิดฝาขวดโหลแก้วให้สนิททันทีแล้วตั้งไว้ในอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อปรับสมดุลทางความชื้น นำไปวางเก็บในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (วัดอุณหภูมิภายในขวดโหลแก้วได้ 90 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 20 นาที เทผ่านตะแกรงแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนมีความความชื้นไม่เกิน 13 % แล้วจึงนำไปเตรียมเป็นแป้งฟลัวร์และแป้งสตาร์ชตามวิธีในข้อ 3.1

1.4.3 การเร่งอายุการเก็บด้วยการใช้ความร้อนขึ้นแบบ annealing เพื่อผลิตแป้ง

นำข้าวสารมาลดขนาดให้มีขนาดเล็กจนสามารถผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 8 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 นิ้ว) แต่ไม่ผ่านตะแกรงรูกกลมเบอร์ 7 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.069 นิ้ว) ได้แล้ว ใส่น้ำข้าวหักลงในขวดโหลแก้ว เติมน้ำลงไป 70% และเติม sodium metabisulfide ลงไป 0.02% เพื่อยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย) ปิดฝาให้สนิท แล้วแช่ขวดโหลแก้ว ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 53 องศาเซลเซียส (ต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_0) 7 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามกำหนดเวลาจึงนำมาล้างทำความสะอาด 6 ครั้ง อบแห้งที่ 50 องศาเซลเซียส จนมีความชื้นน้อยกว่า 13% แล้วจึงนำไปเตรียมเป็นแป้งฟลัวร์และแป้งสตาร์ชตามวิธีในข้อ 3.1

1.5 การชะลออายุการเก็บ

ข้าวเปลือกอายุการเก็บน้อยกว่า 30 วัน ที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน ได้แก่ ข้าวเหนียว กข6 (ปริมาณอะมิโลสต่ำ) และข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ปริมาณอะมิโลสปานกลาง) จากศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี และข้าวเจ้าสุพรรณบุรี 90 (ปริมาณอะมิโลสสูง) จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี นำข้าวเปลือกมากระเทาะเปลือกและขัดสี ด้วยเครื่องสีข้าวแบบหินขัดขนาดกลาง (รุ่น SB-4, トラ้างน้อย, ประเทศไทย) นำข้าวสารใหม่แต่ละพันธุ์ บรรจุในถุงพลาสติกแข็งถุงละ 500 กรัม ปิดให้สนิท แล้วนำไปเก็บที่ห้องแช่แข็ง (-18 องศาเซลเซียส) และห้องเย็น (10 องศาเซลเซียส) เก็บตัวอย่างออกมาตรวจวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพและเนื้อสัมผัสของข้าวและแป้งข้าวทุก ๆ 2 เดือน โดยนำข้าวสารถุงมาวางไว้ในอุณหภูมิห้อง 4 ชั่วโมง เพื่อให้เมล็ดข้าวปรับสมดุลทางความชื้น เมื่อเปิดถุงแล้วนำข้าวสารไปหาความชื้นทันที แล้วแบ่งข้าวออกเป็น 2 ส่วน เหมือนตัวอย่างในข้อ 1.1

2. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ

2.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

วิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธีของ AOAC (2000)

2.2 การวิเคราะห์ค่าสีเหลือง (b*)

นำข้าวสารหรือแป้งฟลาวัวร์ข้าวใส่ลงในกระบอกใส่ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร แล้วนำไปวัดค่า b* ด้วยเครื่องวัดสี Color view™ Spectrophotometer (D65 series, Hunter Lab, USA) โดยอาศัยหลักการวัดการตกกระทบและการสะท้อนของแสงเมื่อส่องผ่านตัวอย่าง โดยใช้ D65 10° เป็นแหล่งกำเนิดแสง

2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางการหุงต้ม (Cooking properties)

คัดแปลงจากวิธีการของ Singh et al. (2005) ซึ่งข้าวสารเต็มเมล็ด 20 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ในกระป๋องอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จับเวลาเมื่ออุณหภูมิตัวอย่างถึง 100 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างออกมากดทับด้วยแผ่นกระจก ทุกๆ 1 นาที เริ่มจากนาทีที่ 5 จนกระทั่งไม่พบส่วนแข็งสีขาว จากนั้นเทใส่ตะแกรง จนไม่มีน้ำหยดออกมา (ประมาณ 10 นาที) เทข้าวสุกใส่กระดาษชำระทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที ซึ่งน้ำหนัก แล้วนำไปอบแห้งหาของแข็ง

เวลาในการหุงต้ม = เวลาที่น้อยที่สุดที่ทำให้ข้าวเกิดเจลมากกว่า 90 % ของเมล็ดข้าว
หรือ ไม่พบความขุ่นตรงส่วนกลาง (Bhattacharya, 1978)

อัตราการดูดซับน้ำ = $\frac{\text{น้ำหนักข้าวสุก} - \text{น้ำหนักข้าวสุกแห้ง}}{\text{น้ำหนักข้าวสารแห้ง}}$

อัตราการขยายปริมาตรของข้าวสุก

นำข้าวสาร 20 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ไปหาปริมาตรข้าวสาร โดยใส่ในกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร ตบกันกระบอกจนกระทั่งปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงบันทึกปริมาตร จากนั้นเทข้าวสารใส่ในกระป๋องอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นเท่ากับอัตราการดูดซับน้ำ จากนั้นนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาหุงต้มเท่ากับเวลาที่หาได้

อัตราการขยายปริมาตรของข้าวสุก = $\frac{\text{ปริมาตรของข้าวสุก}}{\text{ปริมาตรของข้าวสาร}}$

2.4 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของข้าวสุก

คัดแปลงจาก วิธีของ Leelayuthsoontorn (2006)

ซั่งข้าวสาร 20 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่กระป๋องโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นเท่ากับอัตราการดูดซับน้ำเฉลี่ยของข้าวใหม่ (ข้าวที่เก็บเกี่ยวในปี พ.ศ. 2550) และข้าวเก่า (ข้าวที่เก็บเกี่ยวในปี พ.ศ. 2549) ของข้าวแต่ละพันธุ์ ปิดฝาให้สนิท แช่ไว้ 10 นาที จากนั้นนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการหุงต้มเท่ากับเวลาในการหุงต้มที่หาได้ข้างต้น จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาคดให้มีปริมาตรเท่ากันเพื่อลดช่องว่างระหว่างเม็ดข้าว ด้วยแรง 500 กรัม เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดสมบัติทางเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (the TA.XTPlus texture analyzer, Stable Micro Systems, USA) ด้วยวิธีการวัดแบบ back extrusion ใช้หัววัดแบบ cylinder probe (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร) และกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัด 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที วัดค่าของแรงกระทำ (Force Compression) โดยแรงกดสูงสุดที่ใช้ในการวัด คือค่าความแข็ง (Hardness) และแรงดึงสูงสุดที่ใช้ในการวัด คือค่าความเหนียว (Stickiness)

2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบในยางข้าว

ซั่งข้าวสาร 20 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ในกระป๋องโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นเท่ากับอัตราการดูดซับน้ำเฉลี่ยของข้าวใหม่ (ข้าวที่เก็บเกี่ยวในปี พ.ศ. 2550) และข้าวเก่า (ข้าวที่เก็บเกี่ยวในปี พ.ศ. 2549) ของข้าวแต่ละพันธุ์ ปิดฝาให้สนิท แช่ไว้ 10 นาที จากนั้นนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการหุงต้มเท่ากับเวลาในการหุงต้มที่หาได้ข้างต้น จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมาแช่น้ำกลั่น (พีเอช 7.0-7.5) จำนวน 100 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ ด้วยความเร็ว 60 ครั้งต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที กรองผ่านตะแกรงลวดเบอร์ 140 นำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณของแข็งโดยการอบแห้ง, ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, ปริมาณโปรตีนตามวิธีของ Bradford (1976) และ ปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยใช้วิธีฟินอล - ซัลฟูริกแอซิด (Phenol-Sulfuric acid) ตามวิธีของ Birch (1985)

2.6 การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะ (amylose leaching)

ใช้วิธีการของ กล้านรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

โดยซั่งน้ำหนักแป้งฟลาวัวร์ 0.5 กรัม ใส่หลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 18 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็น

เวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 1,000 รอบ เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะออกมา ตามวิธีการของ Juliano (1971)

2.7 คุณสมบัติการเกิดเพสท์

ตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA-4, Newport Science, Australia) โดยใช้ตัวอย่างแป้งฟลาวัวร์หรือแป้งสตาร์ชข้าว 3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใสลงในภาชนะทรงกระบอก เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลา 0-1 นาที โดย 10 วินาทีแรก ใช้ความเร็ว 960 รอบต่อชั่วโมง แล้วลดลงเป็น 160 ต่อนาทีตลอดการวิเคราะห์ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาระหว่าง 1-4.45 นาที และ รักษาให้อุณหภูมิคงที่ ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.30 นาที แล้วลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาระหว่าง 7.50-11 นาที รักษาให้อุณหภูมิคงที่ ที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที

2.8 ความสามารถในการละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power)

ใช้วิธีการของ กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546) ซึ่งดัดแปลงจาก Schoch (1964)

โดยชั่งตัวอย่างแป้ง 0.5 กรัม ใสหลอดปั่นเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยความเร็ว 75 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยก ส่วนใสออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 2,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ควบน้ำส่วนบนใส่ภาชนะ แล้วนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก และนำแป้งส่วนที่เหลือในหลอดมาชั่งน้ำหนัก

$$\text{การละลาย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งสตาร์ชส่วนที่ละลายน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งสตาร์ชที่พองตัวแล้ว}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \times (100 - \% \text{การละลาย})}$$

2.9 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

คัดแปลงมาจาก Pearson (1970)

ชั่งน้ำหนักแป้งฟลาวัวร์ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 1 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เขย่าในเครื่องเขย่าด้วยอัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 3000g 30 นาที ปิเปตสารละลายใส 1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลองที่มีฝาปิด เติมสารละลายกรดไดไนโตรซาลิไซลิก (Dinitrosalicylic acid, DNS) 1 มิลลิลิตร นำไปต้มในน้ำเดือด 5 นาที แล้วแช่น้ำเย็นทันที เติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมวอร์เทค ทำแบลนด์โดยใช้ น้ำกลั่นแทนสารละลายตัวอย่าง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-visible spectrophotometer, Model G10 Series, Germany) ที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร คำนวณปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานกลูโคส

2.10 การวิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (α -amylase)

คัดแปลงจาก Goni (1996) โดยชั่งตัวอย่าง 100 มิลลิกรัม น้ำหนักแห้ง ใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีฝาปิด ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม HCl-KCl buffer pH 1.5 10 มิลลิลิตร และสารละลายเปปซิน (pepsin solution) ความเข้มข้น 600 UI ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร เขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำให้เย็น แล้วเติมสารละลาย Tris-matate buffer 15 มิลลิลิตร และเติมสารละลายเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ความเข้มข้น 300 UI ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เทใส่หลอดปั่นเหวี่ยง ล้างขวดรูปชมพู่ด้วยน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ตกลงหลอดอีกครั้ง ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3000g 15 นาที ล้างซ้ำ แล้วปรับปริมาตร เป็น 100 มิลลิลิตร แล้วปิเปต 1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง นำมาหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และหาปริมาณสตาร์ชด้วยวิธี AOAC (2000)

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (\%)} = \frac{\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์} \times 100}{\text{ปริมาณสตาร์ช}}$$

2.11 การเกิดเจลลิตินแซชัน

ศึกษาด้วยเครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC7, Perkin-Elmer, Norwalk, USA) โดยใส่ตัวอย่างแป้งฟลาวัวร์ขาว 7 มิลลิกรัม ลงในภาชนะสเตนเลส (stainless pan) แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปในส่วนน้ำหนักแป้ง 70% จากนั้นปิดฝาให้สนิท บ่มที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน จึงนำมา

วิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลาติโนเซชันด้วย DSC โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที จาก 20 ถึง 150 องศาเซลเซียส โดยใช้ภาชนะสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอ้างอิงทำการวิเคราะห์ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o) และช่วงอุณหภูมิที่ของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ($T_c - T_o$) โดยใช้โปรแกรม Pyris manager (Perkin-Elmer, Norwalk, USA)

2.12 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง X-ray powder diffractometer เพื่อหารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) โดยใส่แป้งฟลาร์วลงในภาชนะใส่ตัวอย่างอัดให้แน่น แล้วนำไปวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์กำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 40 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ โดยใช้ divergen slit 1 องศา anti slit 1 องศา และสแกนในช่วงมุม 2θ เท่ากับ 5-35 องศา ด้วยอัตราการหมุน 0.02 รอบต่อชั่วโมง และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก (% relative crystallinity) ตามวิธีการของ Cheetam and Tao (1998)

2.13 การวิเคราะห์ค่าพื้นผิวไฮโดรโฟบิกของโปรตีน (Surface hydrophobicity)

เตรียมตัวอย่างสารสกัดด้วยวิธีตามข้อ 5.7.7 แล้วทำการวิเคราะห์ค่าพื้นผิวไฮโดรโฟบิกของโปรตีนตามวิธีการที่ดัดแปลงจากวิธีการของ Paraman 2007 และ Kato and Nakai, 1980 ทำการสกัดโปรตีนในฟลาร์วข้าวหอมมะลิ โดยชั่งตัวอย่างประมาณ 1000 มิลลิกรัมผสมกับ สารที่ใช้สกัดโปรตีนซึ่งได้แก่ 10 มิลลิโมลาร์ NaOH หรือ 10 มิลลิโมลาร์ NaOH ที่ประกอบด้วย 1 เปอร์เซ็นต์ของ SDS ปริมาตรเท่ากับ 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดเซนทริฟิวซ์ขนาด 50 มิลลิลิตร เขย่า 4 ชั่วโมง แล้ว นำตัวอย่างที่ได้ไปเซนทริฟิวซ์ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส 10,000 xg เป็นเวลา 10 นาที ถ่ายสารละลายส่วนใสใส่หลอดเซนทริฟิวซ์หลอดใหม่ คุณสารละลายโปรตีนที่สกัดได้ใส่หลอดทดลองขนาดเล็กให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 0 0.1 0.15 0.2 0.25 และ 0.3 มิลลิลิตร ตามลำดับ เติมน้ำ 50 มิลลิโมลาร์ Carbonate/ Bicarbonate buffer (pH 10.0) ปริมาตร 2.0 1.9 1.85 1.80 1.75 และ 1.70 มิลลิลิตร ตามลำดับ ผสมให้เข้ากัน จากนั้นทำการเติม 10 ไมโครลิตร ของสารละลาย 8 มิลลิโมลาร์ 1-anilino-8-naphthene sulfonate (ANS) ที่ pH 7.0 ในทุกๆ หลอด ผสมให้เข้ากันภายในเวลา 5 วินาที ตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา นำไปวัดค่าการเรืองแสงของตัวอย่างด้วยเครื่อง Spectrofluorometer โดยกำหนดให้ค่า Excitation เท่ากับ 390 นาโนเมตร และ Emission เท่ากับ 470 นาโนเมตร ในการวัดการวัดค่า การเรืองแสงของตัวอย่างนี้ให้ใช้ cuvette ที่มีลักษณะใสทั้งสี่ด้าน และเลือกวัดค่าตัวอย่างสารละลายในโหมด low sensitivity โดยกำหนดความกว้างของ slit อยู่

ที่ 10 มิลลิเมตร การรายงานค่า Surface Hydrophobicity (S_0) ของตัวอย่าง ได้จากค่า ความชัน (ϵ) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า The relative fluoresce (R) (แกน y) ที่วัดได้ กับความเข้มข้นของ โปรตีนในตัวอย่าง มก./มล. (แกน x) ที่ทราบได้โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี lowry จากสมการ

$$A = \epsilon bc$$

เมื่อ A คือ FI

b คือ path length มีค่าเท่ากับ 1

c คือ ความเข้มข้นของตัวอย่าง

ในกรณีตัวอย่างที่เป็นฟลาร์ว

$$\text{Fluorescence Intensity (Net_FI)} = FI - FI_0$$

ในกรณีตัวอย่างที่เป็นฟลาร์วข้าวสุก

$$\text{Fluorescence Intensity (Net_FI)} = FI - F_0 - F_{\text{sample}}$$

เมื่อ FI คือ ค่าการเรืองแสงที่วัดได้จากตัวอย่างที่เติม ANS

FI_0 คือ ค่าการเรืองแสง buffer เติม ANS ที่ไม่เติมตัวอย่าง (Blank 1)

FI_{sample} คือ ค่าการเรืองแสงของตัวอย่างที่เติม buffer (Blank 2)

2.14 การวิเคราะห์ปริมาณหมู่ซัลไฮดริลอิสระ

นำส่วนใสจากการแยกสตาร์ช มาปรับพีเอชให้เป็นกลางด้วย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 4.6 ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3000g ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นดูดส่วน สารละลายใสมา 10 มิลลิลิตร นำมาหาปริมาณหมู่ซัลไฮดริลอิสระ ตามวิธีของ Adachi et al. (2004) โดยเติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มียูเรียความเข้มข้น 8 โมลาร์ และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 1.5% pH 7.6 ปริมาณ 1 มิลลิลิตร กับสารละลายเอลแมน (Ellman's reagent: DTNB) ซึ่งทำละลายในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัม ต่อมิลลิลิตร ที่ pH 7.6 ปริมาณ 100 ไมโครลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 412 นาโนเมตร

คำนวณปริมาณหมู่ซัลไฮดริลอิสระ โดยใช้ค่าโมลาร์ แอบซอปติวิตี (molar absorptivity: ϵ) $13600 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ คำนวณปริมาณซัลไฮดริลในหน่วย ไมโครโมลต่อกรัม โปรตีน (วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนตามวิธีของ Bradford, 1976)

2.15 การวิเคราะห์ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล และหมู่ไธอไซไฟต์ (Total SH + SS)

การวัดปริมาณของ Total SH และ SS ตามวิธีการของ Thannhauser และคณะ (1984) โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาของ 2-nitro-5-thiosulfobenzoate (NTSB) กับสารละลายโปรตีน ในสถานะที่มีหมู่ซัลไฟต์ (SO_3^-) นำสารละลายโปรตีนที่สกัดได้ปริมาตร 500 ไมโครลิตร (ที่ทราบความเข้มข้นโดยวิธี lowry) ผสมกับ 4.5 มิลลิลิตร ของ 0.5 โมลาร์ Tris-HCl บัฟเฟอร์ ที่มีค่า pH เท่ากับ 9.5 ที่ประกอบด้วย 100 มิลลิโมลาร์ Na_2SO_3 , 10 มิลลิโมลาร์ EDTA และ 8 โมลาร์ Urea จากนั้น ดูดสารละลายผสม 2 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองขนาดเล็ก เดิม 0.02 มิลลิลิตร ของ NTSB ผสมให้เข้ากันทันที นำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส 25 นาที Blank ของตัวอย่างเตรียมโดยเติม 500 ไมโครลิตร ของน้ำกลั่นแทนตัวอย่างโปรตีนสกัด วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 412 นาโนเมตร ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ คำนวณค่า Total SH และ SS ตามวิธีคำนวณค่า Total SH

การวิเคราะห์ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล (Total SH)

ปริมาณ Total SH วิเคราะห์ได้โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่าง Ellman's reagent (5,5'-dithiobis(2-nitrobenzoic acid) หรือ DTNB, 1959) กับกลุ่มไธออล (thiol group, SH) ของโปรตีน ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการของ Mine (1997) โดยนำตัวอย่างโปรตีนที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ NaOH (ที่ทราบความเข้มข้นโดยวิธี lowry) ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ผสมกับ 4.5 มิลลิลิตร ของสารละลายบัฟเฟอร์ 0.5 โมลาร์ Tris-HCl pH 8.0 ที่มี 10 มิลลิโมลาร์ ethylene-diaminetetraacetic acid (EDTA) และ 8 โมลาร์ Urea ปิเปตสารละลายผสมระหว่างโปรตีน กับบัฟเฟอร์ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลองขนาดเล็ก เดิม 0.2 มิลลิลิตร ของ 0.1% DTNB ที่มีค่า pH เท่ากับ 7.0 ที่ละลายใน 50 มิลลิโมลาร์ NaH_2PO_4 นำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที Blank ของตัวอย่างเตรียมได้โดยเติม 500 ไมโครลิตร ของน้ำกลั่นแทนสารละลายโปรตีนที่สกัดได้ ผสมกับ 4.5 มิลลิลิตร ของสารละลายบัฟเฟอร์ นำ 2 มิลลิลิตร ของ blank ผสมกับบัฟเฟอร์ เดิม 0.2 มิลลิลิตร ของ 0.1% DTNB วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 412 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ปริมาณ total SH คำนวณได้จาก $\mu\text{mole SH/g} = 73.53A_{412} \text{ (D/C)}$ (คำนวณได้จากค่า extinction coefficient $13600 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (Beveridge และคณะ, 1974)) เมื่อ A_{412} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 412 นาโนเมตร C คือ ความเข้มข้นของตัวอย่างในหน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และ D คือ dilution factor เท่ากับ 10 ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ปริมาณหมู่ SS หาได้โดยการลบค่า Total SH + SS ด้วย Total SH โดยวิธีการนี้ SS group ที่ได้วัดมาจาก SH เพียง 1 ตัวเท่านั้นไม่ใช่ 2 ตัว

2.16 การวิเคราะห์โปรตีนด้วยเทคนิค SDS-PAGE

ศึกษาผลของสารรีดิวซิงซ์ต่อขนาดโมเลกุลของโปรตีนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โปรตีนด้วยเทคนิค SDS-PAGE ตามวิธีการของ Laemmli U.K. (1970) นำตัวอย่างสารสกัดโปรตีนที่ทราบความเข้มข้นแล้ว(วิธีหาความเข้มข้นของโปรตีนด้วย lowry ตามภาคผนวก) นำมาผสมกับ 2x ทรีตเมนต์บัฟเฟอร์ซึ่งประกอบด้วย 0.125 M Tris-HCl, pH 6.8, 4% SDS, 20% glycerol ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาณของสารสกัดโปรตีนที่ใช้คือ 25 ไมโครกรัม ฉีดสารละลายตัวอย่างที่ผสมกับทรีตเมนต์บัฟเฟอร์แล้วเข้าลงสู่แผ่นเจลตามช่องที่เตรียมไว้ (หากมีการเติม 10% β mercaptoethanol (BME) ในทรีตเมนต์บัฟเฟอร์ ด้วยจะต้องนำตัวอย่างไปให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 นาทีเช่นเดียวกับโปรตีนมาตรฐาน (standard protein marker) ก่อนนำไปฉีด) ความเข้มข้นของ running เจลที่ใช้ มีค่าเท่ากับ 12%, 15%, 10% หรือ 7.5% และ stacking เจลมีค่าเท่ากับ 4% เจล โดยให้กระแสไฟความต่างศักย์เท่ากับ 120 โวลต์ ซ้อมสีตัวอย่างด้วยสารละลายที่ประกอบด้วย 1.25 กรัม comassie blue R-250 ที่ประกอบด้วย 10 เปอร์เซ็นต์เอทานอล และ 10 เปอร์เซ็นต์ กรดอะซิติก และใช้ standard protein marker สำหรับเปรียบเทียบ molecular weight

3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SPSS version 11 และทดสอบความแตกต่างด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

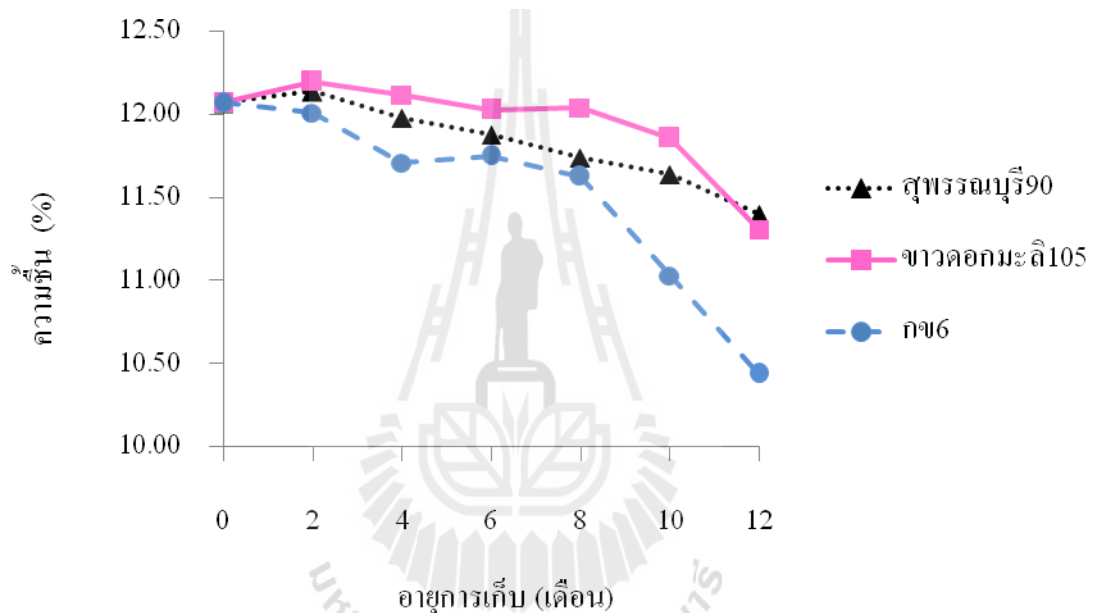
บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

1. ผลของการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าว

ข้าวที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้าวที่มีอายุการเก็บเกี่ยวน้อยกว่า 30 วัน โดยได้ทำการศึกษาผลของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างกัน ได้แก่ การเก็บรักษาในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 35 ± 0.5 องศาเซลเซียส โดยทุก ๆ 2 เดือนจะเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ

1.1 ความชื้นของเมล็ดข้าวสาร

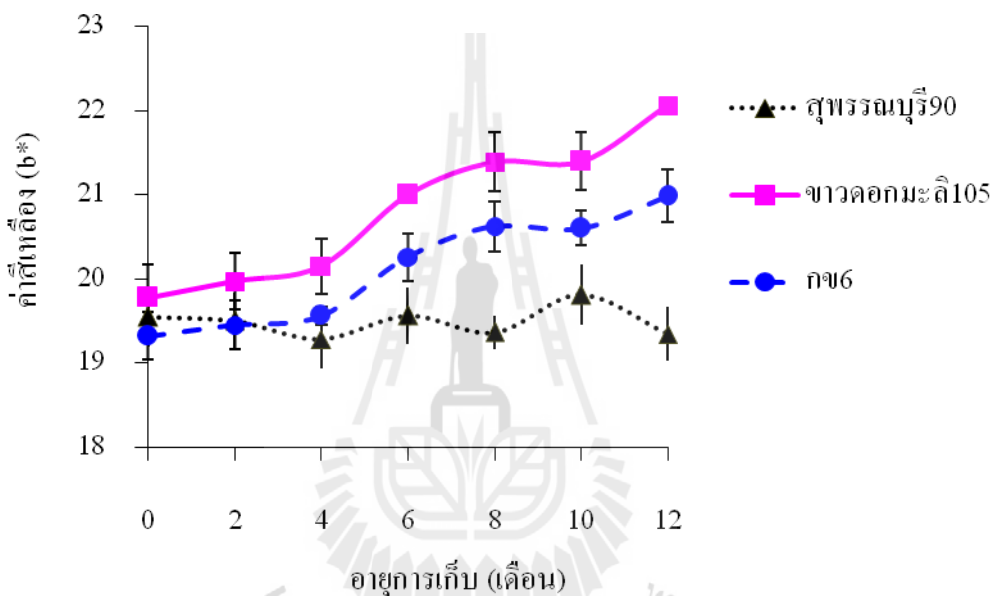


ภาพที่ 1 ปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน

ข้าวทั้งสามพันธุ์มีความชื้นเริ่มต้น (อายุการเก็บ 0 เดือน) 12.07% เมื่อผ่านการเก็บรักษา ความชื้นมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ (ภาพที่ 1) โดยความชื้นของข้าวเหนียวเริ่มมีค่าลดลงในเดือนที่ 4 ส่วนข้าวเจ้าทั้งสองพันธุ์เริ่มมีค่าความชื้นลดลงในเดือนที่ 6 เนื่องจากเมล็ดข้าวมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนความชื้นกับอากาศแวดล้อม จึงทำให้ค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพอากาศระหว่างการเก็บรักษา (Dhaliwal et al., 1991; Gujral and Kumar, 2003) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่ลดลงในแต่ละเดือน จะเห็นว่า ความชื้นของข้าวเหนียว กข 6 มีค่าต่ำกว่าข้าวเจ้าทั้งสองพันธุ์ตลอดอายุการเก็บรักษา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมล็ดข้าวเหนียวมี

ขนาดเล็กกว่าเมล็ดข้าวเจ้า ซึ่งเมื่อวัดขนาดของเมล็ดข้าวแต่ละพันธุ์ พบว่า เมล็ดข้าวเหนียว กข6 มีความยาว 0.51 เซนติเมตร หน้า 0.15 เซนติเมตร เมล็ดข้าวข้าวเจ้าขาวดอกมะลิ 105 มีความยาว 0.57 เซนติเมตร หน้า 0.21 เซนติเมตร และเมล็ดข้าวสุพรรณบุรี 90 มีความยาว 0.59 เซนติเมตร หน้า 0.23 เซนติเมตร เมล็ดข้าวเหนียวมีขนาดเล็กทำให้พื้นที่ผิวในการระเหยความชื้นมากกว่าเมล็ดข้าวเจ้า

1.2 ค่าสีเหลือง (b^*) ของข้าวสาร



ภาพที่ 2 ค่าสีเหลือง (b^*) ของเมล็ดข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษา ไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน

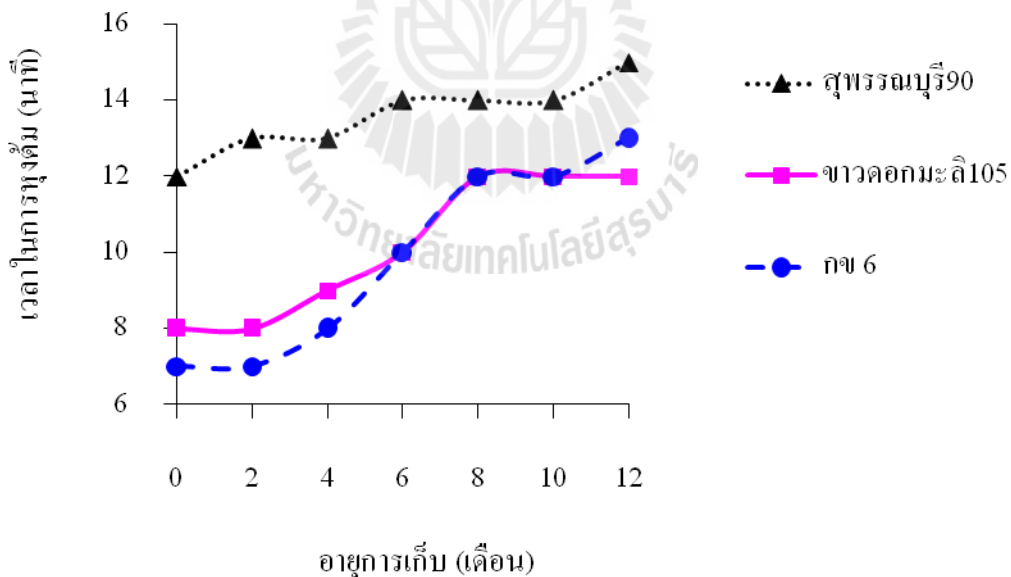
โดยทั่วไปข้าวเก่ามักมีสีคล้ำหรือสีเหลืองออกน้ำตาล (ละมุล วิเศษ, 2541) ในการวัดค่าสีของข้าวด้วยเครื่องวัดสี ค่า b^* เป็นบวกแทนสีเหลืองอ่อนจนถึงสีน้ำตาลเข้ม จากการทดลองพบว่า ค่าสีเหลืองของข้าวสุพรรณบุรี 90 ไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา (ภาพที่ 2) โดยมีค่าสีเหลืองประมาณ 19.50 ในขณะที่ค่าสีเหลืองของข้าวขาวดอกมะลิ 105 เพิ่มขึ้นจาก 19.68 เป็น 21.84 และค่าสีเหลืองของข้าวเหนียว กข 6 เพิ่มขึ้นจาก 19.39 เป็น 21.04

การเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของข้าวในระหว่างการเก็บรักษาอาจเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้อง (non-enzymatic browning) คือ ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ที่สร้างสารประกอบสีน้ำตาลประเภทเมลานอยดิน (melanoidins) ที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้สีของแป้งเข้มขึ้น (งามชื่น คงเสรี, 2539; Chrastil, 1994) ปฏิกิริยาเมลลาร์ดเกิดจากน้ำตาลรีดิวซ์ทำ

ปฏิกริยากับกรดอะมิโนในโปรตีน โดยเฉพาะกรดอะมิโนไลซีน (lysine) ซึ่ง Rehman (2006) พบว่า ปริมาณกรดอะมิโนไลซีนของข้าวเก็บที่อุณหภูมิ 25 และ 45 องศาเซลเซียส ที่มีอายุการเก็บ 6 เดือน มีค่าน้อยกว่าข้าวที่มีอายุการเก็บรักษา 3 เดือน

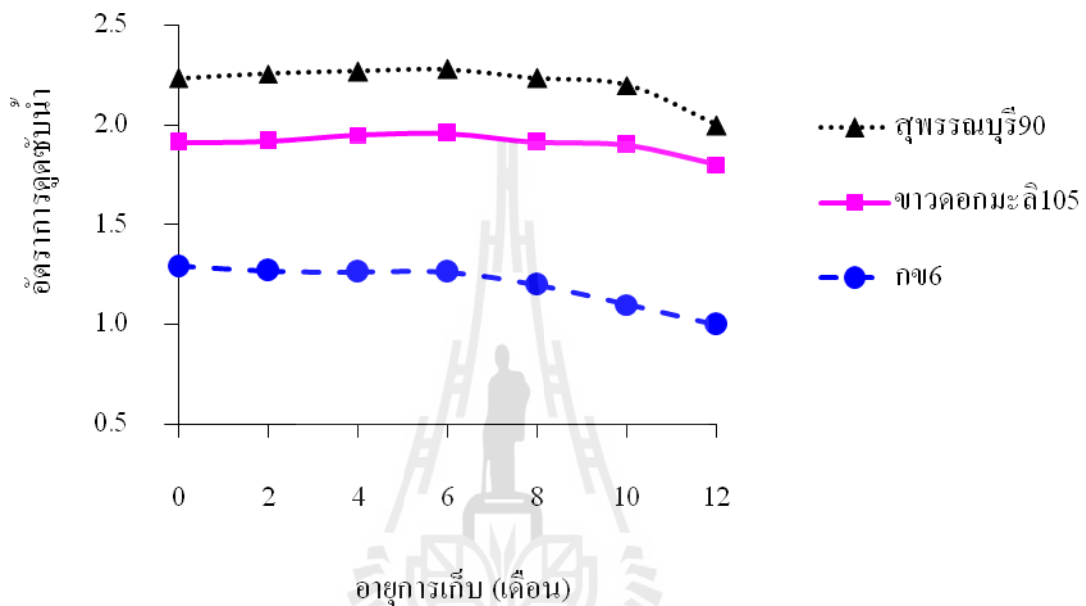
1.3 สมบัติทางการหุงต้มของข้าวสุก

ในการหุงข้าวให้สวยสุกพอดีจะต้องมีอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำและเวลาในการ หุงต้มที่เหมาะสม การใส่น้ำมากเกินไปจะทำให้ข้าวแฉะ และการหุงนานเกินไปทำให้เมล็ดแตก ดังนั้น ในการเปรียบเทียบข้าวสามพันธุ์นี้จึงต้องใช้วิธีการที่เหมาะสมในการทำให้ข้าวสุกสวย การหุงต้มข้าวเจ้าและข้าวเหนียวจึงต้องใช้วิธีการต่างกัน เพราะข้าวเหนียวสามารถพองตัวได้มากกว่าข้าวเจ้า หากนำข้าวเหนียวและข้าวเจ้าไปต้ม จะทำให้ข้าวเหนียวละไม่คงรูปเป็นเมล็ดแต่ข้าวเจ้ายังคงรูปเป็นเมล็ดข้าว ดังจะเห็นว่าการบริโภคข้าวที่กระทำกันมาช้านานนั้น ข้าวเหนียวจะแช่ข้าวในน้ำก่อน จากนั้นสะเด็ดน้ำแล้วจึงนำไปนึ่ง ส่วนข้าวเจ้าจะเติมน้ำลงไปนึ่งแล้วนำไปให้ความร้อนได้เลย ดังนั้นการหาเวลาในการหุงต้มและอัตราในการดูดซับน้ำของข้าวเจ้าจึงใช้วิธีการต้มข้าว ในน้ำปริมาณมากเกินไป ส่วนของข้าวเหนียวใช้การนึ่งข้าวที่แช่น้ำแล้ว 3 ชั่วโมงบนตะแกรง



ภาพที่ 3 เวลาในการหุงต้มของข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน

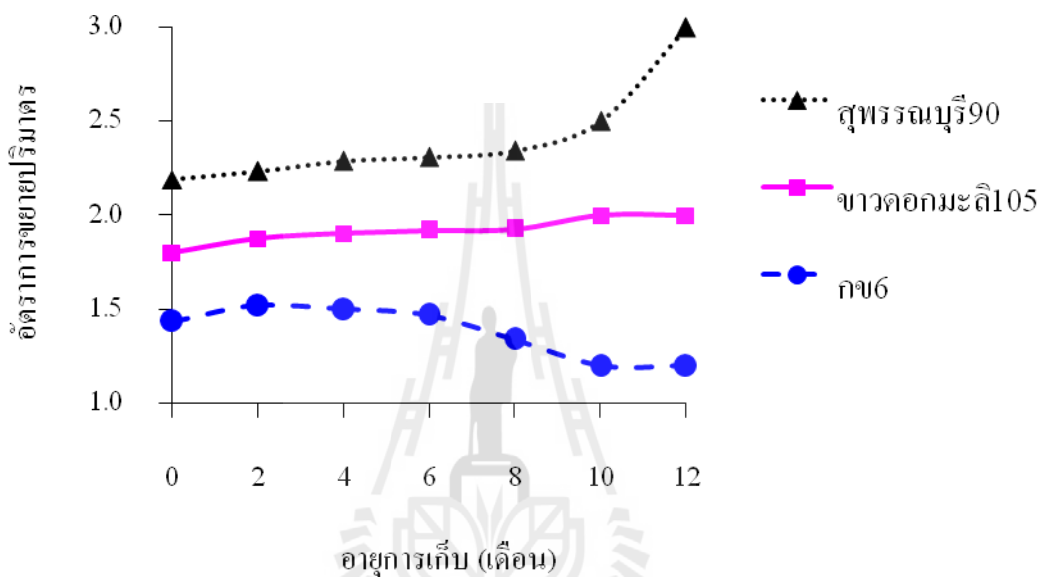
จากผลการทดลองพบว่าข้าวที่ผ่านการเก็บเป็นเวลานานจะใช้เวลาในการหุงต้มนานขึ้น ดังภาพที่ 3 เวลาในการหุงต้มของข้าวสุพรรณบุรี90 เพิ่มขึ้นในเดือนที่ 6 และเพิ่มขึ้นอีกครั้งในเดือนที่ 12 ส่วนเวลาในการหุงต้มของข้าวขาวดอกมะลิ105 เพิ่มขึ้นในเดือนที่ 4 จนถึงเดือนที่ 8 จากนั้นมีค่าคงที่ โดยข้าวสุพรรณบุรี90 ใช้เวลาในการหุงต้มมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ เพราะว่าข้าวสุพรรณบุรี90 มีขนาดเมล็ดใหญ่กว่าเล็กน้อย



ภาพที่ 4 อัตราการดูดซับน้ำของข้าวสุกจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน

อัตราการดูดซับน้ำของข้าวสุกทั้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียวแสดงในภาพที่ 4 ข้าวสุพรรณบุรี90 และข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่ผ่านการเก็บมีอัตราการดูดซับน้ำคงที่จนถึง 10 เดือน และลดลงในเดือนที่ 12 ซึ่งตรงข้ามกับการทดลองของ Zhou et al. (2010), Soponronnarit et al. (2008) และ Sung (2005) ที่พบว่าอัตราการดูดซับน้ำของข้าวมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ ทั้งนี้เพราะว่าการทดลองทั้งสามงานวิจัยนี้ใช้เวลาในการหุงต้มเท่ากัน ซึ่งระยะเวลาในการหุงต้มมีผลต่ออัตราการดูดซับน้ำ (Sung, 2005) จึงทำให้ข้าวใหม่ที่ซึ่งควรจะใช้เวลาในการหุงต้มน้อยมีลักษณะและเพราะแป้งกระจายในน้ำ แต่ข้าวเก่าที่เมล็ดข้าวแข็งใช้เวลานานในการทำให้ข้าวสุกอยู่แล้ว ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับไว้จึงน้อยกว่าข้าวใหม่ แต่หากจะต้มข้าวให้สุกพอดีไม่นานจนกระทั่งนั้น ก็ต้องใช้เวลาในการหุงต้มให้พอเหมาะกับการสุกของข้าว ซึ่งทำให้พบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำของข้าวที่ผ่านการเก็บ 10 เดือน ไม่แตกต่างจากใหม่ อย่างไรก็ตามในเดือนที่ 12 พบว่ามีการอุ้มน้ำน้อยลง ซึ่ง

เมื่อคุณลักษณะทางกายภาพของเมล็ดข้าวสุก จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลาในการหุงนานมาก เพื่อให้สุกถึงใจกลางจะทำให้รอบนอกแตกและทำให้ข้าวบานออก จึงสูญเสียการอุ้มน้ำ ส่วน ข้าวเหนียว เมื่อนำมาแช่ 3 ชั่วโมงแล้วนึ่งผ่านไอน้ำ พบว่าอัตราการดูดซับน้ำลดลงตั้งแต่เดือนที่ 6 แสดงว่าน้ำผ่านเข้าไปในโครงสร้างได้ยากขึ้นตามเวลาในการเก็บ เนื่องจากโปรตีนที่ผิวมีพันธะ ไคซัลไฟด์มากขึ้น ทำให้โปรตีนขัดขวางการดูดซับน้ำ (ohno and Ohisa, 2005)

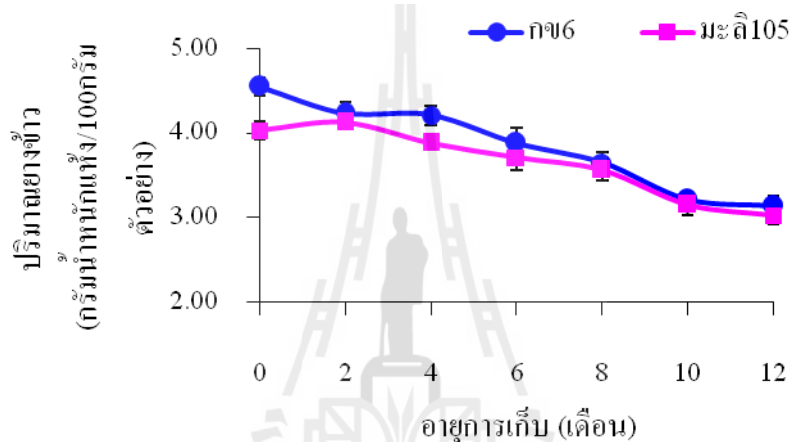


ภาพที่ 5 อัตราการขยายปริมาตรของข้าวสุกจากที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน

อัตราการขยายปริมาตรของข้าวสุก แสดงในภาพที่ 5 ข้าวสุพรรณบุรี90 มีอัตราการขยายปริมาตรคงที่ตลอดการเก็บ 8 เดือน แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นในเดือนที่ 10-12 ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าอัตราการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในเดือนที่ 10 จะเห็นว่าช่วงแรกของการเก็บรักษาข้าวมีอัตราการขยายปริมาตรคงที่ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการหาอัตราการขยายปริมาตรข้าวสุกของข้าวแต่ละพันธุ์ใช้น้ำในการหุงเท่ากับอัตราการดูดซับน้ำของเดือนนั้น ซึ่งในช่วงอายุการเก็บ 0-10 เดือนมีอัตราการดูดซับน้ำเท่ากัน จึงทำให้อัตราการขยายปริมาตรของข้าวสุกไม่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากใช้เวลาในการหุงต้มต่างกันในแต่ละช่วงอายุการเก็บ ซึ่งใช้เวลาในการหุงเท่ากับเวลาที่หาได้ใน ภาพที่ 3 การหุงข้าวเป็นเวลานานทำให้แรงดันไอน้ำภายในเมล็ดข้าวดันให้เมล็ดข้าวบานออก และยังใช้เวลานานในการหุงต้มยังทำให้เมล็ดข้าวสุกโคงง ซึ่งเป็นการเพิ่มช่องว่างระหว่างเมล็ดข้าว จึงทำ

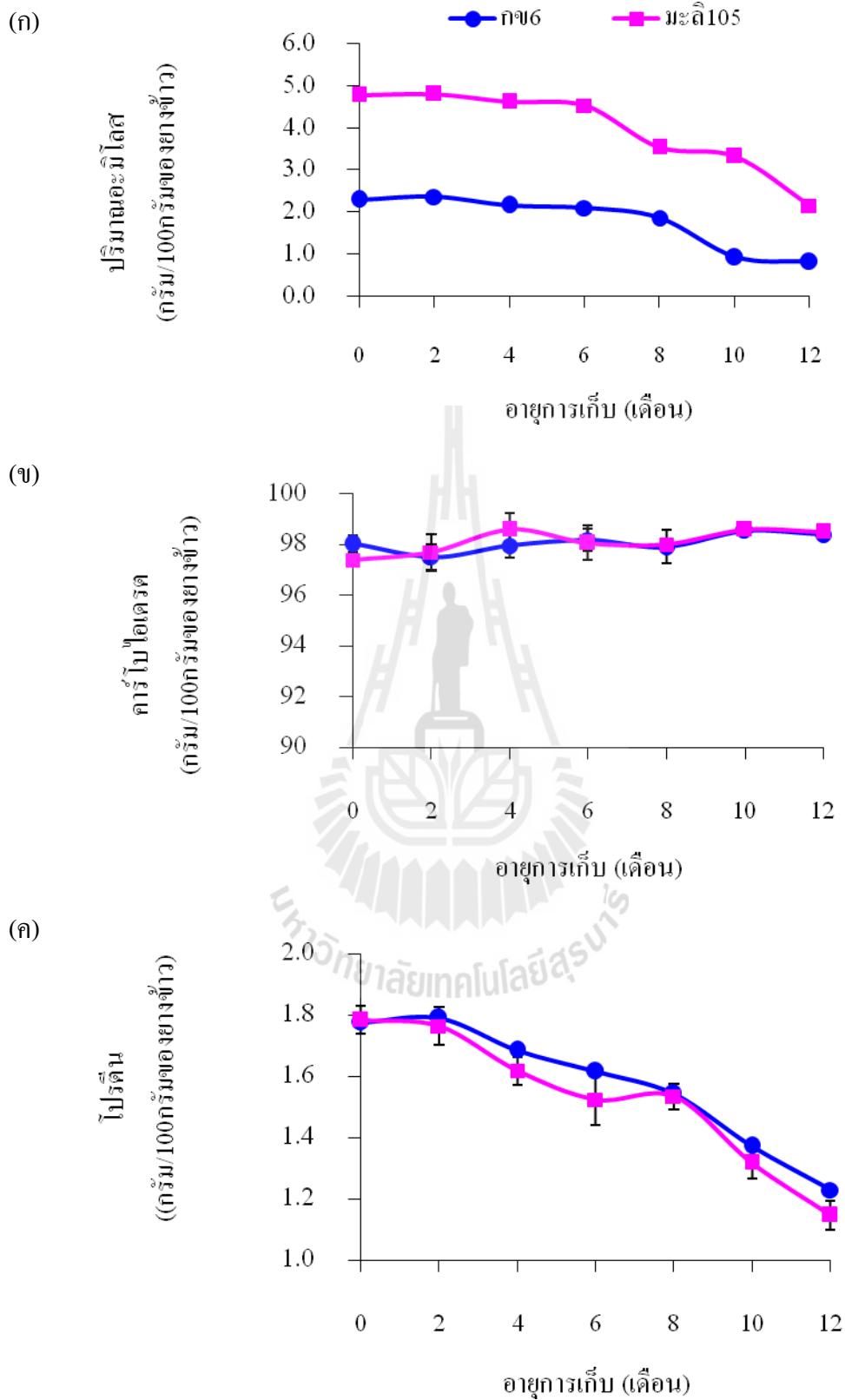
ให้อัตราการปริมาตรเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราการขยายปริมาตรของข้าวสุพรรณบุรี90 นั้นมีค่ามากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 เพราะข้าวที่มีพอลิเมอร์สายตรงอย่างเช่น อะมิโลส จะแยกออกจากกันง่ายเมื่อถูกแรงดันไอน้ำ (singh et al , 2000) ทำให้เมล็ดข้าวสุกขยายตัวได้มาก ส่วนข้าวเหนียวมีอัตราการขยายปริมาตรลดลง เพราะ โครงสร้างที่มีอะมิโลเพกติน ทำให้ทนทานต่อแรงดันของน้ำ จึงทำให้เมล็ดข้าวสุกขยายตัวน้อย และเมล็ดข้าวคุดน้ำได้ลดลงตามเวลาในการเก็บทำให้ปริมาตรของข้าวเหนียวลดลงเมื่ออายุการเก็บมากขึ้น

1.4 องค์ประกอบของยางข้าวสุก



ภาพที่ 6 ปริมาณยางข้าวสุกของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน

ยางข้าวเป็นส่วนเจลเหนียวรอบ ๆ เมล็ดข้าวสุก ซึ่งจะพบในข้าวเหนียวใหม่ และข้าวใหม่ ในตระกูลข้าวหอมมะลิ ยางข้าวเป็นดัชนีชี้วัดความเก่าของข้าวที่มีกันมาช้านาน ยางข้าวจะมีปริมาณลดลงเมื่ออายุการเก็บมากขึ้น ส่งผลให้ความนุ่มเหนียวของข้าวสุกลดลง (คลฤดี ใจสุทธิ และคณะ, 2550) ทั้งนี้ปริมาณยางข้าวของข้าวหุงสุก น่าจะมีความสัมพันธ์กับของแข็งที่สูญเสียไปกับน้ำต้มข้าว (solid loss) เนื่องจากเป็นส่วนที่อยู่บริเวณผิวของเมล็ดข้าวเหมือนกัน ซึ่งการตรวจวัดปริมาณยางข้าวจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่จะทำให้ทราบถึงส่วนยางเหนียวที่ทำให้ข้าวมีความเหนียวนุ่ม การหาปริมาณยาง ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่ออายุการเก็บมากขึ้นปริมาณของยางข้าวมีค่าลดลง ดังแสดงในภาพที่ 6 การที่ยางข้าวลดลงเมื่ออายุการเก็บมากขึ้นแสดงว่ายางข้าวถูกยัดคิดไว้ที่ผิวข้าว ซึ่งที่ผ่านมามีแต่ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่า ทำไมข้าวเก่าจึงมียางลดลง หากพิจารณาจากองค์ประกอบหลักของข้าว ก็จะมีเพียงสตาร์ชและโปรตีน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทั้งสองจึงอาจเป็นสาเหตุให้ยางข้าวมีปริมาณลดลงตามอายุการเก็บ



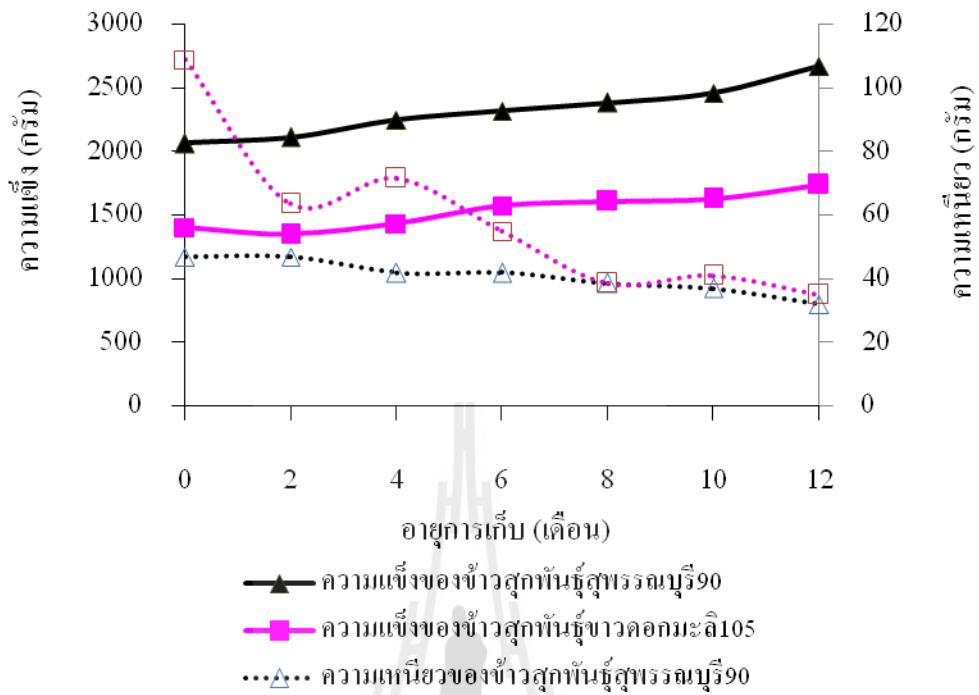
ภาพที่ 7 (ก)ปริมาณอะมิโนโตส (ข)ปริมาณคาร์โบไฮเดรตและ(ค) ปริมาณโปรตีนในข่างข้าวของข้าว ที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0-12 เดือน

ปริมาณสตาร์ช โปรตีนและอะมิโลสแสดงของข้าวแดงในภาพที่ 7 เมื่อคิดน้ำยางเป็น 100 % จะพบว่าข้าวเหนียว กข6 ใหม่ มีส่วนของสตาร์ชประมาณ 98 % โปรตีน 1.78 % ในส่วนของสตาร์ชมีอะมิโลสอยู่ ประมาณ 2.3 % เมื่อระยะเวลาในการเก็บมากขึ้น ปริมาณโปรตีนและอะมิโลสมีค่าลดลง เช่นเดียวกันกับข้าวขาวดอกมะลิ105 ซึ่งโปรตีนและอะมิโลสมีที่ลดลงนั้น บ่งชี้ว่าที่ผิวของเมล็ดข้าว อาจเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนกับอะมิโลสซึ่งมีผลต่อการชะโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเปกติน สายสั้น (Zhou et al., 2007) ที่ผิวของเมล็ดข้าว นอกจากนี้ปริมาณโปรตีนที่ลดลงบ่งชี้ว่า ความสามารถในการละลายของโปรตีนที่ผิวลดลง ซึ่ง Ohno and Ohisa (2005) รายงานว่า การเพิ่มขึ้นของพันธะซัลไฟด์ในโปรตีนที่ผิวของเมล็ดข้าว ทำให้ชั้นเจลที่ผิวเมล็ดข้าวบางลง

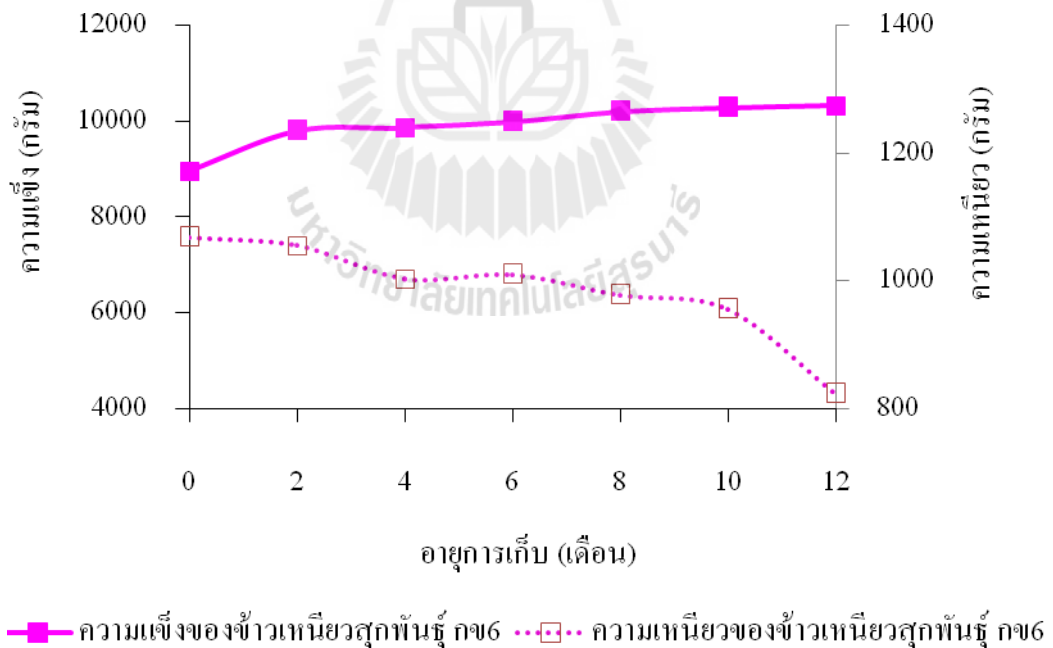
1.5 เนื้อสัมผัสของข้าวสุก

การเตรียมข้าวสุกสำหรับวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของข้าวสุกนั้นได้มีการควบคุมความชื้นของข้าวให้เท่ากัน โดยหุงข้าวด้วยปริมาณน้ำที่เท่ากันในภาชนะปิดสนิท และใช้เวลาการหุงเท่ากับเวลาในการหุงต้มที่หาได้ในเดือนนั้น ซึ่งปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการหุงของข้าวแต่ละพันธุ์หามาจากค่าเฉลี่ยของอัตราการดูดซับน้ำของข้าวใหม่กับอัตราการดูดซับน้ำของข้าวเก่าที่ผ่านการเร่งโดยการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ซึ่งการอบที่สภาวะดังกล่าวตัดแปลงมาจากงานวิจัยของ วินิต ชินสุพรรณ และ ภูมิสิทธิ์วรรณชาติ (2545) ที่พบว่าการอบข้าวที่ 55 องศาเซลเซียสเป็นเวลา เป็นเวลา 26 ชั่วโมง จะทำให้ข้าวขาวดอกมะลิมีสมบัติทางความหนืดเท่ากับข้าวที่มีอายุการเก็บ 6 เดือน ซึ่งปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มคิดเป็นอัตราการดูดซับน้ำ ได้ดังนี้ ข้าวสุพรรณบุรี90 มีค่า 2.25 เท่า ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่า 1.95 เท่า และข้าวเหนียว กข6 มีค่า 1.30 เท่า หลังจากหุงต้มเสร็จแล้วยังได้ตรวจสอบความชื้นของข้าวโดยการชั่งน้ำหนักรวม และตรวจหาความชื้นด้วยวิธีของ AOAC (1997) ซึ่งจะสุ่มตัวอย่างเมล็ดข้าวสุกออกมาวิเคราะห์ความชื้นหลังจากวัดเนื้อสัมผัสเรียบร้อยแล้ว หากปริมาณความชื้นไม่เท่ากับที่ควบคุมก็จะทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ใหม่อีกครั้ง

(ก) ข้าวเจ้า



(ข) ข้าวเหนียว

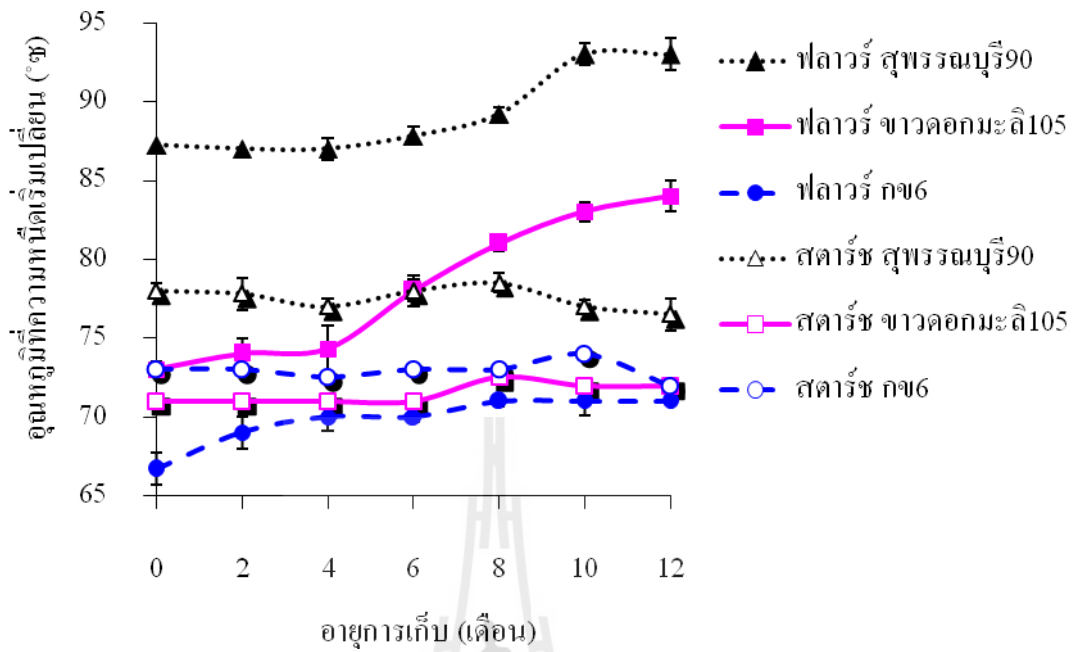


ภาพที่ 8 ค่าความแข็งแรงและความเหนียวของข้าวสุกจาก (ก) ข้าวเจ้า และ (ข) ข้าวเหนียว จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน

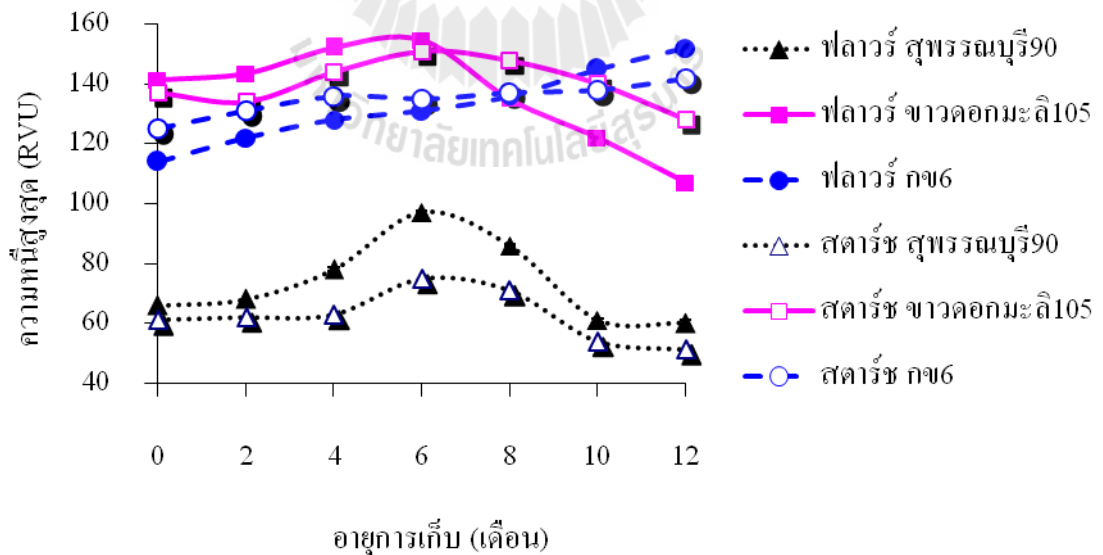
ผลการวิเคราะห์ทางเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าแสดงในภาพที่ 8ก พบว่า ค่าความแข็งของข้าวสุกทั้งสองพันธุ์สูงขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บ แสดงว่าเมล็ดข้าวมีความแข็งแกร่งยิ่งขึ้น ซึ่งกลไกการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวระหว่างการเก็บรักษาที่รายงานโดย Villareal, Suzuki and Juliano (1976) ว่าสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเพิ่มความแข็งแรงของพันธะและแรงเกาะตัวระหว่างไมเซลล์ไขมันอาจเกิดการรวมตัวระหว่างกรดไขมัน-อะมิโลส และภายในโครงสร้างโปรตีน มีจำนวนพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มีผลยับยั้งการพองตัวของเมล็ดสตาร์ช ทำให้เนื้อสัมผัสแข็งร่วน ส่วนทางด้านความเหนียวของข้าวทั้งสองพันธุ์ก็มีแนวโน้มลดลง โดยที่ข้าวสุพรรณบุรี 90 มีการลดลงของค่าความเหนียวน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทั้งนี้การลดลงของค่าความเหนียวในข้าวขาวดอกมะลิ 105 นั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณของข้าวที่ลดลงระหว่างการเก็บรักษา การที่ความเหนียวลดลงแสดงให้เห็นว่าเมล็ดสตาร์ชที่แข็งแกร่งขึ้นจะปลดปล่อยอย่างระหว่งเมล็ดสตาร์ชได้น้อยลงทำให้ความเหนียวของเมล็ดข้าวลดลง และการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างอะมิโลสกับไขมันในขณะที่ทำการหุงต้มซึ่งมีผลในการยับยั้งการพองตัวของเมล็ดสตาร์ช (Sodhi et al., 2003) นอกจากนี้จะเห็นว่าความเหนียวของข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่ามากกว่าข้าวสุพรรณบุรี 90 เพราะว่าเป็นอะมิโลเปกตินจะสามารถพองตัวและยึดหยุ่นได้ดีกว่าโครงสร้างอะมิโลสที่เป็นสายตรง ส่วนความแข็งของข้าวเหนียว (ภาพที่ 8ข) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่เดือนที่ 2 และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนความเหนียวมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ

1.6 สมบัติการเกิดเพสท์

อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยน (pasting temperature, PT) ของฟลาวาร์จากข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ของสตาร์ชไม่เปลี่ยนแปลง บ่งชี้ว่าระหว่งการเก็บรักษาโปรตีน มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง จากผลการศึกษาของ Teo et al. (2000) พบว่า โปรตีนที่สกัดจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษามีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ในการเก็บ โดยปกติโปรตีนนั้นจะละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าสตาร์ช เมื่อโปรตีนถูกทำลายที่อุณหภูมิต่ำก็จะทำให้เมล็ดสตาร์ชพองตัวได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าโปรตีนเล็กน้อย แต่เมื่ออายุการเก็บเพิ่มขึ้นโปรตีนเปิดตัวออกและถูกทำลายได้ซ้ำทำให้การปิดตัวออกไปขัดขวางการควบแน่นของเมล็ดสตาร์ช ซึ่ง Chastill (1990) พบว่า ข้าวที่ผ่านการเก็บจะทำให้โปรตีน มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นการเปิดตัวตัวของโปรตีนเมื่อได้รับความร้อนอาจเกาะที่ผิวเมล็ดสตาร์ชทำให้เมล็ดสตาร์ชไม่สามารถควบแน่นได้จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อทำลายโครงสร้างของโปรตีน

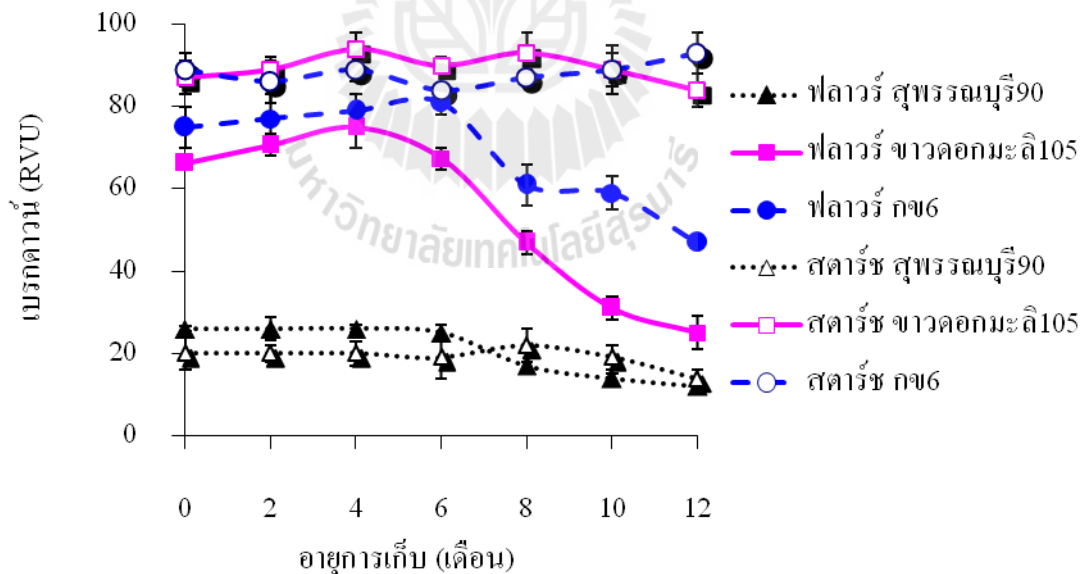


ภาพที่ 9 อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยนของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน



ภาพที่ 10 ความหนืดสูงสุดของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน

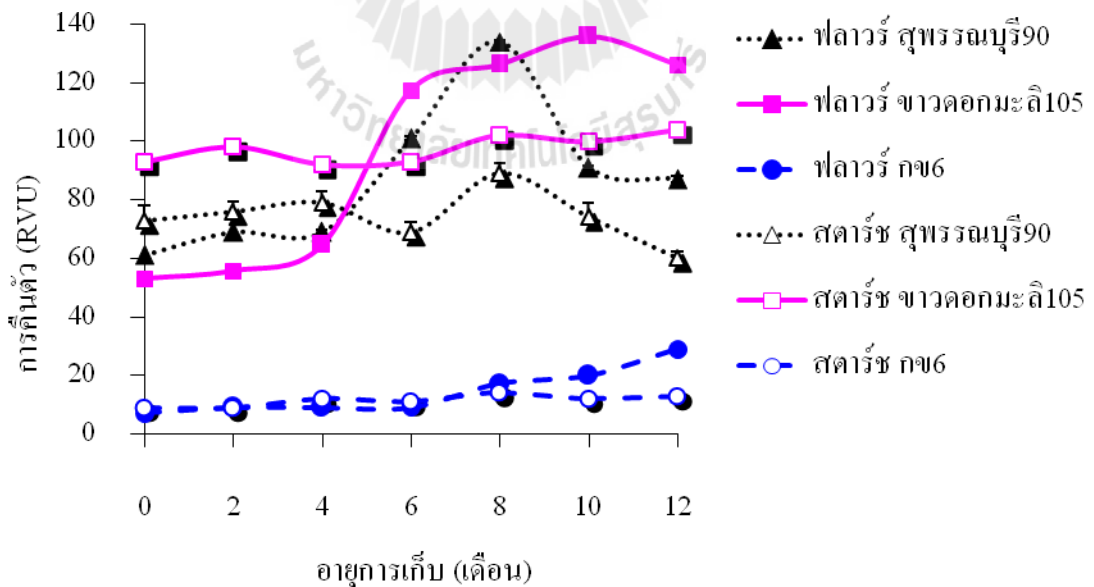
ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity; PV) แสดงในภาพที่ 10 พบว่าค่า PV ของแป้งสตาร์ช ไม่แตกต่างจากข้าวใหม่ แต่ ค่า PV ของแป้งฟลาวร์ข้าวสุพรรณบุรี90 และข้าวดอกมะลิ105 มีแนวโน้มสูงขึ้น จากเดือนที่ 2 ถึงเดือนที่ 6 จากนั้นมีแนวโน้มลดลงจนถึงเดือนที่ 12 เมื่อเทียบกับข้าวใหม่ การเพิ่มขึ้นของค่า PV ของฟลาวร์ข้าวเจ้าทั้งสองพันธุ์อาจเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีน อะมิโลส และอะไมโลเพกตินสายสั้น ซึ่งส่วนเหล่านี้มีขนาดเล็กกว่า เม็ดสตาร์ช (Singh et al., 2000) และจับกับน้ำเกิดเป็นเจลหนืดล้อมรอบเม็ดสตาร์ชจึงขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ส่วนการลดลงหลังจาก 6 เดือน นั้นเกิดจากโปรตีนขัดขวางการดูดน้ำทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวน้อย ส่วนค่า PV ของข้าวเหนียวมีแนวโน้มสูงขึ้นตลอดการเก็บรักษา เพราะเม็ดสตาร์ชซึ่งประกอบไปด้วยอะไมโลเพกตินมากกว่าข้าวเจ้า กิ่งก้านของอะไมโลเพกติน เกิดเจลาคิโนเซชันจะสานตัวเป็น โครงสร้างร่างแหสามมิติอุ้มได้ดีกว่า อะมิโลสสายตรง (Li et al., 1996) ดังนั้นส่วนของการกระจายจึงอุ้มน้ำได้ดีขึ้นเรื่อยๆ หรือพองตัวได้มากตามปริมาณน้ำที่มีในระบบ ในส่วนเหลวหนืดน่าจะลดลงตามการละลายที่ลดลง ซึ่งส่วนนี้เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ง่ายในสภาวะที่มีการกวนตลอดเวลา เมื่อส่วนนี้ลดลง จึงส่งเสริมให้ส่วนกระจายมีความเข้มข้นมากขึ้นทำให้ PV เพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บ



ภาพที่ 11 ค่าเบร็กคาน์ ของแป้งฟลาวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน

ค่าเบรกดาวน์ (breakdown, BD) แสดงในภาพที่ 11 แย่งสตาร์ชมีค่า BD คงที่ แต่แป้งฟลาวร์มีค่า BD ลดลงโดยจะเริ่มลดลงหลังจากการเก็บรักษา 6 เดือน แสดงว่าโปรตีนขัดขวางการแตกตัวของเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชแตกตัวน้อยลง ในสภาวะที่ไม่มีโปรตีนเม็ดสตาร์ชจะแตกตัวง่ายขึ้น ดังจะเห็นได้จากแป้งสตาร์ชมีค่า BD มากกว่าแป้งฟลาวร์ เนื่องจากเมื่อขาดโปรตีนเม็ดสตาร์ชจะเปราะ จึงถูกทำลายง่ายเมื่อได้รับแรงเฉือน ส่งผลให้ BD ต่ำลง (Hamaker and Griffin, 1993) โดยข้าวที่มีค่า BD ลดลงมากที่สุดคือ ข้าวขาวดอกมะลิ105 รองลงมาคือข้าวเหนียว กข6 ซึ่งมีแนวโน้มลดลงใกล้เคียงกัน และข้าวสุพรรณบุรี90 ค่า BD ลดลงน้อยที่สุด สอดคล้องกับการทดลองของ Zhou et al. (2003) ที่พบว่า ข้าวที่มีอะมิโลสต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า BD มากที่สุด

ค่าเซตแบก (setback, SB) หรือค่าการคืนตัว ของแป้งสตาร์ชข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าคงที่ตลอดการเก็บรักษา (ภาพที่ 12) ส่วนแป้งฟลาวร์มีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน คือ แป้งฟลาวร์ข้าวสุพรรณบุรี 90 เพิ่มขึ้นในเดือนที่ 4-6 จากนั้นลดลงในเดือนที่ 9 ส่วนค่า SB ของฟลาวร์ข้าวขาวดอกมะลิ105 และ ข้าวเหนียว กข6 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตั้งแต่เดือนที่ 6 จนถึงเดือนที่ 12 การเปลี่ยนแปลงค่า SB ของแป้งข้าวเหนียวสอดคล้องกับการทดลองของ Noomhorm et al (1997) ที่พบว่า ค่า SB ของข้าวเหนียว กข6 และ กข 8 เก็บที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 เดือน มีค่ามากกว่าที่ 2 เดือน การเพิ่มขึ้นของค่า SB แสดงให้เห็นว่าอะมิโลสและอะไมโลเพกตินที่หลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชหลังจากพองตัว จะกลับมาจัดเรียงตัวกันได้มาก หรือจะมีการรีโทรเกรด (retrogradation) ได้ง่าย (Sowbhagya and Bhattacharyat, 2001)

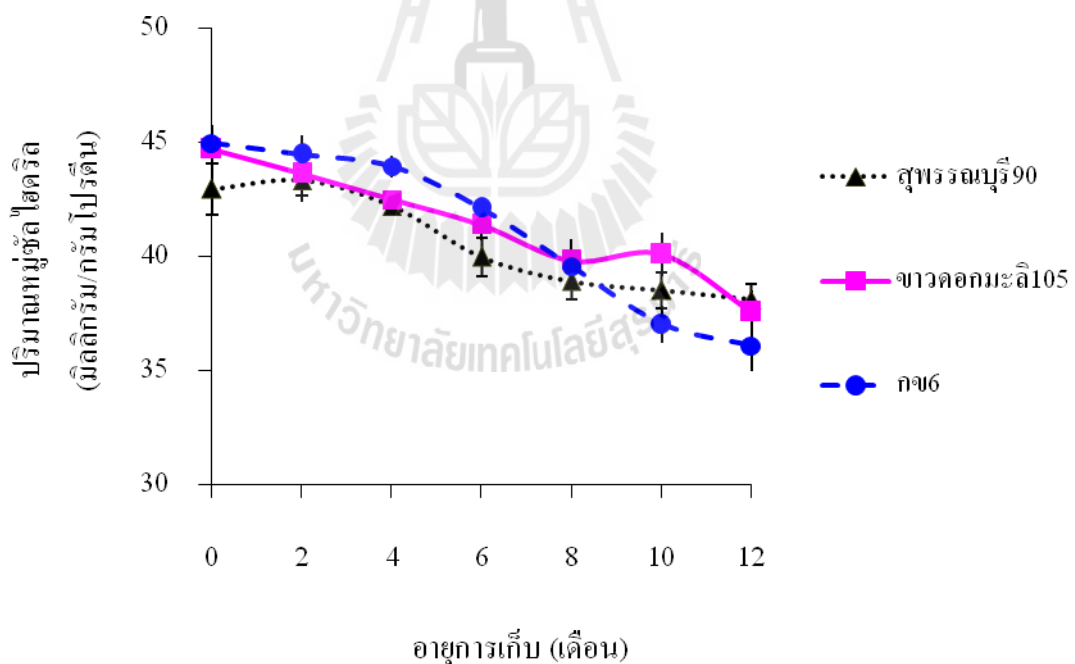


ภาพที่ 12 ค่าการคืนตัวของแป้งฟลาวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน

1.7 ปริมาณหมู่ซัลไฮดริลของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา

หมู่ซัลไฮดริลจะพบบนกรดอะมิโนซิสเทอีน (Cystiene) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับหมู่ซัลไฮดริล เกิดเป็นพันธะไดซัลไฟด์ (-S-S-) ขึ้นมา ถ้าทำปฏิกิริยากับโปรตีนอีกสาย (intermolecular bonding) ทำให้โครงสร้างโปรตีนในแป้งเป็น secondary protein ถ้าทำปฏิกิริยากับโปรตีนในสายเดียวกัน (intramolecular bonding) ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็น loop ภายในสายโปรตีน (Wall, Friedman, Krull, Cavins and Backwith, 1968)

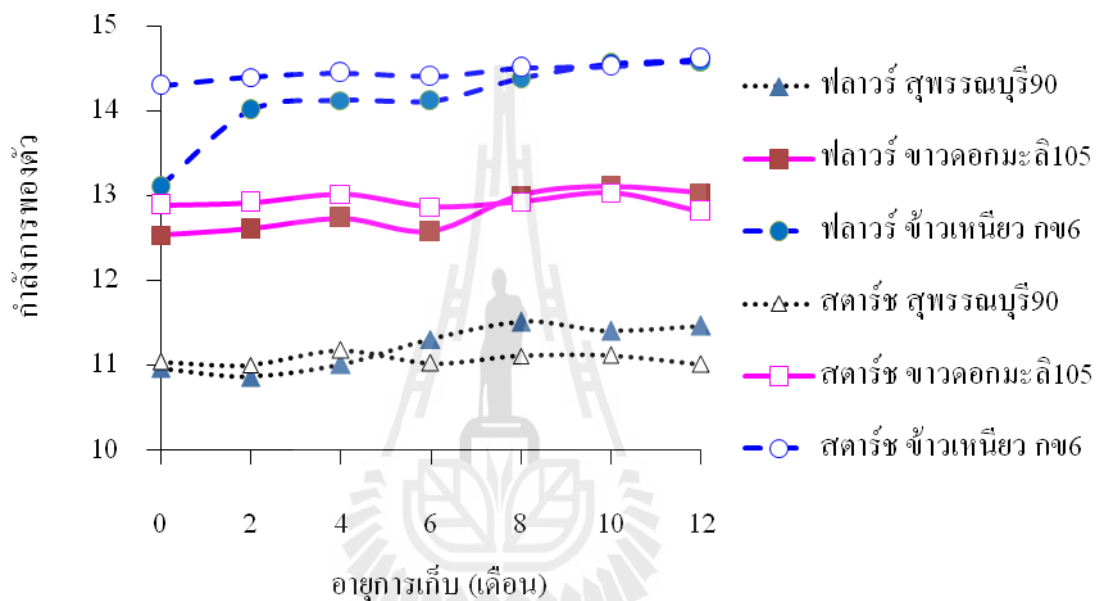
ปริมาณหมู่ซัลไฮดริลในโปรตีนข้าว แสดงในภาพที่ 13 ปริมาณหมู่ซัลไฮดริลจากข้าวทั้งสามพันธุ์มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ การลดลงของหมู่ซัลไฮดริล แสดงถึงโอกาสในการเกิดพันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของจำนวนพันธะไดซัลไฟด์ทำให้ ความสามารถในการละลายของโปรตีนลดลง (Ohno, 2005; Martin and Fitzgerald 2002; Chrastil, 1992) ทั้งนี้โปรตีนที่อยู่บริเวณผิวของเมล็ดสตาร์ช มีผลต่อการพองตัวของเมล็ดสตาร์ช ถ้าโปรตีนละลายได้ลดลงจะทำให้ สตาร์ชพองตัวได้ยากด้วย



ภาพที่ 13 ปริมาณหมู่ซัลไฮดริลของแป้งฟลาวาร์ของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน

1.8 กำลัการฟองตัว ความสามารถในการละลายและอะมิโลสที่ถูกชะ

เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งฟลาวร์และแป้งสตาร์ช ที่ให้ความร้อนอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แล้วปั่นแยกส่วนที่ฟองตัว และส่วนที่ละลายพร้อมทั้งหาปริมาณอะมิโลสในส่วนที่ละลาย พบว่า กำลัการฟองตัวของแป้งสตาร์ชข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าคงที่ตลอดการเก็บรักษา (ภาพที่ 14) แต่ของแป้งฟลาวร์มีค่ามากกว่าข้าวใหม่ ซึ่งให้เห็นว่า ส่วนที่ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในฟลาวร์ คือ สลายอะมิโลส, อะไมโลเปกตินสายสั้นที่ผิวของสตาร์ช โปรตีน และไขมัน รอบๆ เม็ดสตาร์ชเท่านั้น

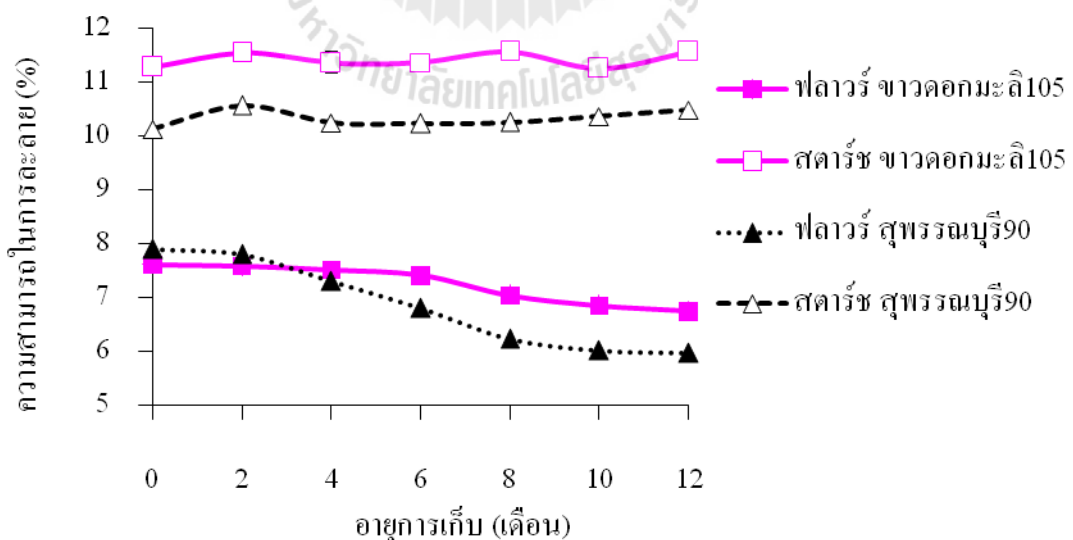


ภาพที่ 14 กำลัการฟองตัวของแป้งฟลาวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ใน อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน

ค่ากำลัการฟองตัวของแป้งฟลาวร์ข้าวสุพรรณบุรี90 มีค่าไม่แตกต่างจาก แป้งสตาร์ช ใน 4 เดือนแรกแต่ในเดือนที่ 6 – 12 มีค่าสูงกว่าแป้งสตาร์ช แต่ค่ากำลัการฟองตัวของแป้งฟลาวร์ ข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียว กข6 มีค่าน้อยกว่าแป้งสตาร์ชในช่วง 0-6 เดือน แล้วมีค่า เพิ่มขึ้นจนเท่ากับแป้งสตาร์ชในเดือนที่ 8-12 นั้นแสดงว่าองค์ประกอบรอบ ๆ เม็ดแป้งจึงมีผลต่อ กำลัการฟองตัวของข้าวแต่ละพันธุ์แตกต่างกัน ทั้งนี้เพราะ โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่มีอะมิโลส ต่างกันจะมีกำลัการฟองตัวการฟองตัวต่างกัน โมเลกุลอะมิโลสไม่มีกิ่งก้านเมื่อเกิดเจลจะสามารถ จัดเรียงตัวกันอย่างใกล้ชิด เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้มาก ขณะที่โมเลกุลของ อะไมโล เพกตินมีกิ่งก้านทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้ยาก ดังนั้นแป้งข้าวเหนียวจึงเกิดการฟอง

ตัวได้เร็ว และมีกำลังการพองตัวมากกว่า ดังนั้นในช่วง 0-6 เดือนของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียว กข6 จึงพองตัวได้มากกว่าแป้งฟลาวัวร์ข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวสุพรรณบุรี90 ตามลำดับ

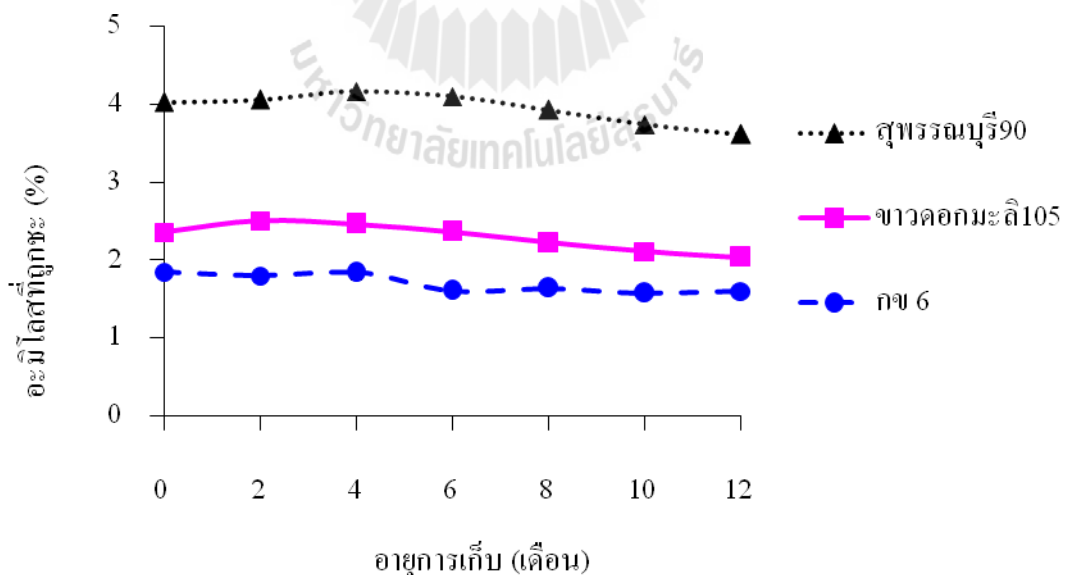
ในช่วงแรกของการเก็บรักษา เมื่อดูจากหมุ่ซัลไฮดริล จะเห็นว่าโปรตีนและของ อะมิโลส และอะมิโลเปกตินรอบนอกเมล็ดสตา์รชน่าจะมีสามารถในการละลายและการพองตัวมากกว่า ช่วงหลังการเก็บรักษา ทำให้ช่วงแรกของการเก็บรักษามีและของอะมิโลสและอะมิโลเปกตินรอบนอกเมล็ดสตา์รช ขัดขวางการพองตัวของเมล็ดสตา์รช (Martin and Fitzgerald, 2002) มีผลให้แป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียว กข6 และแป้งฟลาวัวร์ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีกำลังการพองตัวน้อยกว่าสตา์รช แต่ข้าวสุพรรณบุรี 90 ใน 4 เดือนแรกเมล็ดสตา์รชในแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตา์รช พองตัวได้ใกล้เคียง กำลังการพองตัวของข้าวสุพรรณบุรี90 มีค่าน้อยกว่าข้าวอีก 2 พันธุ์ โครงสร้างเมล็ดสตา์รชอุ้มน้ำได้น้อย ดังนั้นถึงแม้องค์ประกอบรอบ ๆ เม็ดสตา์รชจะแย่งจับน้ำแต่ก็มีน้ำเพียงพอในการพองตัว แต่เมื่ออายุการเก็บมากขึ้น อาจเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างอะมิโลสกับอะมิโลส, อะมิโลสกับอะมิโลเปกติน อะมิโลสกับไขมัน และอะมิโลสกับโปรตีน รอบ ๆ เม็ดสตา์รช และโปรตีนจับกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์มากขึ้น ซึ่งมีผลในการเสริมให้โครงสร้างร่างแหสามมิติของเจลแป้งฟลาวัวร์ข้าวสุพรรณบุรี90 แข็งแรง จึงมีกำลังการพองตัวมากกว่าสตา์รช ส่วนแป้งฟลาวัวร์ ข้าวเหนียว กข6 และแป้งฟลาวัวร์ข้าวขาวดอกมะลิ105 เมื่ออายุการเก็บมากขึ้นมีค่ากำลังการพองตัวเข้าใกล้สตา์รช เพราะทำให้ไม่ขัดขวางการดูดน้ำของเมล็ดสตา์รช



ภาพที่ 15 ความสามารถในการละลายของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตา์รชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน

จากภาพที่ 15 ความสามารถในการละลายของแป้งฟลาวัวร์ข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ โดยข้าวเหนียวลดลงเดือนที่ 8 และข้าวเจ้าทั้งสองพันธุ์ลดลงในเดือนที่ 6 ขณะที่ความสามารถในการละลายของสตาร์ชไม่เปลี่ยนแปลง จะเห็นว่าทั้งแป้งฟลาวัวร์ ข้าวเหนียว มีค่าความสามารถในการละลายมากกว่าสตาร์ช นั่นอาจเป็นเพราะว่าแป้งฟลาวัวร์มีส่วนที่ละลายได้มากกว่าแป้งสตาร์ช ได้แก่ โปรตีน อะมิโลสและอะมิโลเปกตินที่ผิวเมล็ดสตาร์ช แต่ แป้ง ฟลาวัวร์ ข้าวเจ้ามีค่าความสามารถในการละลายน้อยกว่าแป้งสตาร์ช แสดงว่าส่วนที่ละลายได้ในแป้งข้าวเหนียว เมื่ออยู่ในแป้งข้าวเจ้าจะทำหน้าที่เสริมโครงสร้างร่างแหสามมิติของเจลคือเป็นส่วนที่ให้กำลังการพองตัว จึงมีค่าความสามารถในการละลายน้อยกว่าสตาร์ช อย่างไรก็ตาม ค่าความสามารถในการละลายของแป้งฟลาวัวร์ที่ลดลงแสดงถึงว่าส่วนที่ละลายได้กลับกลายเป็นส่วนที่ไม่สามารถละลาย โดยการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน ได้แก่ ปฏิสัมพันธ์ของโปรตีนกับโปรตีน โปรตีนกับอะมิโลสและอะมิโลเปกตินที่ผิวเมล็ดสตาร์ช และอะมิโลสกับอะมิโลเปกตินที่ผิวเมล็ดสตาร์ช

ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะแสดงในภาพที่ 16 ข้าวทั้งสามพันธุ์มีปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะลดลงตามระยะเวลาในการเก็บรักษา เมื่อเทียบเป็นสัดส่วนปริมาณอะมิโลสที่ลดลงต่อปริมาณอะมิโลสเริ่มต้น พบว่า สุพรรณบุรี90 ข้าวดอกมะลิ105 และ ข้าวเหนียว กข6 ลดลงคิดเป็น 10.2% 13.6% และ12.6% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณอะมิโลสของข้าวขาวมะลิ105 ถูกชะออกมากที่สุด อาจเป็นความเปราะบางของโครงสร้างเมล็ดสตาร์ชของข้าวเอง



ภาพที่ 16 ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน

1.9 สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าว

อุณหภูมิในการเริ่มเกิดเจลลิตินในเซชัน (T_0) ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินในเซชัน ($T_c - T_0$) และค่าเอนทัลปี (Enthalpy, ΔH) ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวใหม่และข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา 10 เดือน แสดงในตารางที่ 2 ข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บ 10 เดือน มีค่า T_0 สูงกว่าข้าวใหม่ บ่งชี้ว่าการหลอมของผลิตภัณฑ์ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้น อาจเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้ T_0 ของข้าวที่ผ่านการเก็บมีค่าสูงขึ้น เป็นการเปลี่ยนแปลงในชั้นออสชันฐานภายในเม็ดแป้งหรืออาจเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผิวเม็ดสตาร์ช ซึ่งที่ผิวของเม็ดสตาร์ชนั้นมีอะมิโลสและอะมิโลเพกตินสายสั้น โปรตีนและไขมัน องค์ประกอบเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน ในระหว่างที่มีการเก็บรักษา (Zhou et al., 2002) และจากงานวิจัยของ Teo et al. (2000) และ Ju, Hettiarachchy and Rath (2001) ที่รายงานว่า โปรตีนโอริซินินของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา มีค่า T_0 เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บ จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ T_0 ของแป้งฟลาวัวร์เพิ่มขึ้น ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินในเซชัน ($T_c - T_0$) ของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาของข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าไม่แตกต่างจากข้าวใหม่ แสดงว่าเมื่อ T_0 สูงขึ้น ค่าอุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลิตินในเซชัน (T_c) ก็สูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 1 อุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินในเซชัน (T_0) และช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินในเซชัน ($T_c - T_0$) ของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน

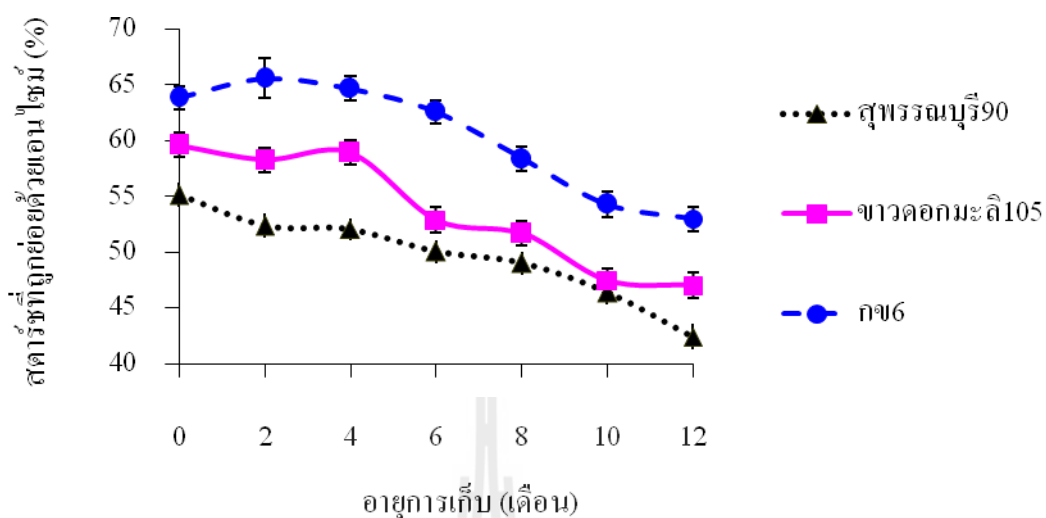
พันธุ์	อายุการเก็บ (เดือน)	T_0	$T_c - T_0$
สุพรรณบุรี 90	0	60.27 ^c	12.22 ^b
	10	61.78 ^b	11.34 ^{bc}
ขาวดอกมะลิ 105	0	62.01 ^{bc}	11.69 ^{bc}
	10	63.13 ^a	10.99 ^c
เหนียว กข6	0	60.29 ^c	14.82 ^a
	10	61.55 ^b	13.72 ^a

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$

T_0 , onset gelatinization temperature

$T_c - T_0$, rang of gelatinization temperature

1.10 ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของข้าว

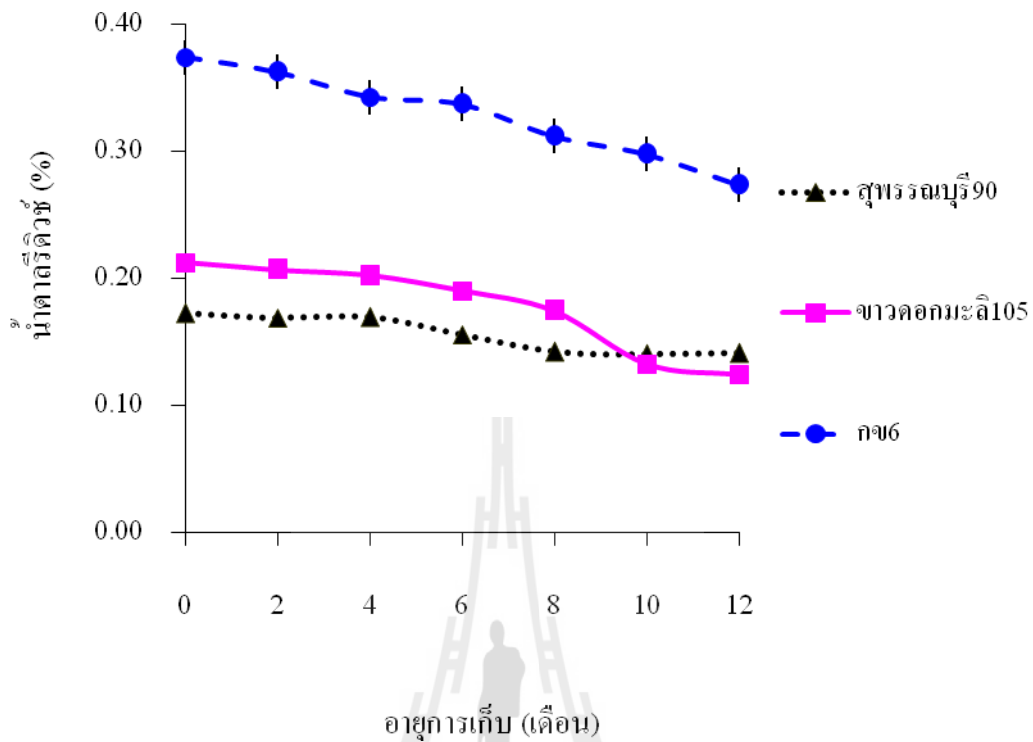


ภาพที่ 17 ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของแป้งพลาว์รจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน

แป้งพลาว์รข้าวจากข้าวใหม่และข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา เมื่อผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมีค่าลดลงตั้งแต่ เดือนที่ 6 อย่างต่อเนื่องจนถึงเดือนที่ 12 (ภาพที่ 17) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ Rehman (2006) ที่พบว่า สตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ของแป้งข้าวที่มีอายุ 6 เดือน มีค่าน้อยกว่าอายุ 3 เดือน จากการที่เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจะทำหน้าที่ย่อยสายอะมิโลสที่ผิวหน้าของเม็ดสตาร์ชเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ช (Gunaratne and Hoover, 2002) เมื่อปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมีค่าลดลงจึงบ่งชี้ว่า โครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลายยกขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษา ซึ่งอาจเป็นเพราะมีการเปลี่ยนแปลงที่ผิวของเม็ดสตาร์ชที่ทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น

1.11 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าว

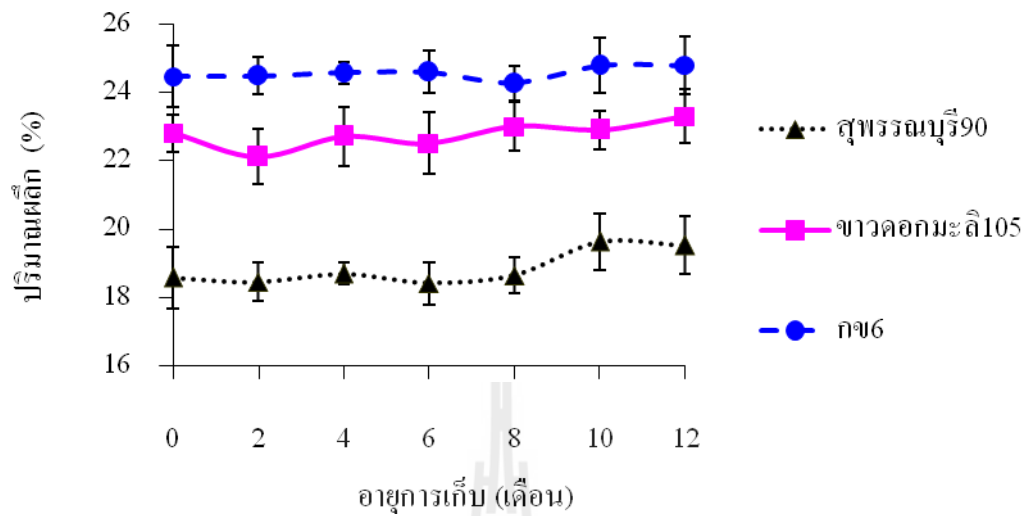
ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการเก็บ ขณะที่ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของแป้งข้าวสุพรรณบุรี 90 ที่ผ่านการเก็บไม่แตกต่างจากข้าวใหม่ ($p > 0.05$) ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ จิรศักดิ์ คงเกียรติจิร และคณะ (2547) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อายุการเก็บรักษา 7 เดือนมีค่าน้อยกว่าข้าวใหม่ และจากการศึกษาของ Cao et al. (2004) ที่พบว่า ปริมาณน้ำตาลซูโครสและกลูโคสของข้าวอายุ 3 เดือนมีค่าน้อยกว่าข้าวอายุ 6 เดือน การเปลี่ยนแปลงน้ำตาลรีดิวซ์อาจบ่งชี้ถึงกิจกรรมของ เอนไซม์อะไมเลสในระหว่างการเก็บ หรือการแตกสลายของสายอะมิโลสหรืออะไมโลเพกติน เนื่องจากการบ่มทางกายภาพ (Chung and Lim, 2004) ทำให้มีน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น ส่วนการลดลงของน้ำตาลรีดิวซ์เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิโนทำให้เกิดสีน้ำตาล (Soponronmarit et al., 2008) ซึ่งจากการทดลองพบว่าขณะที่น้ำตาลรีดิวซ์ลดลง สีเหลือง (b^*) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอัตราการลดลงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวเหนียว กข6 ที่มากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 สัมพันธ์กับอัตราการเพิ่มของค่าสีน้ำตาลของของข้าวเหนียว กข6 ที่มากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ส่วนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวสุพรรณบุรี 90 ที่ไม่เปลี่ยนแปลงนั้นสัมพันธ์กับค่าสีเหลืองที่คงที่ตลอดการเก็บ 12 เดือนด้วย

1.12 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึกของข้าว



ภาพที่ 19 ปริมาณผลึกของแป้งฟลาวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-12 เดือน

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) พบว่าโครงสร้างผลึกของข้าวทั้งสามพันธุ์ยังคงเป็นแบบ A ตลอดการเก็บ คือ XRD pattern มีพีคคู่ของ มุม 2θ ที่ 17° และ 18° และพีคเดี่ยวที่ 23° ปริมาณผลึกของข้าวทั้งสามพันธุ์ไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา ดังภาพที่ 19 ชั้นผลึกหรือส่วนเกลียวคู่ในอะไมโลเพกตินไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการเก็บรักษา นอกจากนี้จะเห็นว่าปริมาณผลึกแปรผกผันกับปริมาณอะมิโลสที่มีในข้าว ซึ่งข้าวเหนียว กข 6 มีปริมาณผลึกมากที่สุด เพราะชั้นผลึกหรือ ส่วนของสายเกลียวคู่ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบนั้นอยู่ในส่วนของอะไมโลเพกติน ดังนั้นข้าวเหนียวซึ่งมีสัดส่วนอะไมโลเพกตินต่ออะมิโลสมากที่สุด จึงมีปริมาณผลึกมากที่สุด รองลงมาคือข้าวเจ้าข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวสุพรรณบุรี 90 ตามลำดับ

2. การเปลี่ยนแปลงลักษณะโปรตีนข้าวขาวดอกมะลิ105 หลังการเก็บรักษา 1 ปี

2.1 ขนาดโมเลกุลของตัวอย่างโปรตีนในฟลาร์ข้าวด้วยอิเล็กโตรโฟรีซิส (SDS-PAGE)

การศึกษาขนาดของโปรตีนเปรียบเทียบก่อนและหลังการเก็บรักษาทำได้โดยใช้เทคนิค (Sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis ;SDS-PAGE) ซึ่งเป็นการแยกโปรตีนตามขนาดโมเลกุล รูปที่ 2 แสดง SDS-PAGE ของตัวอย่างโปรตีนที่สกัดได้จากฟลาร์ 2 ชนิด คือ ฟลาร์ข้าวใหม่ (n) และ ฟลาร์ข้าวเก่า (a) ซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของเมล็ดข้าวในส่วนของเอ็นโดสเปิร์มและเกาะเชื่อมอยู่กับผิวด้านนอกของเมล็ดข้าวอย่างหนาแน่น และยากต่อการสกัดออก (Tanaka, Sugimoto, Ogawa and Kasai, 1980) โดยโปรตีนที่มีปริมาณสูงสุดในข้าว คือกลุ่มของกลูทีนิน มีความสามารถละลายในสารละลายต่าง และการศึกษานี้เน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มโปรตีนหลัก จึงเลือกใช้สารละลาย 10 มิลลิโมลาร์ NaOH ในการสกัด โดยความเข้มข้นระดับนี้ถือเป็นระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมตามการรายงานของ Cardoso, Putaux, Samois และ Silveira ในปี 2007 ว่าความเข้มข้นของด่างที่ใช้สกัดโปรตีนต่ำกว่า 0.24 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงและการจัดเรียงโครงสร้างภายในโมเลกุลของสตาร์ช โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนที่สกัดได้จากทั้งสองตัวอย่าง คือ n และ a ในสารละลายต่างปกติ แล้ววิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี lowry ซึ่งเป็นการตรวจค่าสีน้ำเงิน ซึ่งเกิดปฏิกิริยาของกรดอะมิโนไทโรซีน (Thyrosine) กับสารผสมโมลิบดีต (molybdate) และทังสเตน (tungstate) ในสภาวะต่างที่มีคิวปริกไอออน (Cu^{2+}) (จิรวัดน์, 2549) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าหลังการเก็บรักษานั้นการที่จะสกัดโปรตีนออกจากตัวอย่างข้าวทำได้ยากขึ้น ปริมาณโปรตีนที่สกัดได้ในตัวอย่างฟลาร์ข้าวใหม่จะมีปริมาณมากกว่าฟลาร์ข้าวเก่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Likitwattanasade และ Hongsprabhas ในปี 2010 ที่พบว่าปริมาณโปรตีนที่สกัดได้จากข้าวเก่าที่ผ่านการเร่งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วันมีค่าลดลง ซึ่งที่เป็นเช่นนี้น่าจะเกิดจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง โปรตีนกับโปรตีน หรือระหว่างโปรตีนและสตาร์ช ซึ่งเป็นองค์ประกอบในเมล็ดข้าวเอง โดยในส่วนที่เป็น High molecular weight ของ glutelin มีส่วนของ inter และ intra molecular disulfite รวมถึง hydrophobic interaction ที่มากซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการละลายของ โปรตีนที่ลดลงได้ (Tecson, Esmama, Lontok, และ Juliano (1970) ปริมาณโปรตีนเฉลี่ยที่สกัดได้จากข้าวเก่าเท่ากับ 30 มิลลิกรัม ต่อ กรัมตัวอย่าง ขณะที่ตัวอย่างข้าวใหม่สกัดโปรตีนได้เท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่าง และพบว่าเมื่อนำสารละลายต่างที่มีการผสม SDS มาสกัดโปรตีนออกจากฟลาร์พบว่าสกัดได้ปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณโปรตีนที่สกัดได้จากตัวอย่างฟลาร์วีข้าวด้วยตัวทำละลายที่ต่างกัน

Sample	Extract solution	Alkaline extractable protein (mg/g sample)
New rice flour	10 mM NaOH	66±2.4c
	10 mM NaOH + 1% SDS	86±3.8d
	10 mM NaOH + 5% SDS	81±2.0d
Aged rice flour	10 mM NaOH	30±2.6a
	10 mM NaOH + 1% SDS	69±6.1c
	10 mM NaOH + 5% SDS	54±6.1b

หมายเหตุ: a, b, c, d คือสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแนวตั้งจากน้อยไปมาก หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

และเมื่อพิจารณาในภาพที่ 19 แสดงแผ่น SDS-PAGE เปรียบเทียบกันระหว่างแถบโปรตีนจากฟลาร์วีข้าวเก่า คือ a0 กับแถบโปรตีนจากฟลาร์วีข้าวใหม่ คือ n0 ที่สกัดด้วยสารละลายต่าง ซึ่งใช้ปริมาณโปรตีนเริ่มต้นในการ load เท่ากันในทุก 2 ตัวอย่าง คือ 25 ไมโครกรัมโปรตีน โดยทั่วไปจะสังเกตการกระจายตัวของโปรตีนได้จากบริเวณที่ติดสีน้ำเงินของสีย้อม coomassie blue R-250 บนแผ่นเจล ซึ่ง ณ บริเวณใดที่ติดสีน้ำเงินเข้มจะบ่งบอกได้ว่าบริเวณนั้นมีกลุ่มโปรตีนกระจุกตัวอยู่หนาแน่น และสามารถทราบขนาดโมเลกุลของโปรตีนที่ปรากฏอยู่บนแผ่น SDS-PAGE ได้จากการแทนค่าระยะทางการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (R_f) ที่คำนวณได้จาก อัตราส่วนระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของแถบโปรตีนต่อระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งหมด แล้วแทนค่าลงในสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าล็อกขนาดโมเลกุลของโปรตีนมาตรฐาน ($\log MW$ of standard protein) กับระยะทางการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของแถบโปรตีนมาตรฐาน (R_f) โปรตีนที่สกัดได้ในฟลาร์วีข้าวซึ่งถือเป็นโปรตีนกลูทีลินเนื่องจากสกัดด้วยสารละลายต่างนั้นประกอบด้วยที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 200 กิโลดาลตัน และเล็กมากจนต่ำกว่า 14.4 กิโลดาลตันด้วย จากรายงานการวิจัยจำนวนมาก ที่ศึกษาลักษณะภาพรวมของโปรตีนโดยใช้เทคนิค SDS-PAGE ซึ่งพบว่าสัดส่วนของโปรตีนที่เป็น storage proteins ในข้าวมีความแตกต่างกันในข้าวแต่ละพันธุ์ (Yang, Shem, Huang, He and Wu, 2005; Kusama, Yangi and Iwamoto, 1984; Zhan and Lin, 1991) แสดงว่าโปรตีนจากตัวอย่างข้าวที่ใช้ในการวิจัยนี้มีรูปแบบที่แสดงด้วย SDS-PAGE แตกต่างจากข้าวพันธุ์อื่น ๆ เช่นกัน ซึ่งจากผลการวิจัยก่อนหน้าของ Paraman, Hettiarachchy, Schaefer, และ Beck ในปี 2006 แสดง SDS-PAGE ของโปรตีนในข้าวที่สกัดด้วยสารละลายต่างโปรตีนที่สกัดได้มีขนาดโมเลกุลหลากหลาย

โดยปรากฏเห็นแถบโปรตีน 6 แถบหลัก คือ มีขนาดในช่วง 70-97 กิโลดาลตัน โดยแถบหลักคือ 97, 45, 33, 21, 14, 7 โดยที่ 33 กิโลดาลตัน เป็นแถบโปรตีนที่มีค่า density สูงสุด ในขณะที่ในปี 1991, Sugimoto, Kunisuke และ Kasai ซึ่งศึกษาโปรตีนกลูติลินในข้าวพันธุ์ Koshihikari พบว่าจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ขนาด 64 กิโลดาลตัน ขนาด 130 กิโลดาลตัน และกลุ่ม high molecular mass proteins คือมีขนาดใหญ่กว่า 130 กิโลดาลตันขึ้นไป

หลังจากการเก็บรักษาขนาดของโมเลกุลโปรตีนนั้นมีการเปลี่ยนแปลง ดังจะเห็นได้จากแถบโปรตีนทั้งสองมีรูปแบบที่แตกต่างกัน แยกออกเป็น 2 จุดหลัก ๆ คือ จุดต่างจุดแรก พบการลดลงของกลุ่มโปรตีนโมเลกุลขนาดตั้งแต่ 57 ถึง 21 กิโลดาลตัน ในช่วง r6-r11 ใน a0 แสดงได้จากแถบสีน้ำเงินที่จางกว่า n0 และจุดแตกต่างจุดที่ 2 คือ จะพบเห็นโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลมากกว่า 200 กิโลดาลตัน ติดค้างอยู่บริเวณด้านบนและบริเวณส่วนของ stacking เจล รวมไปถึงบริเวณด้านบนของ running เจล โดยอยู่ในช่วง r1 ถึง r3 โดยแถบสีน้ำเงินของตัวอย่าง a0 นั้นเข้มกว่า n0 ซึ่งแสดงถึงปริมาณโปรตีนขนาดใหญ่ในตัวอย่างข้าวเก่าที่มากกว่าตัวอย่างข้าวใหม่ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chrastil และ Zarins, 1992 รายงานว่า ข้าวเก่าเมื่อสกัดโปรตีนนำมาวิเคราะห์ขนาดโมเลกุลพบว่า กลุ่มโปรตีนกลูติลินที่มีขนาดเล็กเป็น low molecular weight peptide subunit นั้นจะลดลง ในขณะที่กลุ่มโมเลกุลใหญ่พวก high molecular weight มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน และ Ohno, Tomatsu, Toeda และ Ohisa, 2007 พบการลดลงของโปรตีนขนาดเล็ก (21 และ 32 กิโลดาลตัน) มีค่าลดลง และ โปรตีนขนาดใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้น (48, 99 และ 170 กิโลดาลตัน) ในตัวอย่างข้าวเก่าพันธุ์ Akitakomachi

จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่าในระหว่างการเก็บรักษาข้าวนั้น เกิดการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน โดยโปรตีนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถเกิดการเกาะกลุ่ม หรือมีการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลได้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้กลุ่มโปรตีนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นได้ภายหลังการเก็บรักษาได้ อย่างไรก็ตามพบว่า ปริมาณโปรตีนทั้งหมดในตัวอย่างฟลาร์ข้าวที่ได้จากการวิเคราะห์โปรตีนในเบื้องต้นนั้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7 เปอร์เซ็นต์ (ไม่ได้แสดงข้อมูล) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณโปรตีนทั้ง 2 ตัวอย่างที่สกัดด้วยต่าง แสดงให้เห็นว่า ยังมีโปรตีนบางส่วนที่ยังติดค้างอยู่กับส่วนของเม็ดสตาร์ชทั้งที่บริเวณผิวหรือภายในเม็ด-สตาร์ช ตกลงและปะปนอยู่ในส่วนของตะกอนแป้งไม่หลุดออกมาภายหลังขั้นตอนการปั่นเหวี่ยง ซึ่งน่าจะเป็นในส่วนของโปรตีนที่ผิวของสตาร์ชที่มีการเชื่อมกันค่อนข้างแน่นหนาที่บริเวณพื้นผิวหรือสายโพลิเมอร์ของสตาร์ช ซึ่งของสันนิษฐานนี้สอดคล้องกับงานกลุ่มของนักวิจัย Cagampang, Cruz, and Espiritu, 1996, Mitsuda, Yasumoto, Murakami, Kusano and Kishida, 1967, Del Rosario, Briones, Vidal and Juliano, 1968 และ Juliano and Boulter, 1976 อธิบายไว้ว่า โปรตีน อัลบูมิน และ โกลบูลิน จะถูกกำจัดออกไปหมดในขั้นตอนการขัดสีข้าวแล้ว ซึ่งจะกระจายตัวอยู่บริเวณชั้นอนุโรน

(Aleurone layer) ขณะที่โปรตีนกลูทีลิน ซึ่งเป็นโปรตีนขนาดใหญ่กระจายอยู่ภายในส่วนของเอนโดสเปิร์ม โดยอยู่ในรูปของ protein bodies รูปร่างกลมขนาดต่าง ๆ นั้น จะเชื่อมกับเม็ดสตาร์ชอย่างแข็งแรงและแน่นหนาด้วยพันธะไดซัลไฟด์และ/หรือแรงไฮโดรโฟบิก (Beechtel and Pomeranz, 1978; Tanaka, Resurreccion, Juliano and Bechtel, 1978) จึงยากที่จะสกัดออกให้หมดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ NaOH

ขณะที่เมื่อทำการสกัดด้วยสารละลายต่างที่มีการเติม 1 หรือ 5% SDS ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ปริมาณของโปรตีนที่สกัดได้ในตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลจากคุณสมบัติของ SDS ที่เติมเข้าไปนั้น เป็นสารดิเทอร์เจนต์ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งสามารถจับกับโปรตีนในลักษณะไมเซล (micelle) โดยจะหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าสู่ด้านในเพื่อจับกับโปรตีน และหันส่วนที่ชอบน้ำเข้าสู่สารละลาย ดังนั้นจึงสามารถทำให้โปรตีนละลายในสารละลายได้เพิ่มขึ้น (จิรวัดน์ ขงสวัสดิกุล, 2549 โปรตีนอาหาร) ทั้งต่างและ SDS ล้วนมีคุณสมบัติในการละลายโปรตีนออกจากฟลาร์วข้าว (Maningat and Juliano, 1979) ดังนั้นปริมาณโปรตีนที่สกัดได้เพิ่มมากขึ้น จึงน่าจะเป็นผลร่วมกันระหว่างสารสองชนิด คือ ต่างและ SDS นั้นเอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Juliano และ Boulter ในปี 1976 ซึ่งรายงานว่าการสกัดโปรตีนโดยใช้สารละลาย 0.1 โมลาร์ NaOH และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ SDS ที่มีการเติม 0.6% BME ทำให้ปริมาณโปรตีนที่สกัดออกมาได้มีค่าสูงถึง 94-98 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีการรายงานถึงผลการใช้เอนไซม์โปรตีนเนส สำหรับใช้ในการสกัดโปรตีนทำให้ผลการสกัดโปรตีนในฟลาร์วข้าวที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะความเฉพาะเจาะจงที่สูงของเอนไซม์ในการย่อยโปรตีน ทำให้โปรตีนที่อยู่ในส่วนของฟลาร์วละลายออกมามากขึ้น ซึ่งของดีของการใช้เอนไซม์ คือ ระดับความเข้มข้นของเอนไซม์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชเลย แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ โปรตีนเนสมีข้อเสียในเรื่องค่าใช้จ่ายในการซื้อเอนไซม์มีค่าสูง และจะได้สตาร์ชที่มีความบริสุทธิ์ต่ำเนื่องจากมีโปรตีนสเปปนอยู่ (Lugay and Juliano, 1965)

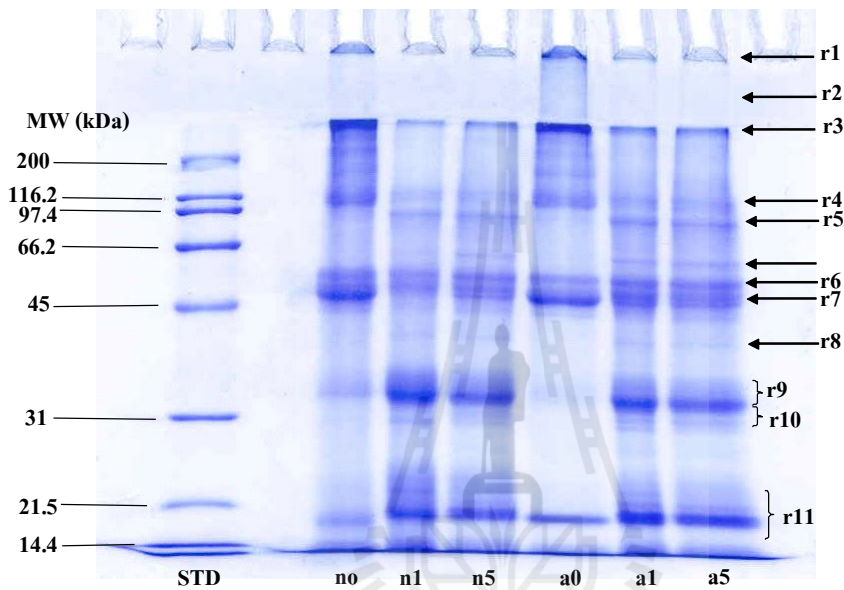
เมื่อพิจารณาผล SDS-PAGE ของโปรตีนที่สกัดด้วย สารละลายต่าง 10 มิลลิโมลาร์ ที่เติม SDS ได้แก่ แถบโปรตีน n1 n5 a1 และ a5 แสดงถึงลักษณะที่แตกต่างจากแถบโปรตีนในตัวอย่าง n0 และ a0 คือ กลุ่มโปรตีนโมเลกุลขนาดใหญ่กว่า 200 กิโลดาลตันที่เคยปรากฏอยู่นั้นจะหายไป และกลุ่มโปรตีนขนาด 57 กิโลดาลตันมีปริมาณลดลง แต่ปรากฏแถบโปรตีนขนาดโมเลกุล 30 ถึง 37 และ 20 ถึง 27 กิโลดาลตันแทน ซึ่งเมื่อพิจารณาที่กลุ่มของขนาดโมเลกุลที่มีในตัวอย่างจะเห็นว่าให้ค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับการรายงานของ Yamagata และ Tanaka, 1982 ที่ว่าในโปรตีนที่สกัดจากสารละลายต่างนั้น มีขนาดโมเลกุลเท่ากับ 37-39 กิโลดาลตัน ซึ่งเป็น acidic subunits และ 22-23

กิโกลดาลตัน ซึ่งเป็น basic subunits รวมถึงโปรตีนกลูติลิน (proglutelin) เกิดจากการรวมกลุ่มกันของสองกลุ่มแรก มีขนาดเท่ากับ 57 กิโกลดาลตัน โดยทั้ง 3 กลุ่มจัดเป็นโปรตีนกลูติลิน

ทั้งนี้ SDS ที่เติมเข้าไปใช้ในการสกัดโปรตีนนั้นเป็น anionic detergent ที่มีโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะซึ่งสามารถทำลายอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก ที่ถือว่าเป็นแรงกระทำที่สำคัญในการเชื่อมสายโปรตีนและยังมีส่วนในการเสถียรโครงสร้างของโปรตีน (จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล, 2549 โปรตีนอาหาร) แรงไฮโดรโฟบิกนี้เกิดจากการเชื่อมกันของกรดอะมิโนไฮโดรโฟบิกที่มีอยู่ในโครงสร้างของโปรตีน และ Wen และ Luthe (1985) อธิบายว่าในโปรตีนกลูติลิน (โปรตีนที่ละลายในสารละลายต่าง) ที่สกัดจากข้าวมีกรดอะมิโน glutamic acid/glutamine, aspartic acid/asparagines, arginine, glycine และ alanine ในปริมาณที่สูง โดยกลุ่มของ amine groups จาก glutamine และ โซ่ข้างของ asparagines จะส่งเสริมการเกาะกลุ่มกันของโปรตีน glutelin สอดคล้องกับการศึกษาของ Juliano, 1994 พบว่าโปรตีนในข้าวมีส่วนของกรดอะมิโนไฮโดรโฟบิก จำพวก อะลานีน ไอโซลิวซีน ลิวซีน เมทไทโอนีน วาลีน และฟีนิลอะลานีน ประกอบอยู่ด้วย แสดงว่าโปรตีนขนาดโมเลกุลเล็กที่สกัดได้ส่วนหนึ่งและโปรตีนโมเลกุลใหญ่ที่พบมากในตัวอย่างข้าวเก่าจากการเกาะหรือเชื่อมกันของโปรตีนขนาดเล็กในตัวอย่าง a0 นั้นถูกเชื่อมกันด้วยแรงไฮโดรโฟบิก

เมื่อพิจารณาให้ดูภายในกลุ่มของแถบโปรตีนที่สกัดด้วยสารละลายต่าง 10 มิลลิโมลาร์ NaOH ที่มีการเติม 1 หรือ 5% SDS โดยหากเปรียบเทียบระหว่างแถบโปรตีนที่สกัดได้จากข้าวเก่าได้แก่ a1 และ a5 กับแถบโปรตีนที่สกัดได้จากข้าวใหม่ ได้แก่ n1 และ n5 นั้น จะสังเกตว่าแม้ผลการใช้ SDS จะทำให้โปรตีนโมเลกุลใหญ่ที่เกิดการเชื่อมกันด้วยแรงไฮโดรโฟบิกได้มีขนาดเล็กลงได้แล้วแต่ยังสามารถเห็นกลุ่มโปรตีนโมเลกุลใหญ่ ตั้งแต่ 200 กิโกลดาลตัน (r3 ถึง r4) รวมถึงกลุ่มโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากับ 57 กิโกลดาลตัน (r6 ถึง r7) ในตัวอย่าง a1 และ a5 มากกว่าตัวอย่าง n1 และ n5 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่า นอกจากแรงไฮโดรโฟบิกที่พบแล้วว่ามีส่วนสำคัญต่อการเชื่อมกันของโปรตีนภายหลังการเก็บแล้วนั้น ยังน่าจะมีปัจจัยอื่นที่ทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างโมเลกุลของโปรตีนกับโปรตีนอื่นข้างเคียงได้ ซึ่งน่าจะเกี่ยวข้องกับการเกิดพันธะเคมีอื่น ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ภายหลังการเก็บรักษา โดยโปรตีนกลูติลินในข้าวมีกรดอะมิโนซิสทีอีน ซึ่งมีหมู่ไทออลอยู่ในโครงสร้าง (Juliano, 1985) ในอัตราส่วนที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับโปรตีนชนิดอื่น ๆ ซึ่งสามารถเกิดการออกซิเดชันของสายโพลีเปปไทด์ 2 สายที่มีกรดอะมิโนซิสทีอีนซึ่งมีหมู่ไทออล (-SH) ในรูปแบบของพันธะไดซัลไฟด์ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมและการซ้อนทับกันของโปรตีน เป็นโครงสร้างสามมิติซึ่งมีความเสถียร (Creighton, 1986; Doig and Williams, 1991) ดังนั้นพันธะเคมีที่แข็งแรง มีส่วนสำคัญต่อการเสถียรโครงสร้างของโปรตีนโดยทั่วไป รวมถึงโปรตีนกลูติลินในข้าว และเป็นพันธะที่ใช้ในการเชื่อมระหว่างสายหรือโมเลกุลของโปรตีนที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกันน่าจะ

เป็นพันธะไดซัลไฟด์ โดยพันธะไดซัลไฟด์นี้จะสามารถถูกทำลายได้ด้วยการเติมสารรีดิวซิงซิงซ์ชนิดต่าง ๆ (Creighton, 1986)



ภาพที่ 20 SDS-PAGE pattern ของตัวอย่างโปรตีนที่ได้จากฟลาร์ข้าวใหม่ (n) และเก่า (a) โดยใช้ 10 mM NaOH ไม่มีหรือมี 1% และ 5% SDS เป็นตัวสกัด (STD = Standard marker proteins; n0 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; n1 และ n5 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS; a0 คือโปรตีนในข้าวเก่าที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; a1 และ a5 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS ที่ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 12.5 เปอร์เซ็นต์ในทริตเมนต์บัฟเฟอร์ที่ไม่เติม BME

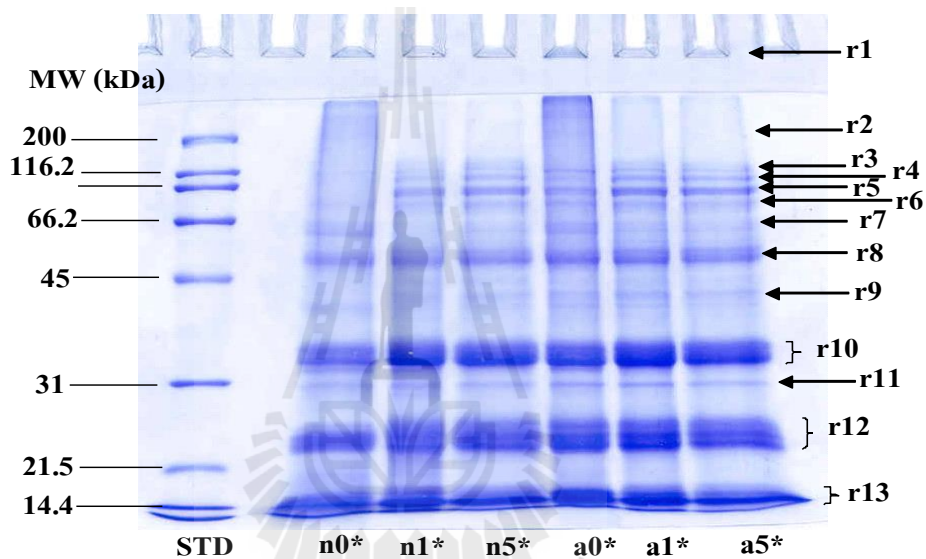
ดังนั้นจึงนำมาสู่ข้อพิสูจน์ว่าพันธะไดซัลไฟด์จะเป็นพันธะที่เชื่อมโมเลกุลโปรตีนกับโปรตีนเข้าด้วยกัน จนส่งผลให้เกิดโปรตีนโมเลกุลขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างข้าวเก่าหรือไม่ ซึ่งอธิบายได้จากภาพที่ 21 แสดง SDS-PAGE ของโปรตีนจากข้าวใหม่และข้าวเก่าสกัดด้วยสารละลายต่าง 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่มีการเติม และมีการเติมสารละลาย SDS ที่ความเข้มข้น 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยโปรตีนที่สกัดได้นี้จะถูกผสมกับสารละลายทริตเมนต์บัฟเฟอร์ที่มี 10 เปอร์เซ็นต์ β -mercaptoethanol (BME) ซึ่งเป็นสารรีดิวซิงซ์มีคุณสมบัติในการตัดหรือทำลายพันธะไดซัลไฟด์

ของโปรตีน ดังนั้นโปรตีนโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดจากการเชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์จะถูกตัด ให้เป็นโปรตีนหน่วยย่อยที่มีขนาดเล็กลง

โดยเมื่อพิจารณาที่แถบโปรตีน a0* ภาพที่ 21 ที่สกัดด้วยสารละลาย 10 มิลลิโมลลาร์ NaOH ซึ่งผสมกับทรिटเมนต์บัฟเฟอร์ที่มีการเติม BME ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำลายพันธะไดซัลไฟด์ทำให้โปรตีนที่เชื่อมกันอยู่เกิดการแยกตัว (Zhou, Robards, Helliwell and Blanchard, 2003) เปรียบเทียบกับ a0 ในภาพที่ 20 ซึ่งเป็นโปรตีนสกัดที่ผสมกับทรिटเมนต์บัฟเฟอร์ที่ไม่มีการเติม BME ก็จะเห็นว่ากลุ่มโปรตีนโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เคยพบอยู่ในส่วนของ stacking และที่บริเวณส่วนบนสุดของ running เจลซึ่งเชื่อมต่อกับส่วนปลายสุดของ stacking เจล ซึ่งพบใน a0 นั้น ไม่ปรากฏแถบโปรตีนดังกล่าวในตัวอย่าง a0* ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ผสมกับทรिटเมนต์บัฟเฟอร์ที่มี BME ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการวิธีการเตรียมตัวอย่างที่ผสมกับทรिटเมนต์บัฟเฟอร์ที่มี BME เมื่อต้องนำสารละลายผสมไปให้ความร้อนก่อน load ตัวอย่าง ความร้อนที่ให้อาจเป็นเหตุให้พันธะและแรงที่ใช้ในการเสถียรโครงสร้างของโปรตีนบางส่วนถูกทำลายไปซึ่งน่าจะเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงน้อย ได้แก่พันธะไฮโดรเจนและแรงไฮโดรโฟบิก โดยไปปรากฏเป็นแถบโปรตีนที่ชัดเจนขึ้นหลายแถบบนแผ่นเจล SDS-PAGE สามารถแยกออกเป็น 4 ช่วงหลัก ๆ คือ พบที่โมเลกุล 115 ถึง 79 กิโลดาลตัน 50 ถึง 57 กิโลดาลตัน 30 ถึง 38 กิโลดาลตัน และ 20 ถึง 28 กิโลดาลตัน โดยใน a0* และ a0* แสดงเห็นว่าโปรตีนโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สกัดได้จากตัวอย่างทั้งสองนี้ประกอบขึ้นจากหน่วยย่อยซึ่งเป็นโปรตีนขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะของแถบโปรตีนที่มาจาก โปรตีนสกัดด้วยสารละลายต่างที่มีการเติม SDS และใช้ทรिटเมนต์บัฟเฟอร์ที่มี BME ผสมกับโปรตีนก่อนการฉีดตัวอย่าง ในภาพที่ 21 กับลักษณะของแถบโปรตีนที่สกัดด้วยสารละลายต่างที่เติม SDS แต่ใช้ทรिटเมนต์บัฟเฟอร์ที่ไม่เติม BME ในภาพที่ 20 ที่ระดับความเข้มข้นของ SDS เท่ากัน พบว่าใน a1* และ a5* ในภาพที่ 21 นี้กลุ่มโปรตีนขนาดโมเลกุล ตั้งแต่ 57 กิโลดาลตันขึ้นไป จนถึงกลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีมากกว่า 200 กิโลดาลตันไปที่เคยพบมากในแถบ a1 ถึง a5 (แถบสีน้ำเงินเข้มจากภาพที่ 20) มีปริมาณลดลงอย่างมาก (แถบสีน้ำเงินจางจนเกือบไม่พบ) ในทางตรงกันข้ามจะปรากฏเป็นแถบโปรตีนหนาแน่นมากในช่วงขนาดโมเลกุล 30 ถึง 36 กิโลดาลตันและ 20 ถึง 27 กิโลดาลตันแทน แสดงให้เห็นว่าหลังการเก็บข้าวโปรตีนที่อยู่ภายในเมล็ดมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นได้จากหน่วยย่อยขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกันด้วย แรงไฮโดรโฟบิก และพันธะไดซัลไฟด์นั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sugimoto และ คณะฯ ในปี 1991 ที่พบว่าโปรตีนกลูติลินขนาดใหญ่เท่ากับ 130 กิโลดาลตันและ กลุ่ม High molecular mass proteins ที่แยกได้จะแบ่งข้าวพันธุ์ Koshihikari นั้นเกิดจากการรวมตัวกันของโปรตีนที่เป็นหน่วยย่อยเล็ก ๆ จำนวนหลายโมเลกุล

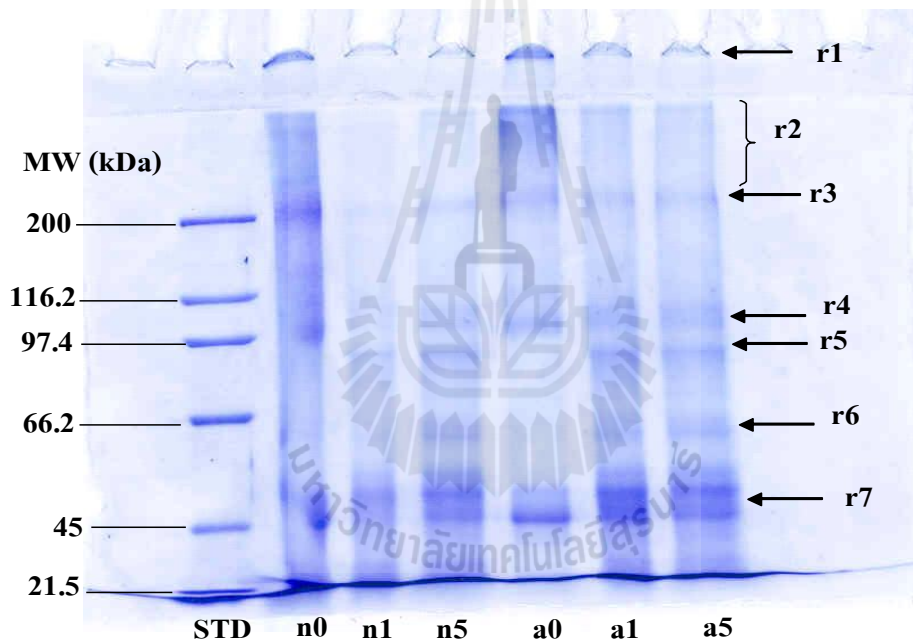
เมื่อพิจารณาภาพที่ 20 ซึ่งเป็น SDS-PAGE ที่ใช้ความเข้มข้นของอะคริลาไมด์เท่ากับ 12.5% จะสังเกตเห็นการอัดตัวกันแน่นของโปรตีนขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า 200 กิโลดาลตันอยู่บริเวณด้านบน running เจล ทำให้ไม่สามารถเห็นการแยกกันอย่างชัดเจนของโปรตีนขนาดใหญ่ ทั้งนี้เป็นผลจากการที่โปรตีนมีโมเลกุลใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของแผ่นเจลทำให้กระจุกตัวกันอยู่บริเวณด้านบนไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านลงสู่แผ่นเจลที่อยู่ด้านล่างได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับให้ขนาดของรูพรุนในแผ่นเจลใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 21 SDS-PAGE pattern ของตัวอย่างโปรตีนที่ได้จากฟลาวัวร์ข้าวใหม่ (n) และเก่า (a) โดยใช้ 10 mM NaOH ไม่มีหรือมี 1% และ 5% SDS เป็นตัวสกัด (STD = Standard marker proteins; n0* คือ โปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; n1* และ n5* คือ โปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS; a0* คือ โปรตีนในข้าวเก่าที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; a1* และ a5* คือ โปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS ที่ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 12.5 เปอร์เซ็นต์ ในทริตเมนต์บัฟเฟอร์ที่เติม BME

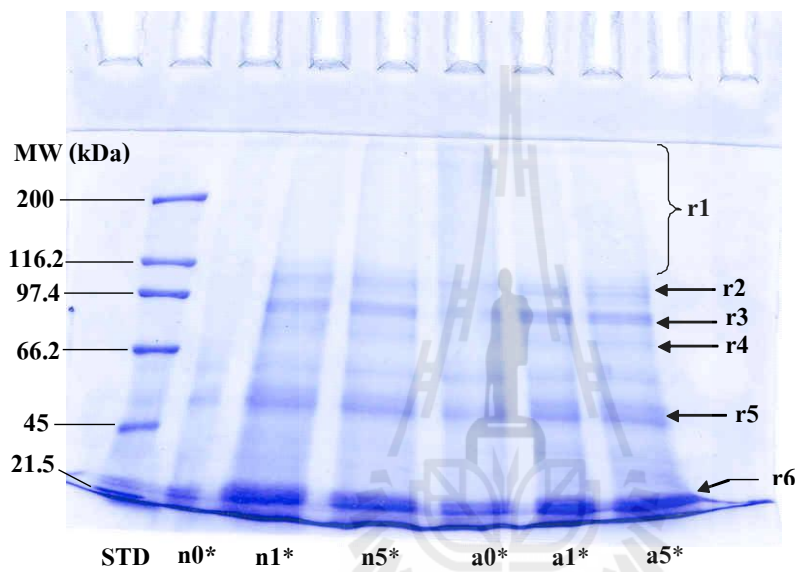
โดยการลดสัดส่วนความเข้มข้นของอะคริลาไมด์ในส่วน running เจล จาก 12.5% ให้มีค่าเท่ากับ 7.5 เปอร์เซ็นต์เพื่อให้กลุ่มโปรตีนขนาดใหญ่เหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ลงมาสู่แผ่นเจลด้านล่าง

และเกิดการคัดแยกโปรตีนตามขนาดโมเลกุลได้ดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 22 พบว่ามีการกระจุกตัวของโปรตีนขนาดใหญ่ที่บริเวณด้านบนของ running เจลหายไป โดยจะสามารถเห็นแถบโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลตั้งแต่ 45 กิโลดาลตัน ขึ้นไปแยกออกจากกันเป็นแถบได้อย่างชัดเจน ทำให้เห็นความแตกต่างและระบุนขนาดของโปรตีน ได้ถูกต้องชัดเจนมากขึ้นด้วย โดยพบว่าแถบโปรตีนที่ได้จากตัวอย่างข้าวเก่ายังมีความเข้มกว่าแถบโปรตีนจากข้าวใหม่ ซึ่งแสดงถึงโปรตีนข้าวเก่ามีส่วนที่โปรตีนโมเลกุลใหญ่ใหญ่มากกว่านั่นเอง โดยสังเกตจากโปรตีนที่แยกได้ชัดเจนซึ่งมีขนาดประมาณ 48 60 82.5 100 กิโลดาลตันตามลำดับ และนอกจากนี้ยังพบโปรตีนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่า 200 กิโลดาลตัน โดยในตัวอย่างโปรตีนข้าวเก่าจะปรากฏแถบสีน้ำเงินที่มีความเข้มกว่าในตัวอย่างข้าวใหม่ แสดงว่าโปรตีนดังที่กล่าวมานี้จะพบได้มากในตัวอย่างข้าวเก่า



ภาพที่ 22 SDS-PAGE pattern ของตัวอย่างโปรตีนที่ได้จากฟลาร์ข้าวใหม่ (n) และเก่า (a) โดยใช้ 10 mM NaOH ไม่มีหรือมี 1% และ 5% SDS เป็นตัวสกัด (STD = Standard marker proteins; n0 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; n1 และ n5 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS; a0 คือโปรตีนในข้าวเก่าที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; a1 และ a5 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS ที่ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ในทริตเมนต์บัฟเฟอร์ที่ไม่เติม BME

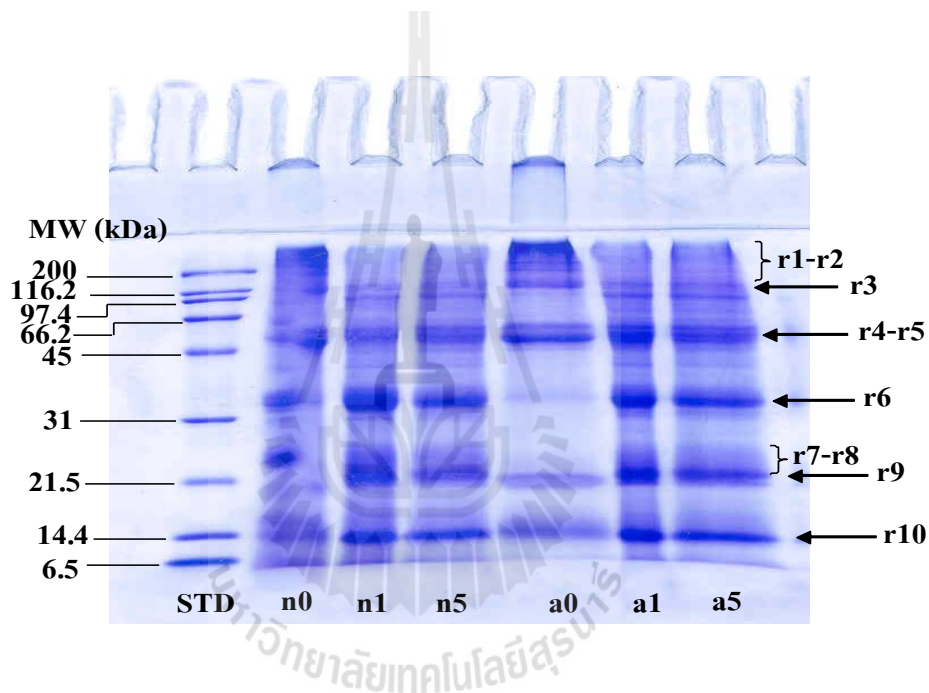
เมื่อพิจารณาภาพที่ 23 ซึ่งแสดง SDS-PAGE ที่ 7.5 เปอร์เซ็นต์อะคริลาไมด์ของโปรตีนสกัดจากฟลาร์วีข้าวใหม่และข้าวเก่าที่ผสมกับทรินเมนต์บัฟเฟอร์ที่เติม BME จะทำให้สามารถเห็นโปรตีนหน่วยย่อยที่ถูกแยกจากหน่วยใหญ่ที่มีขนาดโมเลกุลมากกว่า 200 กิโลดาลตันจากการใช้ SDS ร่วมกับ BME ในการทำลายแรงไฮโดรโฟบิกและพันธะไดซัลไฟด์ที่เชื่อมโปรตีนหน่วยย่อยขนาดเล็กทั้งหมดของโปรตีนเข้าด้วยกัน ได้ชัดเจนโดยพบว่าโปรตีนที่สกัดได้ประกอบขึ้นจากหน่วยย่อยขนาดต่าง ๆ คือ 105 90 76 61 และ 52 กิโลดาลตัน



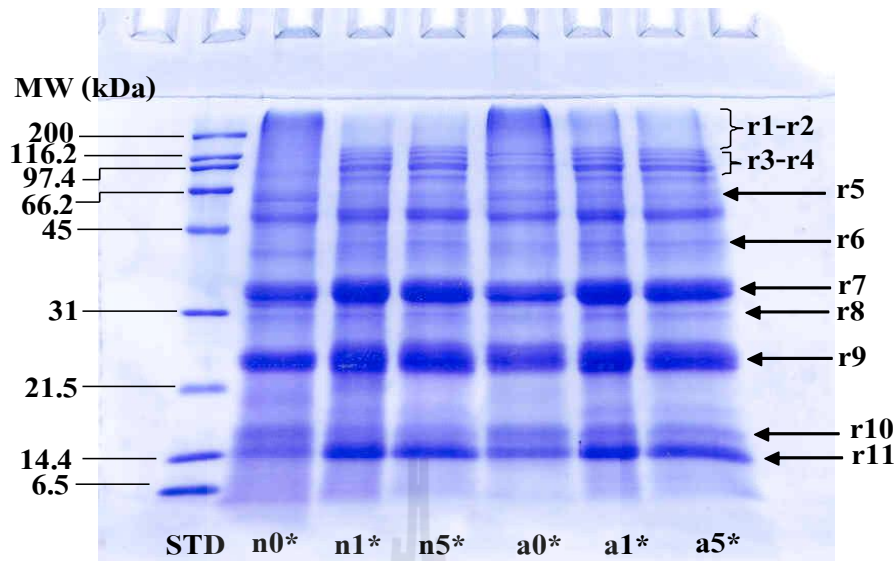
ภาพที่ 23 SDS-PAGE pattern ของตัวอย่างโปรตีนที่ได้จากฟลาร์วีข้าวใหม่ (n) และเก่า (a) โดยใช้ 10 mM NaOH ไม่มีหรือมี 1% และ 5% SDS เป็นตัวสกัด (STD = Standard marker proteins; n0* คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; n1* และ n5* คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS; a0* คือโปรตีนในข้าวเก่าที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; a1* และ a5* คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS ที่ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ในทรินเมนต์บัฟเฟอร์ที่เติม BME

หากสังเกตในภาพที่ 20 และ 21 ซึ่งแสดง SDS-PAGE ของโปรตีนที่สกัดจากตัวอย่างฟลาร์วีข้าวทั้ง 2 ชนิด นั้นก็ยังไม่สามารถเห็นโปรตีนส่วนที่อยู่ด้านล่างที่มีขนาดน้อยกว่า 14.4 กิโลดาลตันได้ เนื่องจากมีขนาดเล็กจนไม่สามารถแยกออกได้ พบเพียงแถบโปรตีนที่เคลื่อนลงมาอยู่

บริเวณด้านขอบล่างสุดของแผ่นเจล โดยเห็นเป็นลักษณะเส้นสีน้ำเงินปรากฏอยู่ตลอดแนว เพื่อให้เห็นโปรตีนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กที่ไม่เกิดการแยกที่เปอร์เซ็นต์อะคริลาไมด์เท่ากับ 12.5 จึงต้องมีการลดขนาดรูพรุนของเจลให้เล็กลง โดยวิธีการเพิ่มความเข้มข้นของอะคริลาไมด์ให้ได้เท่ากับ 14 เปอร์เซ็นต์ โดยผลที่ได้แสดงในภาพที่ 24 และ 25 โดยตัวอย่างโปรตีนที่ผสมกับทรีตเมนต์บัฟเฟอร์ที่ไม่มีการเติม BME ในภาพที่ 24 จะเห็นโปรตีนขนาดเล็กที่มีโมเลกุลเท่ากับ 14.5 กิโลดาลตันเพิ่มขึ้นอีก 1 ขนาดในทุก ๆ ตัวอย่าง โดยสีน้ำเงินที่เข้มกว่าแสดงถึงการมีปริมาณโปรตีนขนาดเล็กนี้ในตัวอย่างข้าวใหม่มากกว่าข้าวเก่า



ภาพที่ 24 SDS-PAGE pattern ของตัวอย่างโปรตีนที่ได้จากฟลาร์ข้าวใหม่ (n) และเก่า (a) โดยใช้ 10 mM NaOH ไม่มีหรือมี 1% และ 5% SDS เป็นตัวสกัด (STD = Standard marker proteins; n0 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; n1 และ n5 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS; a0 คือโปรตีนในข้าวเก่าที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; a1 และ a5 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS ที่ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 14 เปอร์เซ็นต์ในทรีตเมนต์บัฟเฟอร์ที่ไม่เติม BME



ภาพที่ 25 SDS-PAGE pattern ของตัวอย่างโปรตีนที่ได้จากฟลาร์ข้าวใหม่ (n) และเก่า (a) โดยใช้ 10 mM NaOH ไม่มีหรือมี 1% และ 5% SDS เป็นตัวสกัด (STD = Standard marker proteins; n0* คือ โปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; n1* และ n5* คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS; a0* คือโปรตีนในข้าวเก่าที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; a1* และ a5* คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS ที่ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 14 เปอร์เซ็นต์ ในทรีดเมนต์บัฟเฟอร์ที่เติม BME

2.2 โปรตีนที่สกัดได้จากตัวอย่างเจลข้าวสุก

ข้าวเก่าและข้าวใหม่ที่ผ่านการหุงสุกแล้วนำไปหาความชื้นด้วยวิธีการอบพบว่ามีความชื้นเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยในครั้งแรกของการศึกษาข้าวสุกที่ถูกอบให้ละเอียดจนเป็นเจลชั้นหนืดถูกสกัดโปรตีนออกด้วย 10 มิลลิโมลาร์ NaOH ปริมาณโปรตีนที่สกัดได้มีค่าน้อยมาก และยังพบว่าตัวอย่างโปรตีนในข้าวเก่าสกัดออกมาได้ในปริมาณต่ำกว่าโปรตีนข้าวใหม่คือไม่เกิน 18 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่าง สำหรับข้าวเก่า และไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่าง สำหรับข้าวใหม่ (ไม่แสดงข้อมูล) ซึ่งน่าจะเป็นเพราะลักษณะสารละลายผสมที่มีความชื้นหนืดมากจึงเป็นการยากที่จะสกัดโปรตีนออกมาได้ ความหนืดที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการที่สตาร์ชได้รับความร้อนที่เหมาะสมในสภาวะที่อ้อมตัวด้วยน้ำทำให้ดูดนํ้าจนเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว และแตกออก ทำให้สายพอลิเมอร์ของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินส่วนใหญ่หลุดออกมาจัดเรียงตัวกันใหม่และเชื่อมโยงกับองค์ประกอบอื่น ๆ เช่นไขมัน รวมไปถึงโปรตีนซึ่งสามารถรวมอยู่กับสายพอลิเมอร์สตาร์ช และประกอบเป็นโครงสร้างสามมิติขึ้นมา และบางส่วนอาจถูกกักอยู่ในโครงสร้างของเม็ด

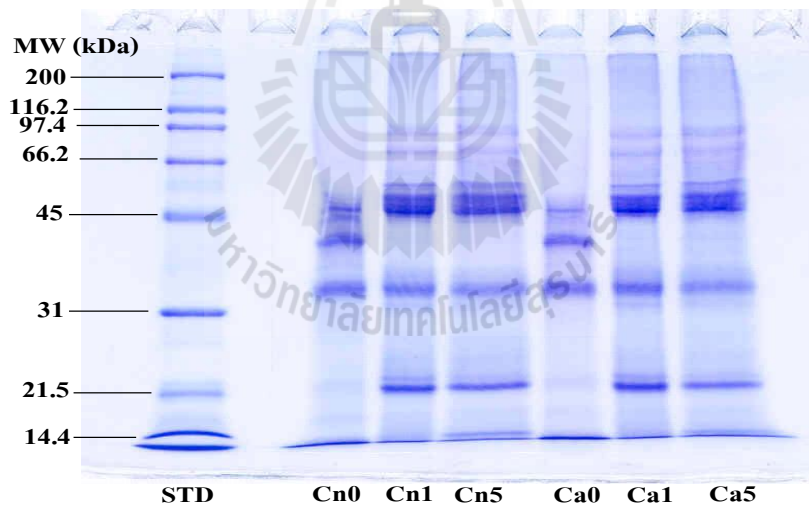
สตาร์ชหลังการเจลาติไนส์ จนเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติที่มีความแข็งแรงและกักเก็บน้ำบางส่วนไว้ภายในโครงสร้าง จึงทำให้เกิดลักษณะเป็นเจลที่ยืดหยุ่น การที่จะสกัดโปรตีนออกจากเจลข้าวสุกจึงทำได้ยาก ปริมาณโปรตีนที่สกัดได้จึงมีค่าน้อย ส่วนประมาณโปรตีนในข้าวเก่าที่สกัดออกมาได้น้อยกว่าข้าวใหม่หลังหุงสุก ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับโปรตีนในฟลาร์ว์ข้าวเก่าที่สกัดได้น้อยกว่าฟลาร์ว์ข้าวใหม่ซึ่งในส่วนของข้าวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและโปรตีน (protein-starch interactions) (Likitwattanasade and Hongsprabhas, 2010) ที่เพิ่มมากขึ้นหลังการเก็บทำให้สกัดโปรตีนออกมาได้น้อย ส่วนในกรณีตัวอย่างข้าวสุกอาจเนื่องมาจากในระหว่างการเก็บรักษานั้น โมเลกุลของโปรตีนมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้สามารถเกิดโครงสร้างสามมิติที่ซับซ้อนและแข็งแรงกับสตาร์ชได้มากกว่าโปรตีนในข้าวใหม่จึงทำให้โปรตีนในข้าวเก่าถูกสกัดออกมาได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อทำการย่อยตัวอย่างเจลแป้งด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (E.C.3.2.1.1) (from porcine pancreas, จากบริษัท Sigma Cat. No. คือ A3176) ซึ่งเป็นเอนไซม์ในกลุ่ม endoamylases ที่ทำหน้าที่ในการย่อย 1,4- α -glucosidic linkages ซึ่งเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์ของสตาร์ช (Fogarty and Kelly, 1990) โดยทำการย่อยแบบสุ่ม (Nigam and Singh, 1995) ในสายพอลิเมอร์ของแป้ง คือ อะไมโลส และอะไมโลเพคตินสายยาวให้สั้นลงเป็นกลูโคสสายสั้น ๆ ต่อกันที่เรียกว่า เด็กซ์ทริน มีผลให้ความหนืดของเจลแป้งที่ผ่านการเจลาติไนส์ลดลงให้ลักษณะที่เหมือนกับของไหลคล้ายกับน้ำ แล้วจึงนำเจลแป้งที่ถูกย่อยแล้วมาสกัดโปรตีนพบว่า ปริมาณโปรตีนที่สกัดด้วยสารละลาย 10 มิลลิโมลาร์ NaOH นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 24 มิลลิกรัมต่อกรัม-ตัวอย่าง ทั้งตัวอย่างเจลข้าวสุกใหม่และเก่า แสดงให้เห็นว่าหลังจากที่สตาร์ชถูกเจลาติไนส์เกิดเป็นโครงสร้างเจลาตสามมิติขึ้นมาและจะกักเก็บโปรตีนบางส่วนไว้ภายในโครงสร้าง นอกจากนี้พบว่าปริมาณโปรตีนที่สกัดได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย เมื่อใช้สารละลายด่างที่มี SDS ในการสกัด โดยตัวอย่างที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ ที่มี 1% SDS จะให้ค่าโปรตีนสูงสุดในทั้งสองตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าสายพอลิเมอร์ของสตาร์ชและโปรตีนสามารถเกิดอันตรกิริยาต่อกันได้ ทั้งนี้เนื่องจาก SDS เป็น แอนไอออนิก ดีเทอร์เจนต์ จะใช้ส่วนไฮโดรโฟบิกจับกับส่วนที่ไม่ชอบน้ำของโปรตีนที่อยู่ที่พื้นผิวของเม็ดสตาร์ชหรือเกาะอยู่กับโครงสร้าง ของสายสตาร์ช เกิดเป็นไมเซลล์และละลายออกมาในตัวอย่างได้มากขึ้น

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณโปรตีนที่สกัดได้จากเจลข้าวสุกที่ได้จากข้าวใหม่และข้าวเก่า

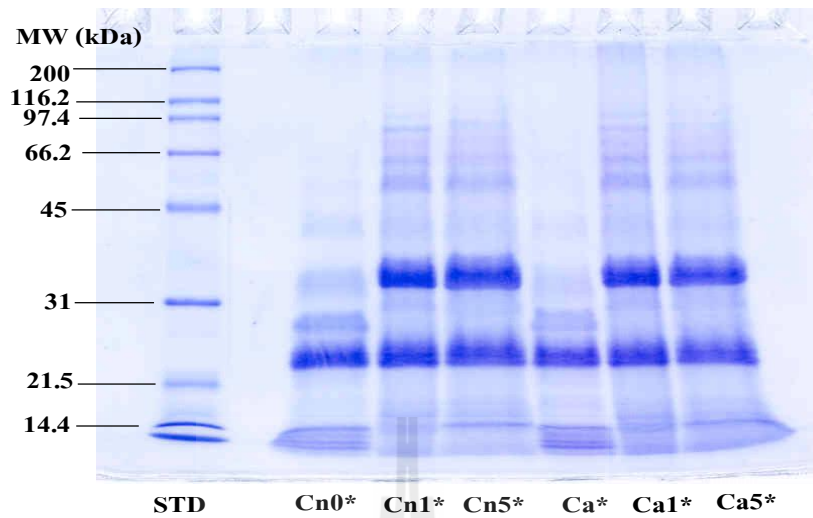
Sample	Extract solution	Alkaline extractable protein (mg/g sample)
The new rice paste	10 mM NaOH	24 ± 2.9a
	10 mM NaOH + 1% SDS	44 ± 1.2cd
	10 mM NaOH + 5% SDS	37 ± 3.8b
The aged rice paste	10 mM NaOH	24 ± 4.0a
	10 mM NaOH + 1% SDS	45 ± 1.7d
	10 mM NaOH + 5% SDS	39 ± 3.5bc

หมายเหตุ: a, b, c, d คือสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแนวตั้งจากน้อยไปมาก หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2.4 ขนาดโมเลกุลของโปรตีนในตัวอย่างข้าวสุกด้วยอิเล็กโตรโฟรีซิส (SDS-PAGE)



ภาพที่ 26 SDS-PAGE pattern ของโปรตีนที่สกัดได้ข้าวสุกใหม่ (Cn) และเก่า (Ca) โดยใช้ 10 mM NaOH ไม่มีหรือมี 1% และ 5% SDS เป็นตัวสกัด (STD = Standard marker proteins; Cn0 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; Cn1 และ Cn5 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS; Ca0 คือโปรตีนในข้าวเก่าที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; Ca1 และ Ca5 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS ที่ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ในทรินตเมนต์บัฟเฟอร์ที่ไม่เติม BME



ภาพที่ 27 SDS-PAGE pattern ของโปรตีนที่สกัดได้จากข้าวสุกใหม่ (Cn*) และเก่า (Ca*) โดยใช้ 10 mM NaOH ไม่มีหรือมี 1% และ 5% SDS เป็นตัวสกัด (STD = Standard marker proteins; Cn0 คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; Cn1* และ Cn5* คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS; Ca0* คือโปรตีนในข้าวเก่าที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่ไม่เติม SDS; Ca1* และ Ca5* คือโปรตีนในข้าวใหม่ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ที่เติม 1% SDS 5% SDS ที่ความเข้มข้นของ อะคริลาไมด์เท่ากับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ในทริตเมนต์บัฟเฟอร์ที่เติม BME

SDS-PAGE ในสภาวะที่ไม่มี BME ของโปรตีนจากข้าวสุกเก่า (Ca0) และใหม่ (Cn0) ที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ NaOH ที่มีและไม่มี SDS แสดงรูปแบบของแถบโปรตีนที่แตกต่างจากโปรตีนที่สกัดได้ในฟลาร์ข้าวเก่าและข้าวใหม่ในภาพที่ 20 พบแถบโปรตีนหลักเพียง 3 แถบในตัวอย่าง Ca0 และ Cn0 คือที่ขนาดโมเลกุลเท่ากับ 45 ถึง 47 41 และ 34 กิโลดาลตัน ตามลำดับ โดยหากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างแถบ Ca0 และ Cn0 (ภาพที่ 26) ซึ่งเป็นโปรตีนที่สกัดด้วยสารละลาย 10 มิลลิโมลาร์ NaOH ที่ไม่มี SDS พบแถบโปรตีนหลักในช่วงขนาดโมเลกุลประมาณ 45 ถึง 47 กิโลดาลตันที่สกัดได้จากตัวอย่างข้าวเก่ามีน้อยกว่า โดยสังเกตจากแถบสีน้ำเงินที่จางกว่าและขณะเดียวกัน ก็แทบไม่พบโปรตีนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ติดค้างอยู่บริเวณ stacking เจลเลย แสดงให้เห็นว่ารูปแบบโมเลกุลของโปรตีนได้เปลี่ยนแปลงไปหลังจากให้ความร้อน โดยพันธะเคมีหรือแรงบางชนิดที่เชื่อมโปรตีนโมเลกุลย่อยด้วยกันถูกทำลายโมเลกุลขนาดใหญ่แตกออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้ ดังได้เห็นโปรตีนกลุ่มใหม่ขนาดโมเลกุลเท่ากับ 41 กิโลดาลตันปรากฏในแถบโปรตีน ทั้ง 2 และยังพบโปรตีนขนาด 34 กิโลดาลตันมีปริมาณที่สูงขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตามโปรตีนจากเจลข้าวสุกทั้ง 2 ชนิด จะให้ลักษณะของแถบโปรตีนที่ไม่แตกต่างกันเมื่อถูกสกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ NaOH ที่มี SDS และยังสามารถพบแถบโปรตีนหลักจำนวนเพิ่มขึ้น โดยตำแหน่งที่พบแถบโปรตีนหลักส่วนใหญ่จะตรงกับตำแหน่งที่พบในตัวอย่างที่โปรตีนจากฟลาร์วข้าวที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ NaOH ที่มี SDS ในสถานะที่ไม่มี BME ในภาพที่ 19 แต่ต่างกันที่ความเข้มของแถบโปรตีน ณ ตำแหน่งเดียวกันจะต่างกัน โดยพบกว่าที่แถบโปรตีนเท่ากับ 57 กิโลดาลตันมีความเข้มมากที่สุด (มีโปรตีนปริมาณมาก)

ภาพที่ 27 แสดง SDS-PAGE ของโปรตีนข้าวสุกที่สกัดด้วย 10 มิลลิโมลาร์ NaOH ที่มีและไม่มี SDS ในสถานะที่เติม BME จะให้ลักษณะของแถบโปรตีนที่แตกต่างจากสถานะที่ไม่มีเติม BME โดยไม่พบแถบโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุล 41 ถึง 47 กิโลดาลตัน แต่จะพบอยู่ในช่วง 27 ถึง 30 กิโลดาลตันแทน โดยสีน้ำเงินของแถบโปรตีนข้าวใหม่มีความเข้มกว่าเล็กน้อย ตัวอย่างที่สกัดด้วยสารละลาย 10 มิลลิโมลาร์ที่มีการเติม SDS นี้ พบแถบโปรตีนหลักที่ตำแหน่งเดียวกับภาพที่ 4.2 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่าความร้อนไม่สามารถขนาดโมเลกุลของโปรตีนกลุ่มที่เชื่อมด้วยไดซัลไฟด์ได้ อย่างไรก็ตามโปรตีนที่สกัดได้ในตัวอย่างข้าวสุก ยังน้อยอยู่เมื่อเทียบกับการสกัดด้วยฟลาร์ว แม้จะถูกย่อยให้มีขนาดลดลง แสดงว่ายังมีโปรตีนอีกส่วนหนึ่งซึ่งอาจมีทั้งโมเลกุลขนาดใหญ่และเล็กที่ติดค้างอยู่กับโครงสร้างของเมล็ดสตาร์ชก็ได้ ทำให้ได้แถบโปรตีนที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป หากสามารถสกัดโปรตีนทั้งหมดออกมาได้ก็จะทำให้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของโปรตีนได้อย่างยิ่งขึ้น

2.4 ค่าพื้นผิวความเป็นไฮโดรโฟบิก (Surface hydrophobicity)

จากผลการวิเคราะห์ค่าพื้นผิวความเป็นไฮโดรโฟบิก (So) ของตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์ด้วย ANS probe แสดงว่าโปรตีนในข้าวเก่ามีค่า So สูงกว่าข้าวใหม่ ($p < 0.05$) แสดงว่าหลังจากการเก็บรักษาโปรตีนมีการเปิดตัวมากขึ้น โดยหากพิจารณาผลการเพิ่มขึ้นของค่า So ในข้าวเก่าร่วมกับผล SDS-PAGE ของตัวอย่างโปรตีนที่สกัดได้จากแป้งข้าวในภาพที่ 19 และ 20 ที่แสดงการเพิ่มขึ้นของโปรตีนขนาดโมเลกุลใหญ่ ๆ มีความเกี่ยวเนื่องสอดคล้องกันซึ่งจะสอดคล้องกับผล SDS-PAGE ของโปรตีนที่แสดงให้เห็นว่าโปรตีนที่สกัดได้จากตัวอย่างข้าวเก่านั้นมีการเปิดตัวเกิดขึ้นในระหว่างการเก็บ โดยการเปิดตัวนี้ทำให้ส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิกของโปรตีนเคลื่อนที่ออกมาสู่ภายนอกส่งผลให้พื้นผิวความเป็นไฮโดรโฟบิกของโปรตีนข้าวเก่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งกรดอะมิโนไม่มีขั้วที่ถูกเปิดตัวออกมานี้และอยู่บริเวณใกล้เคียงกันจึงสามารถเกิดการเชื่อมกันเกิดเป็นกลุ่มโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้นได้ นอกจากนี้ยังพบว่าโปรตีนที่สกัดได้ในตัวอย่างข้าวที่ผ่านการหุงสุกมีค่า So

เพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าความร้อนมีผลทำให้โปรตีนเปิดตัวเพิ่มมากขึ้น (Paraman, Hettiarachchy, Schaefer and Beck, 2006) โดยพบว่าโปรตีนในข้าวเก่ามีค่าการเปิดตัวที่สูงกว่าข้าวใหม่ ($p < 0.05$) โดยอาจเป็นผลมาจากการที่ตัวอย่างโปรตีนในฟลาร์วีข้าวเก่ามีการเปิดตัวที่สูงกว่าในตอนแรกทำให้ความร้อนสามารถแพร่จากบริเวณด้านนอกเข้าไปได้ดีกว่าจึงทำให้พันธะไฮโดรเจนหรือแรงยึดเกาะต่าง ๆ ถูกทำลายได้มากหรือง่ายกว่าการเปิดตัวที่เพิ่มขึ้นของโปรตีนในข้าวเก่าจะความร้อนจึงเกิดได้สูงกว่า

ตารางที่ 4 แสดงค่าพื้นผิวความเป็นไฮโดรโฟบิกของตัวอย่างโปรตีนที่สกัดจากข้าวสุก

Sample	Surface hydrophobicity (S0) with ANS probe	Alkaline extractable protein (mg/g sample)
<i>Raw rice**</i>		
New	598.10 ± 29.87a	62 ± 3
Aged	690.80 ± 28.08 b	53 ± 2
<i>Cooked rice</i>		
New	1721.65 ± 294.37a	8 ± 2
Aged	2418.30 ± 253.29b	4 ± 1

หมายเหตุ: a และ b คือสัญลักษณ์ที่แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแนวตั้งจากน้อยไปมาก หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2.5 ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล (-SH) และไดซัลไฟด์ (-SS-) ของโปรตีนจากฟลาร์วีและข้าวสุก

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ SS ของตัวอย่างฟลาร์วีทั้ง 2 ชนิดพบว่าโปรตีนสกัดจากข้าวฟลาร์วีข้าวเก่าจะมีปริมาณเฉลี่ยที่สูงกว่า คือ 59 ไมโครโมลต่อกรัมตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับผล SDS-PAGE ของโปรตีนสกัดจากตัวอย่างฟลาร์วีข้าวใหม่และข้าวเก่าในรูปที่ 20 22 และ 24 ที่แสดงให้เห็นว่าพันธะไดซัลไฟด์มีส่วนสำคัญในการเชื่อมต่อกลุ่มโปรตีนย่อยที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเข้าไว้ด้วยกันทำให้เกิดโปรตีนขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นหลังการเก็บ อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณ Total SS + SH มีค่าต่างกันทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณโปรตีนที่สกัดได้มีความแตกต่างกันนั่นเอง และเมื่อหลังจากผ่านการให้ความร้อนพบว่าเพิ่มขึ้นของทั้งค่า Total SH + SS และ SS ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเปิดตัวของตัวอย่างสมบูรณ์อันเนื่องมาจากการการหุงข้าวในสภาวะน้ำเดือดก่อนมาทำปฏิกิริยากับ NTSB ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากกับฟลาร์วีที่ส่วนโปรตีนสกัดจะได้จากตัวอย่างที่ไม่ถูกให้ความร้อนก่อนนำมาวิเคราะห์ดังนั้นการเปิดตัวจึงไม่สมบูรณ์เท่ากับโปรตีน

จากข้าวสุกแม่จะบ่มที่ 40 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกัน โดยปริมาณหมู่ SS ของตัวอย่างโปรตีนข้าวเก่าสัปดาห์ยังมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับโปรตีนข้าวใหม่สัปดาห์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 129 และ 100 ไมโครกรัมต่อกรัมตัวอย่างตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าหลังให้ความร้อนโปรตีนในข้าวเก่าที่เกิดจากโปรตีนหน่วยย่อยที่เชื่อมต่อหรือเกาะกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ซึ่งมีความแข็งแรงจะไม่ถูกทำลายหลังจากการให้ความร้อน โดยโปรตีนทั้งหมดในเมล็ดข้าวรวมไปถึงโปรตีนขนาดใหญ่ที่เชื่อมด้วยไดซัลไฟด์เหล่านี้ มีการเปิดตัวหลังให้ความร้อน (ค่า S_0 ที่เพิ่มขึ้นในตารางที่ 4) โปรตีนที่เป็นกลุ่มก้อนหรือพับซ้อนกันจะคลายตัวออกเป็นสายโปรตีน ซึ่งสามารถแทรกตัวไปในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่แตกออกจากให้ความร้อนและเชื่อมโยงกับพอลิเมอร์ของสตาร์ชเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติที่มีความแข็งแรงส่งผลต่อความยืดหยุ่นของเจลได้

ตารางที่ 5 ปริมาณหมู่ซัลไฮดริล และไดซัลไฟด์ของโปรตีนจากฟลาร์วีและตัวอย่างข้าวสุก

Values	Sample			
	New	Aged	cooked New	cooked Aged
Total SH +SS, $\mu\text{mol/g}$ protein	$64 \pm 6.66^{\text{ns}}$	75 ± 4.86	162 ± 57	212 ± 89
Total SH, $\mu\text{mol/g}$ protein	$15 \pm 5.94^{\text{ns}}$	16 ± 4.07	62 ± 24	83 ± 43
SS, $\mu\text{mol/g}$ protein	$49 \pm 1.76^{\text{ns}}$	59 ± 2.54	100 ± 33	129 ± 69
Alkaline extractable protein, (mg/g sample)	61.01 ± 3.05	53.97 ± 2.35	24 ± 7	17 ± 6

หมายเหตุ: ^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในแนวนอน

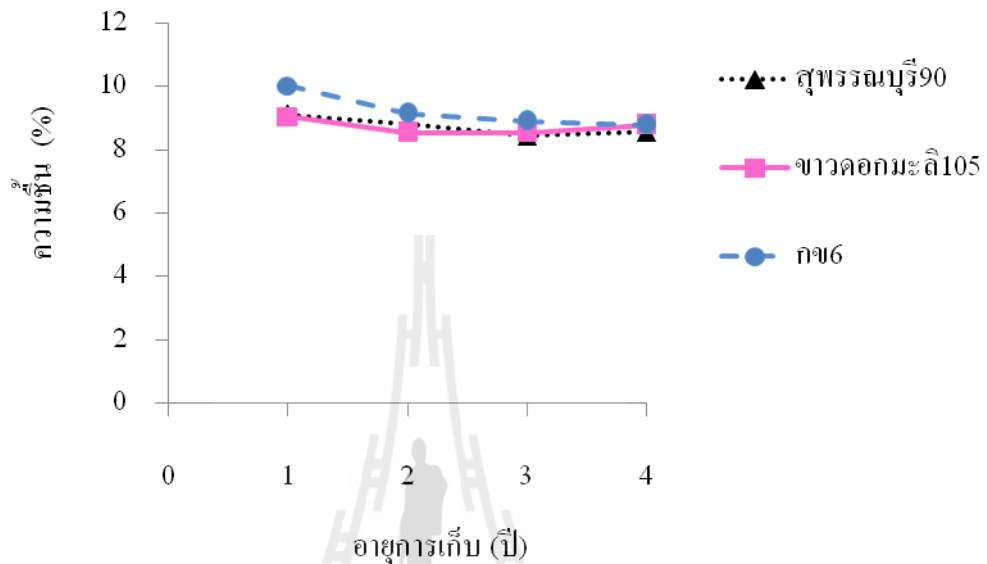
โปรตีนไข่ขาว (Egg white albumin; EWB)

3. ผลการเก็บรักษาระยะยาวต่อสมบัติทางการหุงต้ม เนื้อสัมผัสและการเกิดเพสท์ของข้าว

3.1 ความชื้น

ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข6 ที่ผ่านการเก็บเป็นเวลา 1-4 ปี ไว้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อนำมาขัดสีเป็นข้าวสาร พบว่ามีความชื้น 9.12%, 9.05% และ 10.02% ตามลำดับ เมื่อผ่านการเก็บรักษา ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวสุพรรณบุรี 90 ค่าความชื้นไม่แตกต่างกันตามเวลาในการเก็บ แต่ความชื้นของข้าวเหนียว กข6 มีค่าลดลง แสดงว่า ความชื้นยังถ่ายเทออกสู่บรรยากาศได้อีก ซึ่งการถ่ายเทความชื้นนี้มีผลต่อการจัดเรียงตัวของโครงสร้าง ทั้งนี้ข้าวเหนียวมีความชื้นลดลงจนมีค่าต่างทางสถิติ อาจเป็นเพราะว่าความชื้นตั้งแต่อายุ 1 ปีของข้าวเหนียว

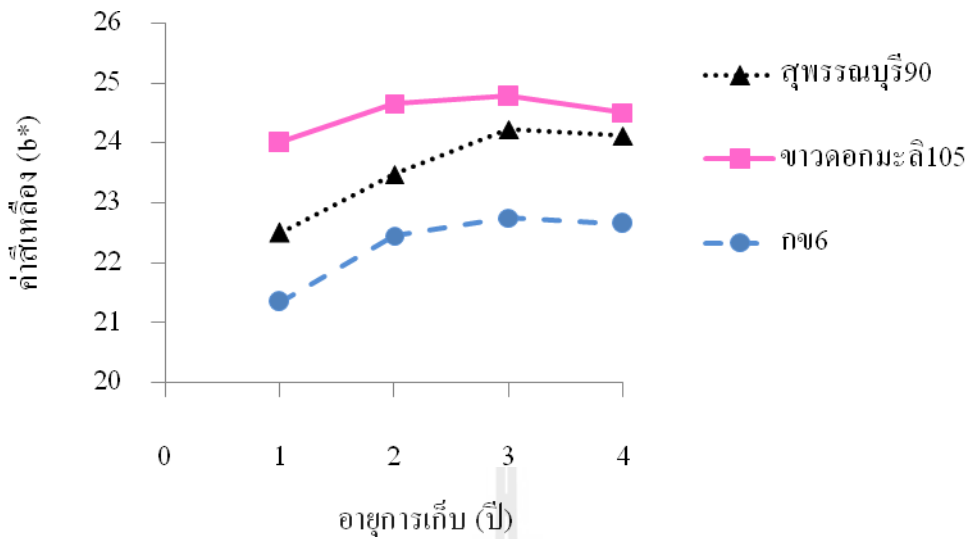
มีมากกว่าข้าวเจ้าทั้งสองพันธุ์ จึงใช้เวลาในการระบายความชื้นสู่บรรยากาศนานกว่าข้าวเจ้าทั้งสองพันธุ์ว่าความชื้นในเมล็ดข้าวไม่มีการถ่ายเทออกสู่บรรยากาศโดยรอบเมล็ดข้าวหรือดูดซับเข้ามา อาจเป็นเพราะความชื้นในข้าวนั้นได้เข้าสู่ภาวะสมดุลกับอากาศแล้ว



ภาพที่ 28 ความชื้นของข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี

3.2 ค่าสีเหลือง

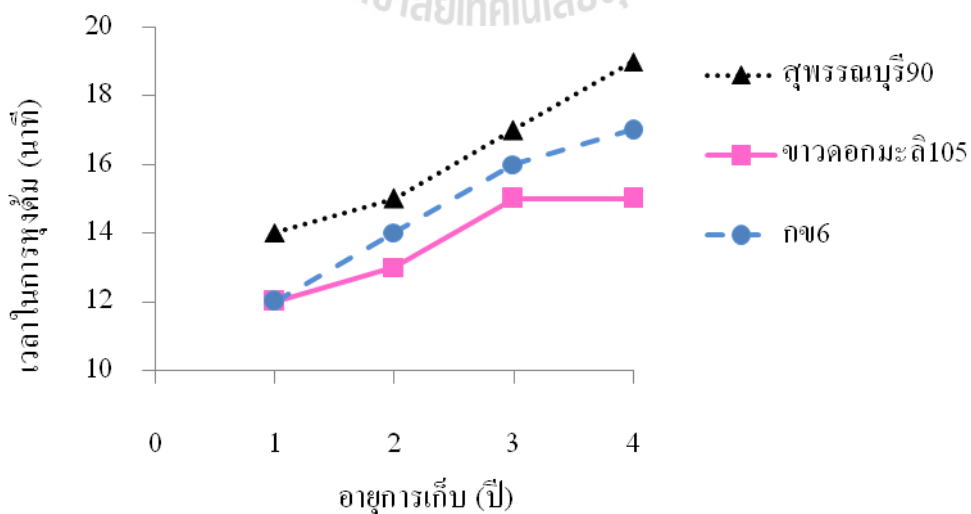
ค่าสีเหลืองของข้าวสารทั้งสามพันธุ์ที่อายุการเก็บ 1 ปีนั้นมีค่าแตกต่างกันตามสีของพื้นข้าว โดยพื้นข้าวของข้าวเหนียวมีลักษณะขาวขุ่น ส่วนข้าวสารเจ้ามีลักษณะสีขาวใสออกนวล และอาจมีลักษณะขาวขุ่นของข้าวทองไข ซึ่งพบในข้าวสุพรรณบุรี90 ที่นำมาทำการทดลอง จากลักษณะของพื้นข้าวดังกล่าวทำให้ข้าวเหนียว กข6 มีค่าสีเหลืองน้อยกว่าข้าวสารเจ้า และข้าวสารเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี90 มีค่าสีเหลืองน้อยกว่าข้าวสารเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 เมื่อข้าวมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 2 ปี พบว่าข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุที่จะทำให้ข้าวมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นนั้นมี 2 สาเหตุ คือ สีเหลืองจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ และการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ใช่เอนไซม์ แต่จากค่าความชื้นของข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าลดลงตามระยะเวลาในการเก็บซึ่งมีผลให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ลดลง ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ใช่เอนไซม์ อย่างไรก็ตามในปีที่ 3 นั้นมีเพียงข้าวสุพรรณบุรี90 ที่มีค่าความเหลืองเพิ่มขึ้น ส่วนในปีที่ 4 พบว่าค่าสีเหลืองของข้าวทั้งสามพันธุ์ไม่แตกต่างจากข้าวอายุการเก็บ 3 ปี



ภาพที่ 29 ค่าสีเหลืองของข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี

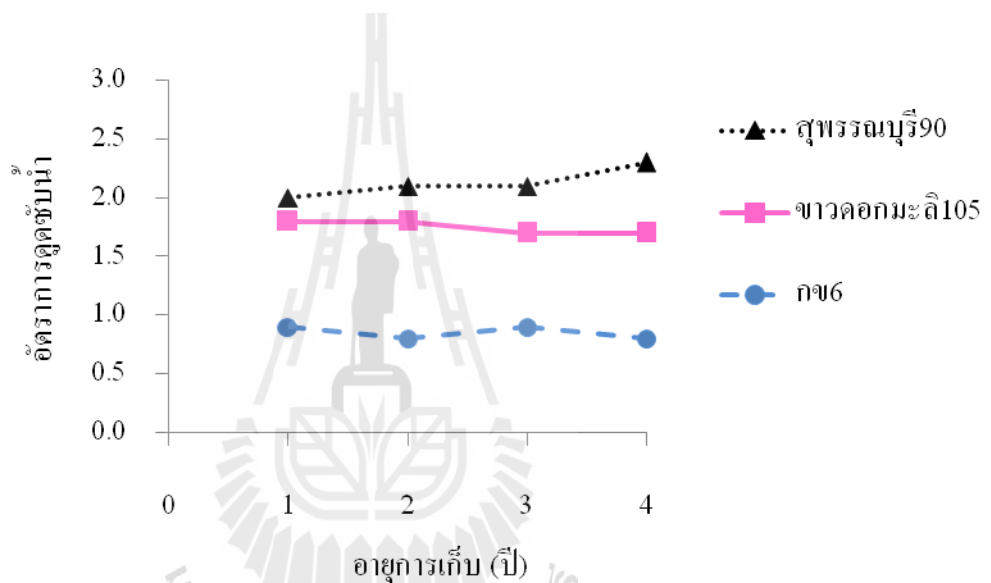
3.3 สมบัติทางการหุงต้ม

ระยะเวลาในการหุงต้มของข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บ โดยระยะเวลาในการหุงต้มของข้าวสุพรรณบุรี90 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ของข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงอายุการเก็บ 1-3 ปี แล้วคงที่จนถึงปีที่ 4 ส่วนข้าวเหนียว กข6 พบว่าระยะเวลาในการหุงต้มของปีที่ 2 มากกว่าปีที่ 1 แล้วมีค่าคงที่ในปีที่ 2-3 แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นในปีที่ 4 ซึ่งจะเห็นว่า ข้าวทั้งสามพันธุ์มีความแข็งแรงขึ้นตามเวลาในการเก็บ โดยในช่วงอายุการเก็บ 1-2 ปี นั้นจะมีค่าระยะเวลาในการหุงต้มเพิ่มขึ้นมาก ส่วนในปีที่ 3-4 นั้นมีระยะเวลาในการหุงต้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย



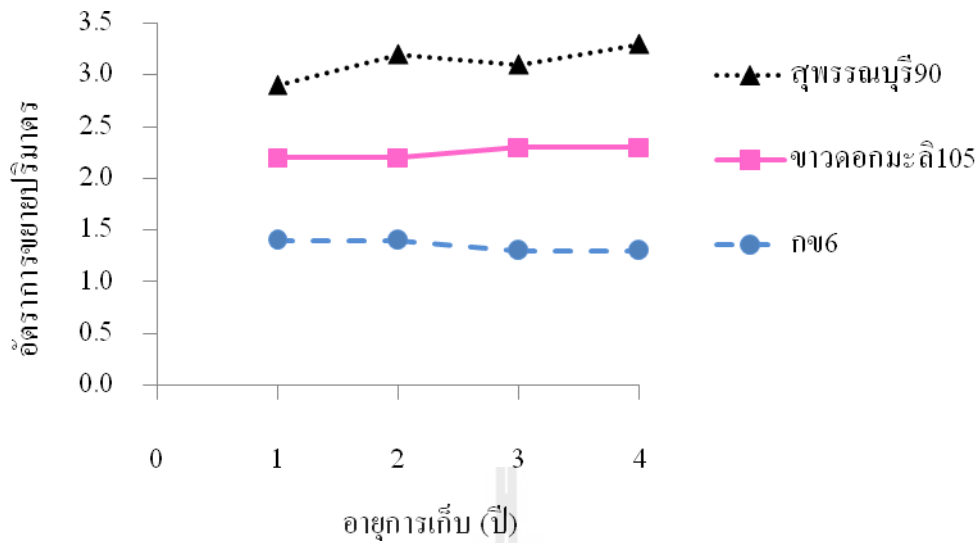
ภาพที่ 30 ระยะเวลาในการหุงต้มของข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี

ข้าวสุพรรณบุรี90 มีอัตราการดูดซับน้ำคงที่ตลอดการเก็บ 1-3 ปีและเพิ่มขึ้นในปีที่4 ซึ่งจากการสังเกตพบว่า เมล็ดข้าวสุกของข้าวอายุการเก็บ 4 ปีมีลักษณะบานและแตกหักมากกว่าข้าวอายุการเก็บ 1-3 ปี เมล็ดข้าวหักนั้นสามารถลดช่องว่างระหว่างเมล็ดข้าวจึงทำให้น้ำระเหยออกไปน้อย ข้าวจึงมีอัตราการดูดซับน้ำมากกว่า ข้าวอายุการเก็บ 1-3 ปี โดยข้าวจะมีลักษณะบานและแตกหัก ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะว่าต้องใช้เวลาในการหุงต้มนานจึงทำให้ข้าวบานจนแตกหักง่าย ส่วนข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียว กข6 นั้นมีค่าคงที่ตลอดการเก็บ 1- 4 ปี และคงสภาพเมล็ดข้าวสุกเต็มเมล็ดไม่แตกหักเหมือนข้าวสุพรรณบุรี90 ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียว กข 6 ใช้เวลาในการหุงต้มน้อยกว่าข้าวสุพรรณบุรี90



ภาพที่ 31 อัตราการดูดซับน้ำของข้าวสุกจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี

อัตราการขยายปริมาตรของข้าวสุพรรณบุรี90 ที่มีอายุการเก็บ 2 ปี มีค่ามากกว่า ข้าวอายุการเก็บ 1 ปี โดยเมล็ดข้าวสุกจากข้าวอายุการเก็บ 2 ปีนั้นจะบานและโค้งงอมากกว่า จึงทำให้มีช่องว่างระหว่างเมล็ดมากกว่า ข้าวอายุการเก็บ 1 ปี และพบว่าข้าวอายุการเก็บ 2 ปีมีอัตราการขยายปริมาตรไม่แตกต่างกัน แต่อัตราการขยายปริมาตรเพิ่มขึ้นในข้าวอายุการเก็บ 4 ปี เนื่องจากเมล็ดข้าวบานมากขึ้น ส่วนข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียว กข6 นั้นมีค่าคงที่ตลอดการเก็บ 1- 4 ปี

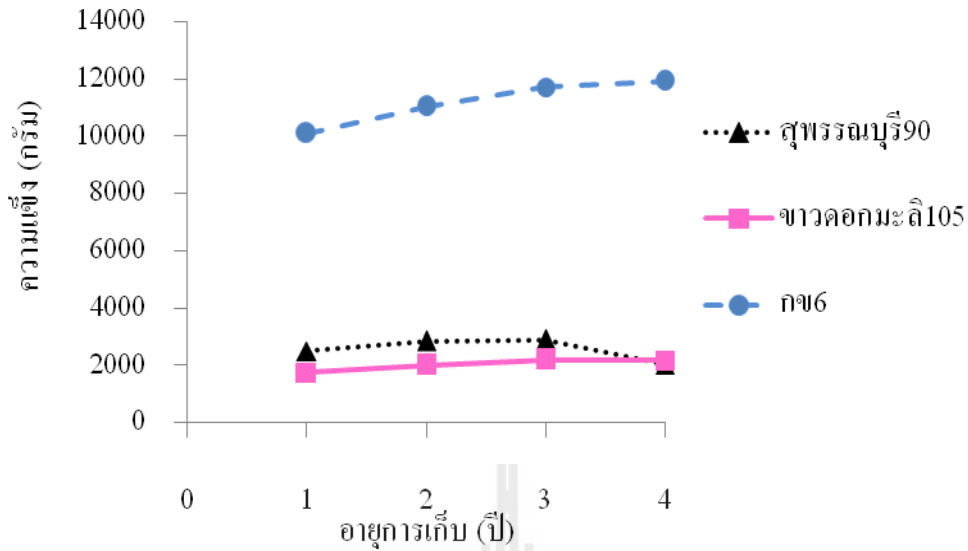


ภาพที่ 32 อัตราการขยายปริมาตรของข้าวสุกจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี

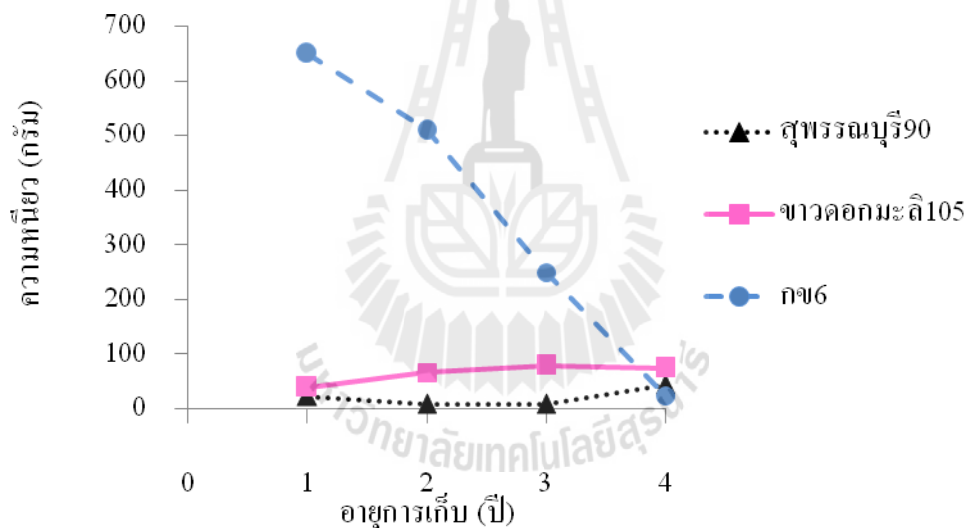
3.4 สมบัติทางเนื้อสัมผัส

ความแข็งของข้าวสุพรรณบุรี90 มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงอายุการเก็บ 1-3 ปี แต่ลดลงในปีที่ 4 เนื่องจากข้าวสุกและเมล็ดแตกหัก ทำให้ความแข็งลดลง ความแข็งของข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงอายุการเก็บ 1-3 ปี และคงที่ในปีที่ 4 ความแข็งของข้าวเหนียว กข6 อายุการเก็บ 1 และ 2 ปี มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าคงที่เมื่ออายุการเก็บ 3 และ 4 ปี

ความเหนียวของข้าวสุพรรณบุรี90 ที่มีอายุการเก็บ 2 และ 3 ปี มีค่าต่ำกว่าข้าวอายุการเก็บ 1 ปี ซึ่งจากการสังเกตพบว่าเมล็ดข้าวสุกมีความร่วนและไม่เกาะกัน แต่ข้าวที่มีอายุการเก็บ 4 ปี เมล็ดข้าวหักและฉะ จึงทำให้ข้าวเกาะติดกัน ทำให้มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ความเหนียวของข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าเพิ่มขึ้นจากปีที่ 1-3 อาจเนื่องมาจากโดยปกติข้าวขาวดอกมะลิใหม่จะนุ่มและเพราะดูดซับน้ำมากแต่ข้าวที่ผ่านการเก็บเป็นเวลานานมีค่าการดูดซับน้ำน้อยลงเมล็ดข้าวจึงนุ่มเหนียว ส่วนความเหนียวของข้าวเหนียวนั้นมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ เพราะข้าวสุกดูดน้ำน้อยข้าวสุกจึงแข็งร่วน



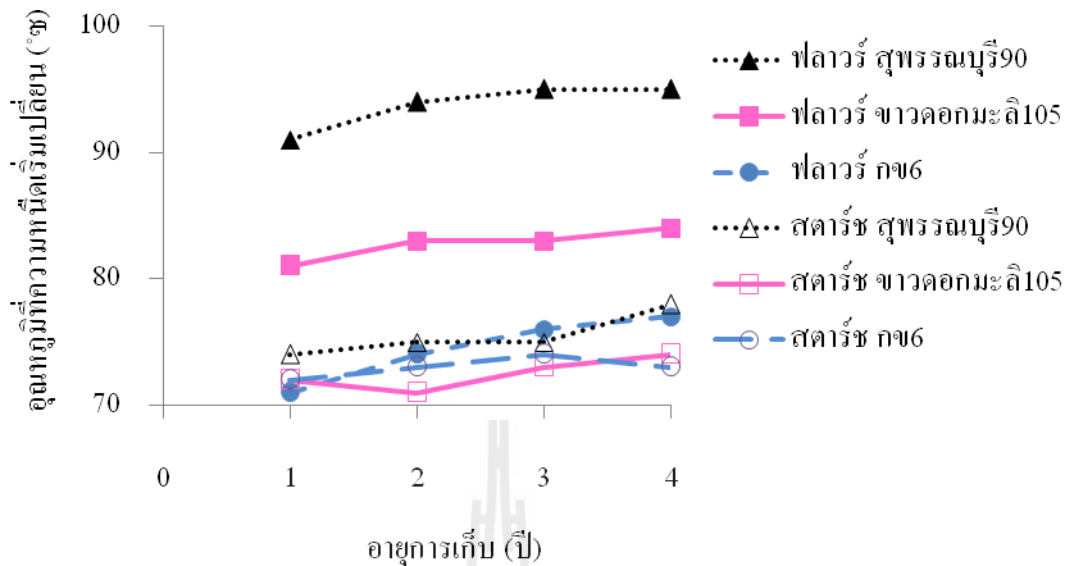
ภาพที่ 33 ความแข็งของข้าวสุกจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี



ภาพที่ 34 ความเหนียวของข้าวสุกจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี

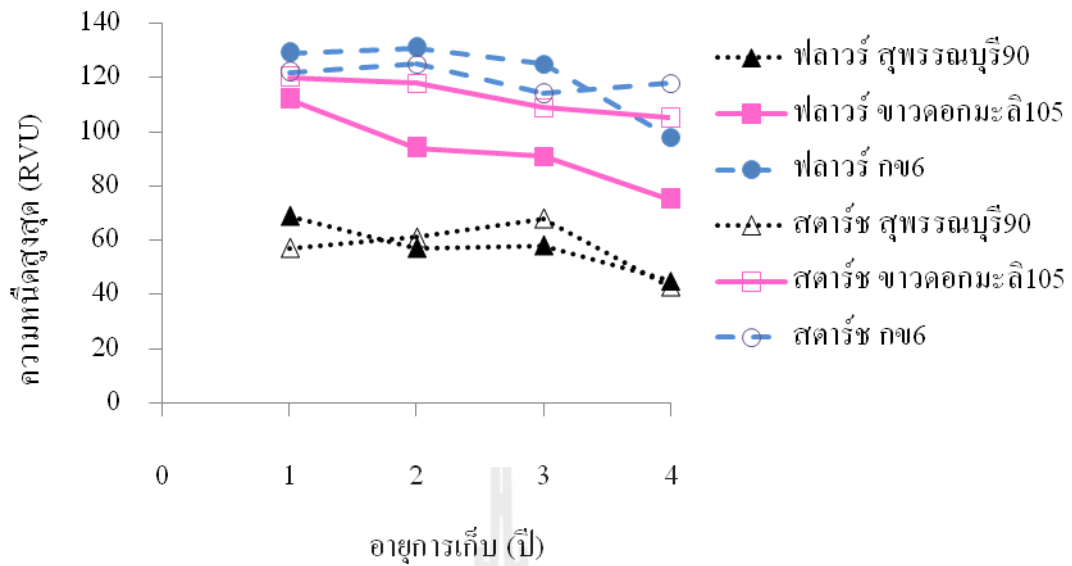
3.5 สมบัติทางการเกิดเพสท์

ผลการวิเคราะห์สมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งฟลาวร์และแป้งสตาร์ชข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาด้วยเครื่อง RVA พบว่าอุณหภูมิที่ความเหนียวเริ่มเปลี่ยน ของข้าวฟลาวร์ทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บรักษา 2 ปี มีค่าเพิ่มขึ้นจากการเก็บรักษา 1 ปี จากนั้นมีค่าคงที่ในการเก็บรักษาปีที่ 3 และ 4 ในขณะที่อุณหภูมิที่ความเหนียวเริ่มเปลี่ยน ของสตาร์ชจากข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าไม่แตกต่างกันตามระยะเวลาในการเก็บรักษา ดังนั้นการเก็บรักษาน่าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนและปฏิสัมพันธ์ของโปรตีนกับสตาร์ช (Teo, 2000)



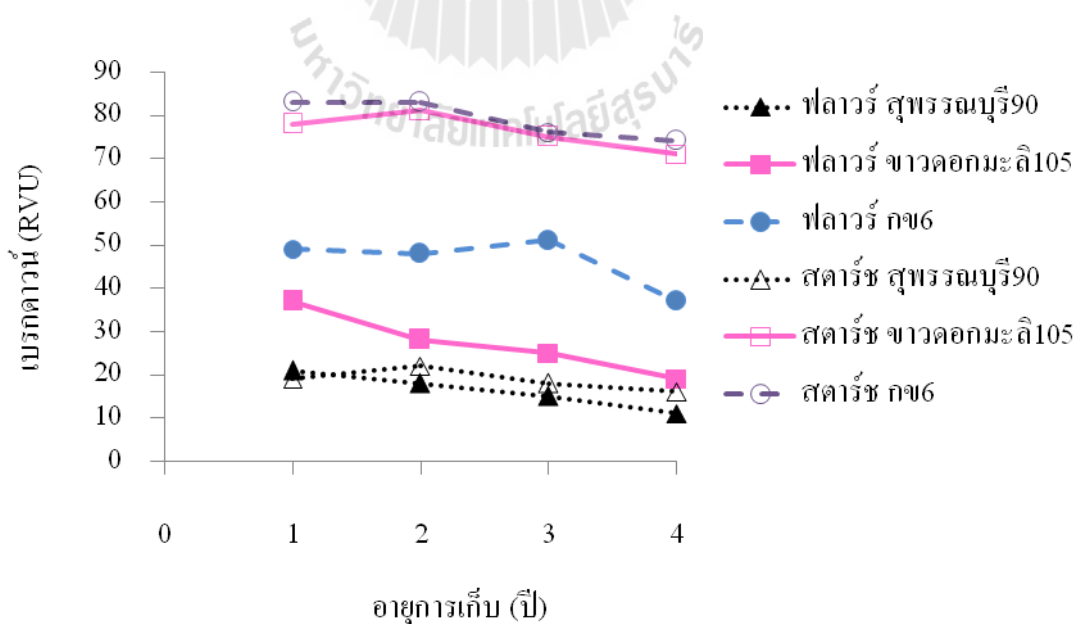
ภาพที่ 35 อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยน ของแป้งข้าวจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี

ความหนืดสูงสุดของแป้งฟลาวร์และแป้งสตาร์ชมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการเก็บมากขึ้น ซึ่ง การที่ความหนืดสูงสุดแป้งสตาร์ชลดลง เพราะว่ามีเม็ดสตาร์ชมีความทนทานต่อการแตกตัวมากขึ้น โดยข้าวแต่ละพันธุ์มีการลดลงของค่าความหนืดสูงสุดในช่วงอายุการเก็บที่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอายุการเก็บ 1 ปี คือ ฟลาวร์ของข้าวสุพรรณบุรี90 มีค่าลดลงอย่างมากในปีที่ 2 ฟลาวร์ของข้าวขาวดอกมะลิ105 ลดมากในปีที่ 3 และฟลาวร์ของข้าวเหนียว กข6 ลดมากในปีที่ 4 ซึ่งจะเห็นว่าข้าวที่มีอะมิโลสสูงจะเปลี่ยนแปลงเร็วกว่าข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ ส่วนความหนืดสูงสุดของสตาร์ชมีค่าลดลงในข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา 4 ปี ของข้าวสุพรรณบุรี90 และ ขาวดอกมะลิ105 ดังนั้นการลดลงของค่าความหนืดสูงสุดของแป้งฟลาวร์แสดงว่ามีเม็ดสตาร์ชแตกตัวน้อยเนื่องจากการขาดของโปรตีน และจากการที่ค่าความหนืดสูงสุดของแป้งสตาร์ชมีค่าลดลงบ่งชี้ว่ามีเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ในระหว่างการเก็บรักษาเนื่องจากการบ่มทางกายภาพทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้น้อย

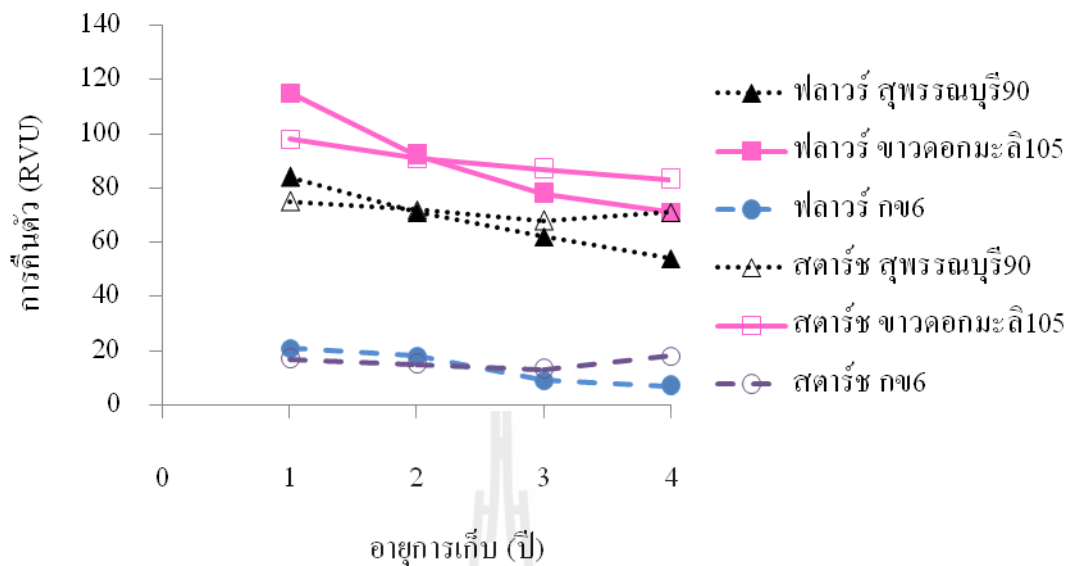


ภาพที่ 36 ความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี

ค่าเบรกดาว์นของแป้งฟลาวัวร์ข้าวสุพรรณบุรี90 และ ข้าวดอกมะลิ105 มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่สตาร์ชมีแนวโน้มลดลงในปีที่ 3 และ 4 แต่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนค่าเบรกดาว์นของแป้งฟลาวัวร์ข้าวเหนียว กข6 มีค่าลดลงในปีที่ 4 ทั้งนี้ค่าเบรกดาว์นมีค่าต่ำอาจเนื่องมาจากสตาร์ชพองตัวน้อย เม็ดสตาร์ชที่ไม่พองตัวย่อมแตกตัวได้ยาก จึงมีค่าเบรกดาว์นต่ำ



ภาพที่ 37 ค่าเบรกดาว์นของแป้งข้าวจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี



ภาพที่ 38 ค่าการคืนตัวของแป้งข้าวจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-4 ปี

การคืนตัวของแป้งฟลาวร์และสตาร์ชของข้าวทั้งสามพันธุ์มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับค่าความหนืดสูงสุดและคาบรีกคาวน์ เนื่องจาก เม็ดสตาร์ชแข็งแรงจึงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยส่งผลให้การคืนตัวน้อยตามไปด้วย

4. ผลของการใช้ความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวและแป้งข้าว

การให้ความร้อนขึ้นกับข้าวด้วยวิธี annealing และ heat moisture treatment (HMT) เพื่อการเร่งอายุการเก็บรักษาข้าวหักพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ขาวดอกมะลิ105 และเหนียว กข6 โดยสภาวะการ annealing เป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 53 องศาเซลเซียส (ต่ำกว่าอุณหภูมิ T_0 7 องศาเซลเซียส) ความชื้น 70% และ เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง และการเร่งอายุการเก็บรักษาข้าวหักด้วยวิธี heat moisture treatment (HMT) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสความชื้น 12% และ 30% เป็นเวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 6 เวลาในการหุงต้ม (นาที) อัตราการดูดซับน้ำ อัตราการขยายปริมาตรของข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT

สถานะการทดลอง	เวลาในการหุงต้ม (นาที)			อัตราการดูดซับน้ำ			อัตราการขยายปริมาตร		
	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6
อายุการเก็บ (เดือน)									
0	12.00 ^d	8.00 ^c	7.00 ^d	2.24 ^a	1.92 ^a	1.29 ^a	2.19 ^b	1.80 ^c	1.44 ^a
6	14.00 ^{cb}	10.00 ^b	10.00 ^c	2.28 ^a	1.96 ^a	1.26 ^a	2.31 ^b	1.92 ^{bc}	1.47 ^a
12	15.30 ^a	12.00 ^a	13.00 ^a	2.00 ^b	1.80 ^b	1.00 ^b	3.00 ^a	2.00 ^b	1.20 ^c
HMT									
0.5 ชั่วโมง	14.30 ^b	10.00 ^b	12.00 ^b	2.23 ^a	1.95 ^a	1.26 ^a	2.31 ^b	2.11 ^b	1.32 ^b
1.0 ชั่วโมง	14.30 ^b	12.00 ^a	12.00 ^b	2.14 ^b	1.86 ^b	1.25 ^a	2.34 ^b	2.20 ^a	1.31 ^b

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

4.1 การเร่งอายุข้าวสารเต็มเมล็ด

4.1.1 สมบัติทางการหุงต้ม

เมื่อเปรียบเทียบข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส กับข้าวหลังจากผ่านการเร่งด้วยวิธีการ HMT ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความชื้น 12 % เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมงและ 1.0 ชั่วโมง มีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5 เวลาในการหุงต้มของข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บรักษาจะมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลา เมื่อผ่านการ HMT เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ทำให้ข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าเวลาในการหุงต้มเทียบเท่ากับข้าวที่ผ่านการเก็บ 6 เดือน และเมื่อผ่านการ HMT เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง ทำให้ข้าวสุพรรณบุรี90 และข้าวเหนียว กข6 มีค่าเวลาในการหุงต้มเทียบเท่ากับข้าวที่ผ่านการเก็บ 6 เดือน แต่ทำให้ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าเวลาในการหุงต้มเทียบเท่ากับข้าวที่ผ่านการเก็บ 12 เดือน

อัตราการดูดซับน้ำของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี90 และข้าวดอกมะลิ105 มีค่าลดลงเมื่อผ่านการเก็บ 12 เดือน ซึ่งการเร่งด้วยการ HMT เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง ทำให้ได้ค่าเท่ากับข้าวที่อายุ 12 เดือน ส่วนข้าวเหนียวที่ผ่านการเร่งด้วยการ HMT ทั้ง 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง มีค่าอัตราการดูดซับน้ำไม่ต่างจากข้าวใหม่ อัตราการขยายปริมาตรของข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี90 และข้าวดอกมะลิ105 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการเก็บ 12 เดือน แต่การ HMT ทั้ง 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง ไม่ทำให้อัตราการขยายปริมาตรของข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี90 เปลี่ยนแปลงไปจากข้าวใหม่ ส่วนข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่ผ่านการ HMT เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ทำให้มีค่าอัตราการขยายปริมาตรเท่ากับข้าวที่มีอายุการเก็บ 12 เดือน แต่การ HMT เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีผลให้อัตราการขยายปริมาตรของข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่ามากกว่าข้าวที่ผ่านการเก็บ 12 เดือน ส่วนข้าวเหนียวเมื่อผ่านการ HMT พบว่ามีอัตราการขยายปริมาตรไม่ต่างจากข้าวใหม่ ทั้งนี้จะเห็นว่าสมบัติทางการหุงต้มของข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่ผ่านการเร่งจะเปลี่ยนแปลงไปจากมากเมื่อเทียบกับข้าวที่ผ่านการเก็บ ซึ่งมากกว่าข้าวที่ข้าวเจ้าสุพรรณบุรี90 ทั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าการเร่งมีผลต่อข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลางมากกว่าข้าวเจ้าอะมิโลสสูง

4.1.2 เนื้อสัมผัสของข้าวสุก

ข้าวทั้งสามพันธุ์เมื่อผ่านการเก็บรักษาไว้นาน จะมีค่าความแข็งของข้าวสุกเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6 เมื่อนำไปผ่านการเร่งด้วยวิธี MHT พบว่า ข้าวสุพรรณบุรี90 ที่ผ่านการเร่งทั้งสองสภากะนั้นมีค่าความแข็งของข้าวสุกมากกว่าข้าวที่เก็บรักษาไว้ 12 เดือน โดยเมื่อใช้เวลาในการ MHT นานขึ้นจะยิ่งทำให้ค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น ส่วนข้าวเจ้าขาวดอกมะลิ105 เมื่อผ่านการ MHT เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง จะมีค่าความแข็งของข้าวสุกเท่ากับข้าวที่มีอายุการเก็บ 0-6 เดือน เมื่อผ่านการ MHT เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง จะมีค่าความแข็งของข้าวสุกอยู่ระหว่างข้าวที่มีอายุการเก็บ

6-12 เดือน ส่วนข้าวเหนียวเมื่อผ่านการ MHT เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง จะมีค่าความแข็งของข้าวสุกเท่ากับข้าวที่มีอายุการเก็บ 12 เดือน แต่เมื่อผ่านการ MHT เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง จะมีค่าความแข็งของข้าวสุกมากกว่าข้าวที่มีอายุการเก็บ 12 เดือน

ตารางที่ 7 ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวสุกจากข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT

สถานะการทดลอง	ความแข็ง (กรัม)			ความเหนียว (กรัม)		
	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6
อายุการเก็บ (เดือน)						
0	2,067 ^c	1,404 ^d	8,919 ^d	47 ^a	109 ^a	1,068 ^a
6	2,319 ^d	1,578 ^c	9,994 ^c	42 ^{ab}	55 ^c	1,010 ^b
12	2,674 ^c	1,741 ^a	10,321 ^b	32 ^c	35 ^d	823 ^d
HMT						
0.5 ชั่วโมง	7,141 ^b	1,486 ^{dc}	10,154 ^b	45 ^{ab}	41 ^{cd}	954 ^c
1.0 ชั่วโมง	7,450 ^a	1,654 ^b	11,025 ^a	32 ^c	34 ^d	897 ^{cd}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

ค่าความเหนียวของข้าวสุกจากข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านเก็บมีค่าลดลง เมื่อผ่านการ MHT เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ทำให้ข้าวสุพรรณบุรี90 จะมีค่าความเหนียวของข้าวสุกเท่ากับข้าวที่มีอายุการเก็บ 6 เดือน และเมื่อผ่านการ MHT เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง จะมีค่าความเหนียวของข้าวสุกเท่ากับ ข้าวที่มีอายุการเก็บ 12 เดือน ข้าวขาวดอกมะลิ105 เมื่อผ่านการ MHT เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง จะมีค่าความเหนียวของข้าวสุกเทียบเท่ากับข้าวที่มีอายุการเก็บ 6 และ 12 เดือน การ MHT เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง จะมีค่าความเหนียวของข้าวสุกเทียบเท่ากับข้าวที่มีอายุการเก็บ 12 เดือน ส่วนข้าวเหนียวเมื่อผ่านการ MHT เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง จะมีค่าความเหนียวของข้าวสุกอยู่ระหว่างข้าวที่มีอายุการเก็บ 6-12 เดือน และเมื่อผ่านการ MHT เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง จะมีค่าความเหนียวของข้าวสุกมากกว่าข้าวที่มีอายุการเก็บ 12 เดือน

จะเห็นว่าการเร่งทำให้ค่าความเหนียวของข้าวที่ผ่านการเร่งทั้งสามพันธุ์มีค่าใกล้เคียงกับข้าวที่ผ่านการเก็บ แต่ค่าความแข็งของข้าวแต่ละพันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงไปจากข้าวใหม่

แตกต่างกัน โดยข้าวสุพรรณบุรีมีค่าเกินกว่าข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา เป็นเวลา 12 เดือน ขณะที่ข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่ผ่านการเร่งมีค่าความเหนียวอยู่ในช่วงค่าของข้าวที่ผ่านการเก็บ อาจเป็นเพราะว่าภายในเมล็ดสตาร์ชของข้าวที่มีอะมิโลสสูงมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า เนื่องจากการ HMT มีผลให้อะมิโลสเข้ามาพันเกี่ยวกับส่วนปลายสายอะมิโลเปกตินทำให้โครงสร้างผลึกแข็งแรงยิ่งขึ้น (Hormdok and Noomhorm, 2007) ซึ่งข้าวที่มีอะมิโลสมากย่อมมีโอกาสเกิดการพันเกี่ยวมากกว่าข้าวที่อะมิโลสต่ำ จึงทำให้ข้าวสุพรรณบุรีที่ถูกเร่งมีการเปลี่ยนแปลงไปจากข้าวที่ผ่านการเก็บมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ105

4.2 การเร่งข้าวหักให้เป็นข้าวเก่าเพื่อใช้ในการผลิตแป้ง

4.2.1 ค่าสีเหลืองของข้าว

การเปลี่ยนแปลงค่าสีเหลืองของข้าวแสดงในตารางที่ 6 การเร่งอายุการเก็บของข้าวใหม่ด้วยวิธี annealing และ HMT พบว่า ข้าวสุพรรณบุรีที่ผ่านการเร่งมีค่าสีเหลืองไม่แตกต่างจากข้าวใหม่และข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา ซึ่งผลของการเร่งก็ไม่มีผลต่อค่าสีเหลืองเช่นเดียวกันกับการเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน ส่วนข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียว กข 6 ที่ผ่านการเก็บนั้น มีค่าสีเหลืองลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ แต่เมื่อผ่านการเร่งโดยการ annealing และการ HMT ด้วยความชื้น 30% ทำให้ข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียว กข 6 มีค่าสีเหลืองน้อยกว่าข้าวใหม่ ทั้งนี้เพราะการ annealing ต้องแช่ข้าวในน้ำทำให้สารสีต่างๆ ละลายไปกับน้ำ ข้าวจึงขาวขึ้น และการ HMT ด้วยความชื้น 30% ก็ต้องแช่ข้าวในน้ำเพื่อเพิ่มความชื้นให้กับเมล็ดข้าวก่อนที่จะนำมาปรับความชื้นเป็น 30% แต่การ HMT ที่ความชื้น 12% เป็นเวลาทั้งหมด 0.5 ชั่วโมงทำให้ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าสีเหลืองไม่ต่างจากข้าวอายุการเก็บ 6 เดือน เมื่อเพิ่มเวลาในการเร่งเป็น 1.0 ชั่วโมง ทำให้ค่าสีเหลืองของทั้งข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียว กข 6 มีค่าไม่ต่างจากข้าวอายุการเก็บ 6 เดือน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าสีนี้น่าจะเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis) เรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่าปฏิกิริยาเทอร์โมไลซิส (thermolysis) หรือการแตกสลายของสตาร์ชเมื่อได้รับความร้อนในระดับสูง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาขั้นต้นของการเกิดสีน้ำตาลแบบไมใช่เอนไซม์ (non-enzymatic browning) ส่วนการเร่งด้วยความชื้น 30% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมงและ 1 ชั่วโมงนั้นได้ค่าสีเหลืองน้อยกว่าข้าวใหม่ เนื่องจากในขั้นตอนการปรับความชื้นเป็น 30% ได้นำข้าวไปแช่น้ำทำให้ห้วงควัตถุที่ผิวของเมล็ดข้าวถูกล้างออกไป และถ้าปริมาณน้ำมากเกินไป (A_w มากกว่า 0.8) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง เนื่องจากน้ำไปเจือจางสารตั้งต้นที่จะเข้าทำปฏิกิริยา (Whistler and Daniel, 1985)

ตารางที่ 8 ค่าสีเหลือง (b*) ของข้าวสารเต็มเมล็ดที่ผ่านการเก็บรักษาและข้าวหักที่ผ่านการ annealing และ HMT

สถานะการทดลอง	ค่าสีเหลือง		
	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6
อายุการเก็บ (เดือน)			
0	17.55 ^a	20.41 ^c	16.39 ^c
6	17.56 ^a	20.99 ^b	17.25 ^b
12	17.49 ^a	22.00 ^a	18.04 ^a
annealing			
12 ชั่วโมง	17.31 ^a	19.10 ^d	15.78 ^d
24 ชั่วโมง	17.28 ^a	19.20 ^d	15.65 ^d
HMT			
ความชื้น 12%, 0.5 ชั่วโมง	17.59 ^a	20.54 ^{bc}	16.59 ^c
ความชื้น 12%, 1.0 ชั่วโมง	17.57 ^a	20.61 ^{bc}	16.89 ^{bc}
ความชื้น 30%, 0.5 ชั่วโมง	17.32 ^a	19.15 ^d	15.44 ^d
ความชื้น 30%, 1.0 ชั่วโมง	17.33 ^a	19.16 ^d	15.51 ^d

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

4.2.2 สมบัติการเกิดเพสท์

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้าน การเกิดเพสท์ของข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาและการเร่งอายุการเก็บแสดงในตารางที่ 9 อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยน (pasting temperature, PT) ของแป้งพลาว์จากข้าวที่ผ่านการเก็บทั้งสามพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บ เมื่อข้าวทั้งสามพันธุ์ผ่านการ annealing ทั้ง 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่า แป้งพลาว์จากข้าวสุพรรณบุรีที่ผ่านการ annealing มีค่า PT เทียบเท่ากับแป้งพลาว์จากข้าวที่มีอายุการเก็บ 6 เดือน แป้งพลาว์จากข้าวขาวดอกมะลิที่ผ่านการเร่งทั้ง 12 และ 24 ชั่วโมง มีค่า PT อยู่ระหว่างข้าวใหม่ และข้าวที่มีอายุการเก็บ 6 เดือน ส่วนการ annealing ข้าวเหนียว กข6 เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ไม่ทำให้ค่า PT ของแป้งพลาว์แตกต่างจากแป้งพลาว์จากข้าวใหม่ แต่การ annealing เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้ค่า PT มีค่าเทียบเท่ากับแป้งพลาว์จากข้าวที่มีอายุการเก็บ 6 เดือน จะเห็นว่าการ annealing ทำให้ค่า PT

เพิ่มขึ้นนี้ เพราะการ annealing จะเห็นขบวนการให้อะมิโลสและอะมิโลเพกติน ทั้งในชั้นออสถฐานและชั้นผลึกจัดเรียงตัวกันใหม่ ทำให้เม็ดสตาร์ชแข็งแรงขึ้น (Jacob et al., 1998; Tester et al., 2000) ซึ่งกลไกในการ annealing ต่อเม็ดสตาร์ชนั้น Jayakody and Hoover (2008) ได้รายงานไว้ว่า เมื่อน้ำเข้าไปในเม็ดสตาร์ชทำให้โซ่กิ่งที่อยู่ในชั้นออสถฐานขยับตัว เมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นจะทำให้หน้าแทรกซึมได้มากขึ้น ทำให้เกลียวคู่ในชั้นผลึกที่อยู่ต่อกับโซ่กิ่งขยับตัวด้วย เมื่อดึงน้ำออกจะทำให้ทั้งโซ่กิ่งและเกลียวคู่จัดเรียงตัวใหม่ โดยทำให้ชั้นผลึกชิดกันมากขึ้น จนเกิดเป็นช่องว่างระหว่างชั้นผลึก (Chung, Moon and Chun, 2000; Nakazawa and Wang., 2003) ดังนั้นข้าวที่ผ่านการ annealing จึงพองตัวยากเพราะน้ำเข้าแทรกซึมในชั้นผลึกได้ยากขึ้นจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัว แต่อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการพองตัวของเม็ดสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการ annealing อาจจะได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงขอโปรตีนด้วย ทั้งนี้เพราะการ annealing ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 53 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มากกว่าอุณหภูมิในการทำลายโครงสร้างของโปรตีนข้าว โดย Teo et al. (2000) รายงานว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างของโปรตีนข้าว (oryzenin denaturation temperature) คือ 47-52 องศาเซลเซียส การเปิดตัวของโปรตีนอาจขัดขวางการดูดซับน้ำของเม็ดสตาร์ช (Martin and Fitzgerald, 2002) จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัว การเปลี่ยนแปลงค่า PT ของข้าวที่ผ่านการเร่งด้วยวิธี HMT พบว่าการ HMT ทุกสภาวะทำให้แป้งฟลาวร์จากข้าวสุพรรณบุรี 90 มีค่า PT เท่ากับแป้งฟลาวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บ 6 เดือน ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการ HMT ด้วยความชื้น 12% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง มีค่า PT ของแป้งฟลาวร์อยู่ระหว่างแป้งฟลาวร์จากข้าวใหม่และแป้งฟลาวร์จากข้าวอายุการเก็บ 6 เดือน เมื่อเพิ่มความชื้นเป็น 1.0 ชั่วโมง ทำให้ PT มีค่าเท่ากับแป้งฟลาวร์จากข้าวที่มีอายุการเก็บ 6 เดือน เมื่อ HMT ด้วยความชื้น 30% ทำให้ค่า PT สูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับแป้งฟลาวร์จากข้าวที่มีอายุการเก็บ 12 เดือน ส่วนข้าวเหนียว เมื่อผ่านการ HMT ทั้งความชื้น 12 และ 30% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง จะทำให้ค่า PT ของแป้งฟลาวร์มีค่าเท่ากับแป้งฟลาวร์จากข้าวที่มีอายุการเก็บ 6 เดือน แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 1.0 ชั่วโมง จะทำให้ PT มีค่าเท่ากับแป้งฟลาวร์จากข้าวที่มีอายุการเก็บ 6 และ 12 เดือน แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการ HMT ของข้าวเหนียวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ค่า PT มากกว่าความชื้น ทั้งนี้เพราะว่าการ HMT เป็นการให้ความร้อนสูงและใช้ความชื้นไม่เกิน 35% (Jacob and Delcour, 1998) การให้ความร้อนเป็นเวลานานจึงอาจมีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเพิ่มความชื้น แต่การ HMT ด้วยความชื้นสูงกว่า ก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างได้มากกว่า เพราะความชื้นจะทำหน้าที่เป็นตัวนำความร้อนเข้าไปในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช อย่างไรก็ตาม การ HMT ทำให้ค่า PT สูงกว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านการ HMT นั้นเนื่องมาจากการ HMT ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณปลายสายของเกลียวคู่ในชั้นผลึก เมื่อลดอุณหภูมิลง

ทำให้ปลายสายของเกลียวคู่จัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบมากขึ้น (Olayinka et al., 2008) ทำให้ต้องใช้ อุณหภูมิสูงในการทำให้ความหนืดเริ่มเปลี่ยน นอกจากนี้การใช้ความร้อนสูงก็อาจจะส่งผลต่อ การเปลี่ยนแปลงของโปรตีน เมื่อโปรตีนเสียสภาพเนื่องจากความร้อนสูง มีผลต่อปฏิสัมพันธ์ ระหว่างสตรักเจอร์กับโปรตีน ซึ่งจะส่งผลต่อการดูดน้ำของเม็ดสตรักเจอร์

ค่าเบรกดาวน์ (breakdown, BD) ของแป้งฟลาวัวร์ข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บ 6 เดือน มีค่าไม่ต่างจากแป้งฟลาวัวร์จากข้าวใหม่ แต่เมื่อเก็บเป็นเวลา 12 เดือนจะมีค่าต่ำกว่า แป้งฟลาวัวร์จากข้าวใหม่ เมื่อผ่านการ annealing เป็นเวลา 12 ชั่วโมงไม่ทำให้ค่า BD ของแป้งฟลาวัวร์ จากข้าวทั้งสามพันธุ์เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 24 ชั่วโมง จะทำให้แป้งฟลาวัวร์จากข้าวทั้ง สามพันธุ์นั้นมีค่า BD เทียบเท่ากับแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่มีอายุการเก็บ 12 เดือน ค่า BD เป็นค่าที่บ่งชี้ การเปลี่ยนแปลงหลังจากเม็ดสตรักเจอร์ของตัว ซึ่งเม็ดสตรักเจอร์ที่มีความแข็งแรงแรงยอมทนทานต่อการ แดกออกหลังการพองตัว ทำให้ค่า BD น้อย ดังนั้นการ annealing ทำให้ค่า BD ลดลงจึงบ่งชี้ว่า หลังการ annealing นั้นภายในโครงสร้างเม็ดสตรักเจอร์มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น (Genkina et al., 2004; Tester et al., 2000) ส่วนการเร่งอายุการเก็บด้วย HMT นั้นพบว่า การ HMT ด้วยความชื้น 12 % ไม่ทำให้ค่า BD ของแป้งฟลาวัวร์ทั้งสามสายพันธุ์ต่างจากแป้งฟลาวัวร์จาก ข้าวใหม่ การ MHT ด้วยความชื้น 30% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ทำให้ค่า BD ของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ ผ่านการเร่งทั้งสามพันธุ์มีค่าอยู่ระหว่างแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่มีอายุการเก็บ 6-12 เดือน แต่เมื่อเพิ่ม เวลาเป็น 1.0 ชั่วโมง ทำให้ค่า BD ของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวสุพรรณบุรี 90 และข้าวเหนียว กข6 มีค่า เทียบเท่ากับแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่มีอายุการเก็บ 12 เดือน ส่วนในข้าวขาวดอกมะลิแป้งฟลาวัวร์มีค่า BD ต่ำกว่าแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่มีอายุการเก็บ 12 เดือน ทั้งนี้จะเห็นว่าระดับการ HMT ที่ความชื้นสูง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่ความชื้นต่ำ

ค่าการคืนตัว (setback, SB) ของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวสุพรรณบุรี 90 ที่ผ่านการเก็บจะมีค่ามากกว่าข้าวใหม่ในเดือนที่ 6 แต่ค่าจะลดลงในเดือนที่ 12 ขณะที่ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และ ข้าวเหนียว กข6 ที่ผ่านการเก็บมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บ เมื่อผ่านการ annealing ด้วยเวลา 12 ชั่วโมง แป้งฟลาวัวร์จากข้าวสุพรรณบุรีมีค่าเท่ากับข้าวที่ผ่านการเก็บ 6 เดือน และ 12 เดือน ส่วน ของข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวมีค่าเท่ากับข้าวที่ผ่านการเก็บ 12 เดือน แต่การ annealing ด้วย เวลา 24 ชั่วโมง ทั้งสามพันธุ์จะมีค่าลดลง ซึ่งค่า SB เป็นค่าที่บ่งชี้ความสามารถในการเซตตัวของ เจล โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินสายสั้นที่มีความยาวเหมาะสมต่อการเซตตัว จะเซตเจลได้เร็ว จะมีค่า SB มาก (Olayinka et al., 2008) ฉะนั้นการ annealing 12 ชั่วโมง ที่ทำให้ค่า SB เพิ่มขึ้นบ่งชี้ว่าเมื่อข้าวผ่านการ annealing อาจเกิดจากการปรับตัวของพันธะไฮโดรเจนภายใน เกลียวคู่ของอะมิโลเพกตินภายในชั้นผลึก ระหว่างอะมิโลสในชั้นออสัญฐาน และระหว่างอะมิโลส

กับอะมิโลเพคติน (Genkina et al., 2004; Tester et al., 2000) แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 24 ชั่วโมงกลับทำให้ค่า SB ลดลง อาจเนื่องจากการ annealing เป็นเวลานานขึ้นทำให้โมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินสายสั้นเกิดการจัดเรียงตัวใหม่โดยเกิดการพันเกลียวกันอย่างแน่นหนา (Chung, Moon and Chun, 2000; Nakazawa and Wang., 2003) เมื่อโมเลกุลสายสั้นมีน้อยลงก็จะมีค่า SB ต่ำลง ส่วนการเร่งความเก่าด้วย HMT ทำให้ค่า SB ของแป้งฟลาวร์จากข้าวสุพรรณบุรีที่ผ่านการ HMT ด้วยความชื้น 12% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมงมีค่าน้อยกว่าข้าวใหม่ การ HMT ด้วยความชื้น 12% เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับแป้งฟลาวร์จากข้าวอายุการเก็บ 6 เดือน ส่วนการ HMT ด้วยความชื้น 30 % มีค่าน้อยกว่าข้าวใหม่ ซึ่งจากผลของอายุการเก็บ จะเห็นว่าค่า SB ของ ฟลาวร์จากข้าวสุพรรณบุรี 90 ที่ผ่านเก็บรักษาที่ 6 เดือนมีค่ามากกว่าข้าวใหม่แต่ที่อายุการเก็บ 12 เดือน มีค่าน้อยกว่าที่อายุการเก็บ 6 เดือน นั่นคือการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาของข้าวสุพรรณบุรี 90 จะมีค่า SB 2 ช่วง โดยช่วงแรกของการเปลี่ยนแปลง (0-6 เดือน) จะมีค่า SB เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บ และช่วงหลังจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ จึงอาจเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า SB ของข้าวที่ผ่านการ HMT ด้วยความชื้น 12% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมงนั้นเทียบเท่ากับช่วงแรกของการเปลี่ยนแปลงอายุการเก็บ การ HMT ด้วยความชื้น 12% เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมงมีค่า SB เท่ากับแป้งฟลาวร์จากข้าวอายุการเก็บ 6 เดือน และเมื่อเพิ่มความชื้นเป็น 30 % จะมีค่า SB น้อยกว่า 6 เดือนอาจเป็นเพราะว่า ได้เกิดการเร่งในระดับที่เท่ากับข้าวอายุการเก็บ 6- 12 เดือน ส่วนข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการ HMT ด้วยความชื้น 12% ทั้ง 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง มีค่าไม่แตกต่างจากข้าวใหม่ แต่เมื่อผ่านการ HMT ด้วยความชื้น 30% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง มีค่า SB อยู่ระหว่างแป้งฟลาวร์จากข้าวที่มีอายุการเก็บ 0-6 เดือน เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 1.0 ชั่วโมงจะมีค่าไม่ต่างจากข้าวใหม่ ซึ่งการเพิ่มความชื้นและเวลาเป็นการเพิ่มโอกาสในการเปลี่ยนแปลงให้เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น ส่วนข้าวเหนียว กข6 ที่ผ่านการ HMT ด้วยความชื้น 12% ทั้ง 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง และการ HMT ด้วยความชื้น 30% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง จะมีค่า SB อยู่ระหว่างข้าวที่มีอายุการเก็บ 6-12 เดือน แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 1.0 ชั่วโมง จะมีค่าไม่ต่างจากข้าวใหม่ ซึ่งน่าจะเป็นผลอย่างเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในการ HMT ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยความชื้น 30% เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง

ตารางที่ 9 ค่าอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยน ค่าเบรกดาวน์ และค่าการคืนตัวของแป้งฟลาวาร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT

สถานะการทดลอง	อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยน (°ซ)			เบรกดาวน์ (RVU)			การคืนตัว (RVU)		
	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6
อายุการเก็บ (เดือน)									
0	87.3 ^c	73.0 ^c	66.4 ^c	26.0 ^a	66.2 ^a	75.1 ^a	61.11 ^c	53.0 ^c	7.0 ^c
6	87.8 ^{bc}	88.0 ^{ab}	70.4 ^b	25.0 ^a	67.3 ^a	81.0 ^a	101.0 ^a	117.0 ^b	9.0 ^c
12	93.7 ^a	92.0 ^a	71.6 ^a	12.0 ^c	25.0 ^c	47.4 ^c	87.0 ^b	126.0 ^a	29.0 ^a
annealing									
12 ชั่วโมง	87.8 ^{bc}	76.0 ^c	66.6 ^c	24.1 ^a	61.2 ^{ab}	77.5 ^a	92.0 ^{ab}	128.0 ^a	32.2 ^a
24 ชั่วโมง	87.7 ^{bc}	76 ^c	69.4 ^b	15.4 ^{bc}	32.4 ^c	41.0 ^c	62.2 ^c	101.0 ^c	2.00 ^d
HMT									
ความชื้น 12%, 0.5 ชั่วโมง	89.0 ^b	76.0 ^{bc}	70.3 ^b	23.2 ^a	68.3 ^a	78.0 ^a	81.0 ^b	58.0 ^c	15.1 ^b
ความชื้น 12%, 1.0 ชั่วโมง	89.0 ^b	82.0 ^b	71.5 ^{ab}	20.8 ^a	64.4 ^{ab}	69.1 ^{ab}	96.0 ^a	68.0 ^c	14.0 ^b
ความชื้น 30%, 0.5 ชั่วโมง	92.0 ^{ab}	91.1 ^a	69.4 ^b	18.4 ^b	55.4 ^b	64.7 ^b	74.0 ^{bc}	86.0 ^d	14.0 ^b
ความชื้น 30%, 1.0 ชั่วโมง	87.0 ^{bc}	88.0 ^{ab}	71.3 ^{ab}	10.7 ^c	18.2 ^d	41.4 ^c	54.3 ^d	61.0 ^e	7.9 ^c

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงว่ามีความแตกต่างสถิติที่ $p \leq 0.05$

เมื่อสกัดสตาร์ชออกมาจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาและการเร่งอายุการเก็บด้วยวิธี annealing และ HMT ดังแสดงผลในตารางที่ 9 พบว่า สตาร์ชข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บมีค่า PT BD และ SB คงที่ เมื่อข้าวทั้งสามพันธุ์ผ่านการเร่งด้วยวิธี annealing ทั้ง 12 และ 24 ชั่วโมง มีค่า PT, BD และ SB ของแป้งสตาร์ชไม่แตกต่างจากสตาร์ชข้าวใหม่ การเร่งความแก่ด้วยวิธี HMT ทุกสภาวะมีผลให้ค่า PT ของสตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี90 และข้าวเหนียว กข 6 มีค่าไม่แตกต่างจากสตาร์ชจากข้าวใหม่ แต่ข้าวขาวดอกมะลิ105 เมื่อผ่านการ HMT ด้วยความชื้น 12% เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง และ ความชื้น 30 % ทั้งเวลา 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง มีผลให้ ค่า PT มีค่ามากกว่าสตาร์ชจากข้าวใหม่ นอกจากนี้การ HMT ความชื้น 30% เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง มีผลให้สตาร์ชจากข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่า BD และ SB ต่ำกว่าสตาร์ชจากข้าวใหม่ ในขณะที่สตาร์ชจากข้าวสุพรรณบุรี90 และข้าวเหนียว กข 6 มีค่า BD และ SB ไม่แตกต่างจากสตาร์ชจากข้าวใหม่ แสดงว่าการ HMT ทำให้เม็ดสตาร์ชแข็งแรงแรงมากยิ่งขึ้น การเปลี่ยนแปลงค่า PT BD และ SB เกิดขึ้นกับแป้งฟลาวร์ แต่ไม่เกิดกับแป้งสตาร์ช (ยกเว้นการ HMT ความชื้น 30% เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง ของข้าวขาวดอกมะลิ105) บ่งชี้ว่า annealing และ HMT มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชน้อยมากจึงทำให้สมบัติทางความหนืดของสตาร์ชคงที่ แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขององค์ประกอบอื่น ๆ โดยเฉพาะ โปรตีนซึ่งมีปริมาณมากกว่าจากสตาร์ช

4.2.3 กำล้างการพองตัว ความสามารถในการละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะ

เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งที่มีปริมาณน้ำมากเกินพอที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส จะทำให้แป้งเกิดการพองตัวและมีบางส่วนของเม็ดสตาร์ชละลายออกมา ซึ่งในส่วนที่ละลายออกมาจะมีอะมิโลสปะปนอยู่ ซึ่งหากโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงก็จะมีผลต่อค่ากำล้างการพองตัว ความสามารถในการละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะ ดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งเป็นค่ากำล้างการพองตัว ความสามารถในการละลาย และปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะของแป้งฟลาวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวเจ้าสุพรรณบุรี90 และข้าวขาวดอกมะลิ105 ทั้งนี้ไม่ได้นำเสนอผลการทดลองของข้าวเหนียว กข6 เนื่องจากไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีการเดียวกันได้

จากผลการทดลอง พบว่า กำล้างการพองตัวของข้าวที่ผ่านการเก็บมีแนวโน้มสูงขึ้นตามระยะเวลา ความสามารถในการละลายและปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะนั้นก็มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ แต่เมื่อผ่านการเร่งด้วยวิธี annealing ทำให้แป้งฟลาวร์จากข้าวทั้งสองพันธุ์มีค่ากำล้างการพองตัวลดลง โดยที่ค่ากำล้างการพองตัวของแป้งสตาร์ชไม่ต่างจากข้าวใหม่ บ่งชี้ว่า การ annealing มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงภายในเม็ดสตาร์ชน้อยมากแต่มีผลให้โครงสร้างของโปรตีนเปลี่ยนแปลงซึ่งจะมีผลในการขัดขวางการดูดซับน้ำของเม็ดสตาร์ช การเร่งด้วยวิธี HMT ด้วย

ความชื้น 12% ทั้ง 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง ทำให้ข้าวทั้งสองพันธุ์มีค่ากำลังการพองตัวของแป้งฟลาวร์ และแป้งสตาร์ชไม่แตกต่างจากข้าวใหม่ แต่การ HMT ด้วยความชื้น 30% ทั้ง 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง ทำให้แป้งฟลาวร์ข้าวสุพรรณบุรีมีค่ากำลังการพองตัวเทียบเท่ากับข้าวที่มีอายุการเก็บ 6 เดือน ขณะที่สตาร์ชมีค่ากำลังการพองตัวลดลง แต่ลดลงเพียงเล็กน้อย ส่วนฟลาวร์จากข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่ากำลังการพองตัวเทียบเท่ากับข้าวที่มีอายุการเก็บ 12 เดือน โดยที่ของสตาร์ชมีค่าไม่ต่างจากข้าวใหม่ จะเห็นว่าการ HMT ด้วยความชื้น 30% ทำให้ค่ากำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นแต่ที่ความชื้น 12% ค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าขณะที่ทำการ MHT ความชื้นที่มีปริมาณมากจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายเกลียวคู่มากกว่า และอาจเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนกับสตาร์ชทำให้เสริมกำลังการพองตัว

ความสามารถในการละลายทั้งของข้าวที่ผ่านการเก็บและข้าวที่ผ่านการเร่งด้วยวิธีการ annealing และ MHT นั้นมีค่าต่ำกว่าข้าวใหม่ โดยข้าวสุพรรณบุรีที่ผ่านการเร่งด้วย annealing มีความสามารถในการละลายของแป้งฟลาวร์เทียบเท่ากับข้าวที่ผ่านการเก็บ 6 เดือน ส่วนของข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่าเทียบเท่ากับข้าวที่ผ่านการเก็บ 12 เดือน โดยที่ของค่าสตาร์ช ทั้งสองพันธุ์ไม่เปลี่ยนแปลงและมีค่าใกล้เคียงข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา การ MHT ด้วยเวลา 0.5 ชั่วโมง ทำให้ข้าวสุพรรณบุรี 90 มีค่าความสามารถในการละลายของแป้งฟลาวร์เทียบเท่ากับข้าวที่ผ่านการเก็บ 6 เดือน ส่วนการ MHT ด้วยเวลา 1.0 ชั่วโมง มีค่าเทียบเท่ากับข้าวที่ผ่านการเก็บ 12 เดือน โดยที่การ MHT ด้วยความชื้น 30% ทำให้แป้งสตาร์ชของข้าวสุพรรณบุรี 90 มีค่าต่ำกว่าข้าวใหม่ แสดงว่าการ MHT ด้วยความชื้น 30% มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ช ข้าวสุพรรณบุรี 90 ขณะที่ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เมื่อผ่านการ MHT ด้วยความชื้น 12% เป็นเวลา 0.5 และ 1.0 ชั่วโมง ทำให้ค่าความสามารถในการละลายของแป้งฟลาวร์เทียบเท่ากับข้าวที่ผ่านการเก็บ 12 เดือน แต่ที่ความชื้น 30% นั้นมีค่าต่ำกว่าข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา โดยที่ค่าความสามารถในการละลายของสตาร์ชไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ การ MHT ข้าวขาวดอกมะลิ 105 นั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนมากกว่าสตาร์ช

ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะของแป้งฟลาวร์จากข้าวสุพรรณบุรี 90 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการเร่งด้วย annealing มีค่าไม่แตกต่างจากข้าวใหม่ (ตารางที่ 12) แต่เมื่อข้าวสุพรรณบุรี 90 ผ่านการเร่งด้วยการ MHT พบว่าถ้าใช้เวลาในการเร่ง 0.5 ชั่วโมง จะมีปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะเทียบเท่ากับข้าวที่ผ่านการเก็บ 12 เดือน แต่ถ้าใช้เวลาในการเร่ง 1.0 ชั่วโมง จะทำให้มีค่าต่ำกว่าข้าวที่ผ่านการเก็บ 12 เดือน

ตารางที่ 10 ค่าอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยน ค่าเบรกดาวน์ และค่าการคืนตัวของแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT

สภาวะการทดลอง	อุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเปลี่ยน (°ซ)			เบรกดาวน์ (RVU)			การคืนตัว (RVU)		
	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6
อายุการเก็บ (เดือน)									
0	85.2 ^{ab}	71.4 ^c	71.6 ^{ab}	20.1 ^a	87.4 ^a	89.4 ^a	63.0 ^b	93.1 ^{ab}	9.5 ^b
6	85.2 ^{ab}	71.8 ^c	72.5 ^a	19.5 ^a	90.2 ^a	84.8 ^{ab}	74.1 ^{ab}	93.5 ^{ab}	11.2 ^{ab}
12	86.6 ^a	72.7 ^c	72.7 ^{ab}	14.9 ^{ab}	84.2 ^a	93.5 ^a	51.2 ^{bc}	104.0 ^a	14.0 ^{ab}
annealing									
12 ชั่วโมง	84.3 ^b	71.5 ^c	70.6 ^b	18.5 ^a	88.1 ^a	81.8 ^{ab}	75.0 ^a	94.1 ^b	13.0 ^{ab}
24 ชั่วโมง	87.7 ^a	71.4 ^c	71.9 ^{ab}	16.4 ^{ab}	79.5 ^{ab}	85.6 ^{ab}	62.0 ^b	98.4 ^{ab}	17.0 ^a
HMT									
ความชื้น 12%, 0.5 ชั่วโมง	88.0 ^a	73.0 ^{bc}	72.0 ^a	21.5 ^a	96.2 ^a	98.5 ^a	68.0 ^a	86.5 ^b	13.2 ^{bc}
ความชื้น 12%, 1.0 ชั่วโมง	88.1 ^a	78.0 ^a	72.2 ^a	22.1 ^a	84.4 ^a	91.5 ^a	53.3 ^{bc}	86.5 ^b	11.5 ^b
ความชื้น 30%, 0.5 ชั่วโมง	88.4 ^a	75.1 ^b	72.5 ^a	15.6 ^{ab}	87.3 ^a	79.4 ^{ab}	40.2 ^c	101.4 ^a	13.4 ^{ab}
ความชื้น 30%, 1.0 ชั่วโมง	89.0 ^a	75.4 ^b	72.5 ^a	13.7 ^b	71.6 ^b	74.2 ^b	37.7 ^c	70.3 ^c	10.3 ^b

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงว่ามีความแตกต่างสถิติที่ $p \leq 0.05$

ตารางที่ 11 กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งฟลาวัวร์และแป้งสตาร์ชจากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT

สภาวะการทดลอง	กำลังการพองตัว				ความสามารถในการละลาย (%)			
	สุพรรณบุรี90		ข้าวดอกมะลิ105		สุพรรณบุรี90		ข้าวดอกมะลิ105	
	ฟลาวัวร์	สตาร์ช	ฟลาวัวร์	สตาร์ช	ฟลาวัวร์	สตาร์ช	ฟลาวัวร์	สตาร์ช
อายุการเก็บ (เดือน)								
0	10.97 ^c	11.05 ^a	12.54 ^b	12.89 ^{ab}	7.90 ^a	10.90 ^a	7.61 ^a	11.27 ^a
6	11.31 ^{ab}	11.03 ^a	12.58 ^b	12.87 ^{ab}	6.80 ^b	10.75 ^{ab}	7.41 ^a	11.36 ^{ab}
12	11.41 ^a	11.02 ^a	13.04 ^a	12.82 ^{ab}	5.98 ^c	10.88 ^a	6.74 ^b	11.56 ^a
annealing								
12 ชั่วโมง	10.26 ^d	11.09 ^{ab}	11.98 ^c	12.41 ^b	7.10 ^{ab}	10.91 ^a	6.50 ^{bc}	10.03 ^b
24 ชั่วโมง	10.11 ^d	11.21 ^a	11.04 ^d	12.58 ^b	7.01 ^b	11.14 ^a	6.20 ^{bc}	10.12 ^b
HMT								
ความชื้น 12%, 0.5 ชั่วโมง	10.98 ^c	11.07 ^a	12.45 ^b	13.13 ^a	6.28 ^b	10.52 ^b	6.84 ^{ab}	10.41 ^b
ความชื้น 12%, 1.0 ชั่วโมง	10.87 ^c	10.96 ^{ab}	11.06 ^d	12.86 ^{ab}	6.01 ^c	9.91 ^{bc}	6.40 ^{bc}	10.13 ^b
ความชื้น 30%, 0.5 ชั่วโมง	11.12 ^b	10.78 ^{ab}	13.34 ^a	12.11 ^b	6.27 ^b	8.72 ^c	5.95 ^{cd}	10.11 ^b
ความชื้น 30%, 1.0 ชั่วโมง	11.03 ^{bc}	10.45 ^b	13.12 ^a	11.75 ^b	5.48 ^c	7.54 ^c	5.89 ^d	9.89 ^b

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงว่ามีความแตกต่างสถิติที่ $p \leq 0.05$

ตารางที่ 12 ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะของแป้งฟลาวัวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT

สภาวะการทดลอง	ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะ (%)	
	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105
อายุการเก็บ (เดือน)		
0	4.03 ^{ab}	2.36 ^{ab}
6	4.10 ^a	2.37 ^{ab}
12	3.62 ^c	2.04 ^c
annealing		
12 ชั่วโมง	4.01 ^b	2.15 ^b
24 ชั่วโมง	3.87 ^b	2.43 ^a
HMT		
ความชื้น 12%, 0.5 ชั่วโมง	3.52 ^{cd}	2.21 ^b
ความชื้น 12%, 1.0 ชั่วโมง	3.32 ^d	2.10 ^{bc}
ความชื้น 30%, 0.5 ชั่วโมง	3.56 ^{cd}	2.03 ^c
ความชื้น 30%, 1.0 ชั่วโมง	3.15 ^e	1.89 ^c

ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างสถิติที่ $p \leq 0.05$

4.2.4 สมบัติการเกิดเจลลิตินเซชัน

เมื่อเปรียบเทียบข้าวอายุ 10 เดือน กับข้าวใหม่ของทั้งสามพันธุ์ (ตารางที่ 13) พบว่าข้าวที่ผ่านการเก็บมีค่าอุณหภูมิในการเริ่มเกิดเจลลิตินเซชัน (T_0) มากกว่าข้าวใหม่ และมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินเซชัน ($T_c - T_0$) ไม่แตกต่างจากข้าวใหม่

ข้าวใหม่ที่ผ่านการเร่งด้วย annealing 12 ชั่วโมง พบว่า ข้าวสุพรรณบุรี90 และข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่า T_0 มากกว่าข้าวอายุ 10 เดือน ส่วนข้าวเหนียว กข6 มีค่าใกล้เคียงข้าวอายุ 10 เดือน ค่า T_0 เพิ่มขึ้น แสดงว่า การ annealing ทำให้โครงสร้างภายในเม็ดสคาร์ชแข็งแรงขึ้น จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำลายโครงสร้าง ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของข้าวแต่ละพันธุ์ขึ้นกับปริมาณอะมิโลส คือ ข้าวอะมิโลสสูง (ข้าวสุพรรณบุรี90) เมื่อผ่านการเร่ง มีค่า T_0 เพิ่มขึ้น 4.09 องศาเซลเซียส ข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่า T_0 เพิ่มขึ้น 2.40 องศาเซลเซียสและ ข้าวเหนียวมีค่า T_0 เพิ่มขึ้น 1.15 องศาเซลเซียสจะเห็นว่าข้าวที่มีอะมิโลสสูงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ เพราะฉะนั้นที่เร่งด้วย annealing พลังงานความร้อนจะขับเคลื่อนน้ำให้ผ่านไปในชั้นออสันฐาน ทำให้อะมิโลส ที่อยู่ในชั้นออสันฐานเคลื่อนที่แล้วเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ทำให้โครงสร้างภายใน

เมื่อศัตรูแข็งแรงกว่าก่อนการ annealing (Lawal, 2005) เมื่อเพิ่มเวลาในการ annealing เป็น 24 ชั่วโมง ยิ่งทำให้ค่า T_0 ของทั้งสามเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของอะมิโลสมีมากขึ้น เป็นการเพิ่มโอกาสให้อะมิโลสที่ขยับตัวได้มีปริมาณมากขึ้น และอาจจะมีผลทำให้เกิดการขยับตัวในส่วนของโครงสร้างชั้นผลึก (Hoover and Vasanthan, 1994) ซึ่งโครงสร้างที่ขยับตัวจะจัดเรียงตัวใหม่ที่ทำให้ศัตรูมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อพิจารณาความกว้างของช่วงอุณหภูมิ ในการเกิดเจลลิตินชั้น (T_c-T_0) พบว่าการ annealing นั้นทำให้ข้าวทั้งสามพันธุ์มี T_c-T_0 แคบลง ตามระยะเวลาในการ annealing และแคบลงกว่าข้าวที่ผ่านเก็บอายุ 10 เดือน เพราะวาระหว่างที่มีการ annealing ส่วนอะมิโลสในชั้นอสัณฐานเคลื่อนที่แล้วจัดเรียงตัวใหม่ที่มีความเป็นระเบียบมากขึ้น (Seow and Thevamalar, 1993) ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิ T_0 สูงขึ้น ส่งผลให้ผลต่างระหว่าง T_c และ T_0 ลดลง แต่ข้าวเหนียว กข6 ที่ผ่านการเร่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมงมี T_0 เทียบเท่ากับข้าวอายุการเก็บ 10 เดือน ซึ่งให้เห็นว่าที่สภาวะการเร่งเดียวกันข้าวที่มีอะมิโลส สูงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ เพราะโครงสร้างของข้าวที่มีอะมิโลสต่ำอาจจะไม่มีการจัดเรียงตัวของอะมิโลส

การเร่งอายุการเก็บของข้าวด้วยวิธี HMT ที่มีความชื้น 12 % เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง พบว่าค่า T_0 และ T_c-T_0 ของข้าวสุพรรณบุรี90 และข้าวเหนียว กข6 นั้นมีค่าไม่แตกต่างจากข้าวใหม่ ส่วนในข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่า T_0 และ T_c-T_0 เทียบเท่ากับข้าวอายุการเก็บ 10 เดือน การ HMT ที่ความชื้น 12 % เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง ทำให้ข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่า T_0 เทียบเท่ากับกับข้าวอายุการเก็บ 10 เดือน แต่มีค่า T_c-T_0 กว้างกว่าข้าวใหม่ การที่ T_c-T_0 กว้างแสดงว่าภายในโครงสร้างเมล็ดศัตรูเกิดความไม่สม่ำเสมอ (inhomogeneity) โดยชั้นผลึกที่มีความเป็นระเบียบน้อยจะใช้อุณหภูมิต่ำ และชั้นผลึกที่มีความเป็นระเบียบมากจะใช้อุณหภูมิสูง (Seow and Thevamalar, 1993) การ HMT ที่ความชื้น 30% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ทำให้ค่า T_0 ของข้าวสุพรรณบุรี90 มีค่ามากกว่าข้าวอายุการเก็บ 10 เดือน ขณะที่ของข้าวขาวดอกมะลิ105 และ ข้าวเหนียว กข6 นั้นมีค่าใกล้เคียงกับข้าวอายุการเก็บ 10 เดือน ส่วนค่า T_c-T_0 ของข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าอยู่ในช่วงอายุการเก็บ 0-10 เดือน การ HMT ที่ความชื้น 30% เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง สำหรับข้าวสุพรรณบุรี90 และข้าวขาวดอกมะลิ105 นั้นมีผลให้ T_0 และ T_c-T_0 มีค่ามากกว่าข้าวอายุการเก็บ 10 เดือน ซึ่งสภาวะที่มีการเร่งด้วยการเพิ่มความชื้นและเวลาจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าทุกสภาวะ ส่งผลให้ข้าวมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นจึงมี T_0 สูงขึ้นแต่สำหรับ T_c-T_0 ที่กว้างขึ้นอาจเป็นเพราะการเคลื่อนที่ของน้ำในเมล็ดข้าวไม่สม่ำเสมอจึงทำให้บริเวณผิวเมล็ดข้าวเปลี่ยนแปลงมากกว่า แต่ทำให้ ค่า T_0 และ T_c-T_0 ของข้าวเหนียวใกล้เคียงข้าวที่มีอายุการเก็บ 10 เดือน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าทางความร้อนแล้ว จะเห็นว่าการเร่งอายุของข้าวด้วยวิธี HMT นั้นในข้าวสุพรรณบุรี90 ควรใช้สภาวะ ความชื้น 12% เวลา 1.0 ชั่วโมง. ส่วนหอมมะลิ105 ใช้สภาวะ ความชื้น 12% เวลา 0.5 ชั่วโมง.และข้าวเหนียว กข6 ใช้สภาวะ ความชื้น 30% เวลา 1.0 ชั่วโมง

ตารางที่ 13 อุณหภูมิในการเริ่มเกิดเจลลาติโนเซชัน และช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชัน ของแป้งฟลาวัวร์ข้าว ที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT

สภาวะการทดลอง	อุณหภูมิในการเริ่มเกิดเจลลาติโนเซชัน (องศาเซลเซียส)			ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (องศาเซลเซียส)		
	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	เหนียว กข6
อายุการเก็บ (เดือน)						
0	60.27 ^d	62.01 ^c	60.29 ^c	12.22 ^{bc}	11.69 ^c	14.82 ^b
10	61.78 ^c	63.13 ^b	61.55 ^b	11.34 ^c	10.99 ^c	13.72 ^b
annealing						
12 ชั่วโมง	64.36 ^b	64.51 ^{ab}	61.44 ^b	7.90 ^d	8.09 ^d	9.10 ^c
24 ชั่วโมง	66.36 ^a	66.02 ^a	65.54 ^a	6.76 ^d	7.99 ^d	8.54 ^c
HMT						
ความชื้น 12%, 0.5 ชั่วโมง	60.15 ^d	63.18 ^b	59.57 ^c	12.63 ^b	11.25 ^c	14.62 ^b
ความชื้น 12%, 1.0 ชั่วโมง	62.18 ^c	64.21 ^{ab}	61.56 ^{bc}	14.32 ^{ab}	13.81 ^{ab}	15.94 ^a
ความชื้น 30%, 0.5 ชั่วโมง	65.54 ^a	63.55 ^b	60.59 ^c	13.58 ^b	12.27 ^b	13.21 ^b
ความชื้น 30%, 1.0 ชั่วโมง	65.01 ^a	65.07 ^a	61.51 ^{bc}	15.12 ^a	14.45 ^a	16.54 ^a

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

4.2.5 ปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

ข้าวที่ผ่านการเก็บรักษานั้นจะมีปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยลดลง ดังแสดงในตารางที่ 14 เมื่อผ่านการเร่งด้วยวิธี annealing ทั้ง 12 และ 24 ชั่วโมง มีปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยมากกว่าข้าวใหม่และข้าวที่ผ่านการเก็บ เป็นเวลา 12 เดือน เนื่องจากการให้ความร้อนขึ้นส่งผลให้เกิดการทำลายแรงยึดเหนี่ยวภายใน โมเลกุลของสตาร์ช ทำให้เกิดรูพรุนภายในเม็ดสตาร์ช (Gunaratne and Hoover, 2002) และอาจทำลายสายเกลียวคู่ภายในเม็ดสตาร์ช (Anderson et al., 2002) จึงส่งผลทำให้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสสามารถเข้าไปย่อยได้เพิ่มสูงขึ้น ข้าวที่ผ่านการ HMT ที่สภาวะความชื้นความชื้น 12% เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง พบว่าปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยใกล้เคียงข้าวใหม่ ส่วนการ HMT ที่ความชื้น 12% เป็นเวลา 1.0 ชั่วโมง พบว่าปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยมีค่าน้อยกว่าข้าวใหม่ หรือย่อยยากขึ้น โดยปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยของข้าวสุพรรณบุรี 90 และข้าวเหนียว กข6 มีค่าทางสถิติไม่แตกต่างจากข้าวอายุการเก็บ 6 เดือน ส่วนสภาวะการเร่งที่มีความชื้นเพิ่มเป็น 30% เวลา 0.5 ชั่วโมง พบว่าข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยมากกว่าข้าวใหม่ เนื่องจากน้ำทำหน้าที่ในการแทรกผ่านโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชจึงอาจทำให้เกิดรูพรุนทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาได้ง่าย แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 1.0 ชั่วโมง กลับทำให้ปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยของข้าวทั้งสามพันธุ์ลดลง อาจเป็นเพราะว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเร่ง ทำให้การจัดเรียงตัวของชั้นผลึกภายใน โครงสร้างของสตาร์ชนั้นชิดกันแน่นมากขึ้น ทำให้ข้าวเจ้าทั้งสองพันธุ์มีค่าปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยใกล้เคียงกับข้าวอายุ 6 เดือน

ตารางที่ 14 ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของแป้งพลาวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บ, annealing และ HMT

สถานะการทดลอง	ปริมาณของสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (%)		
	สุพรรณบุรี 90	ขาวดอกมะลิ 105	เหนียว กข 6
อายุการเก็บ (□ เดือน)			
0	53.15 ^c	58.65 ^b	65.88 ^c
6	50.07 ^{de}	52.92 ^c	58.59 ^d
12	42.45 ^f	47.05 ^g	50.00 ^e
annealing			
12 ชั่วโมง	56.23 ^a	61.56 ^a	74.90 ^a
24 ชั่วโมง	56.12 ^a	57.59 ^{bc}	74.50 ^a
HMT			
ความชื้น 12%, 0.5 ชั่วโมง	53.11 ^c	56.02 ^c	65.71 ^c
ความชื้น 12%, 1.0 ชั่วโมง	50.03 ^{de}	55.12 ^d	58.60 ^d
ความชื้น 30%, 0.5 ชั่วโมง	55.25 ^b	63.21 ^a	74.39 ^a
ความชื้น 30%, 1.0 ชั่วโมง	51.01 ^d	52.36 ^f	71.32 ^b

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

4.2.6 ปริมาณผลึก

ข้าวใหม่และที่ผ่านการเก็บรักษานั้นมีโครงสร้างผลึกแบบ A และมีปริมาณคงที่ตลอดอายุการเก็บ 12 เดือน (ตารางที่ 15) เมื่อนำไปผ่านการเร่งโดยวิธี annealing และ HMT ทุกสถานะการทดลองนั้นมีร้อยละความเป็นผลึกคงที่ เช่นเดียวกับข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา น่าจะเป็นผลมาจากการที่ใช้ระดับการเร่งไม่รุนแรง จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของชั้นผลึก

ตารางที่ 15 ปริมาณผลึก ในแป้งฟลาวัวร์ ข้าวสุพรรณบุรี90 ข้าวดอกมะลิ105 และเหนียว กข6 ที่ผ่านการเก็บรักษา, annealing และ HMT

สภาวะการทดลอง	ปริมาณผลึก (%)		
	สุพรรณบุรี90	ข้าวดอกมะลิ105	เหนียว กข6
อายุการเก็บ (เดือน)			
0	18.58 ^a	22.3 ^a	24.45 ^a
6	18.41 ^a	22.7 ^a	24.58 ^a
12	18.52 ^a	23.5 ^a	24.79 ^a
Annealing			
12 ชั่วโมง	18.55 ^a	23.3 ^a	24.36 ^a
24 ชั่วโมง	18.46 ^a	23.7 ^{ab}	24.45 ^a
HMT			
ความชื้น 12%, 0.5 ชั่วโมง	18.83 ^{ab}	23.20 ^b	24.15 ^a
ความชื้น 12%, 1.0 ชั่วโมง	18.69 ^a	24.90 ^a	24.15 ^a
ความชื้น 30%, 0.5 ชั่วโมง	19.46 ^a	23.90 ^a	24.56 ^a
ความชื้น 30%, 1.0 ชั่วโมง	19.74 ^a	25.20 ^a	24.48 ^a

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

5. การชะลออายุการเก็บ

5.1 ผลของอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

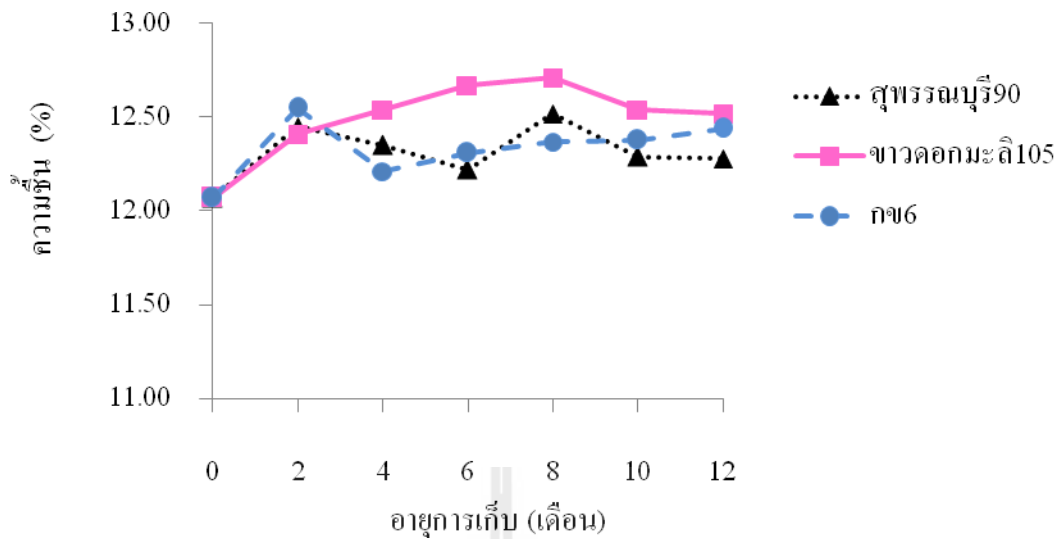
ผลของการเก็บรักษาข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บในอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสแสดงในตารางที่ 16 พบว่าค่าความชื้นของทุก 2 เดือนแตกต่างกันทางสถิติ ส่วนปริมาณทางเคมีอื่นๆ ได้แก่ ปริมาณหมู่ซัลไฟด์รีด น้ำตาลรีดิวิซ์ และสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความแข็ง การป้องกันการงอก ร้อยละการละลาย ปริมาณการปลดปล่อยอะมิโนส สมบัติทางการหุงต้ม และเนื้อสัมผัสของข้าวสุก นั้นไม่เปลี่ยนแปลงทางสถิติทั้งสามพันธุ์ ยกเว้นสมบัติทางความหนืด คือ ค่าความหนืดและการคืนตัวของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ105 แตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 16 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าว ตั้งแต่เดือนที่ 0-12 ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

พันธุ์	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	กข6
ความชื้นเมล็ดข้าวสาร	*	*	*
ค่าสีน้ำตาลของแป้งข้าว	ns	ns	ns
เวลาในการหุงต้ม	ns	ns	ns
การดูดซับน้ำของข้าวสุก	ns	ns	ns
การขยายปริมาตรของข้าวสุก	ns	ns	ns
ความแข็งของข้าวสุก	ns	ns	ns
ความเหนียวของข้าวสุก	ns	ns	ns
อุณหภูมิเริ่มเหนียว	ns	ns	ns
ความเหนียวสูงสุด	ns	*	*
เบร็กคาวาน์	ns	*	*
การคืนตัว	*	ns	ns
ปริมาณซัลไฟไตรด	ns	ns	ns
กำลังการพองตัว	ns	ns	ns
ความสามารถในการละลาย	ns	ns	ns
ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะ	ns	ns	ns
ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อย	ns	ns	ns
ปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ	ns	ns	ns

ns คือไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

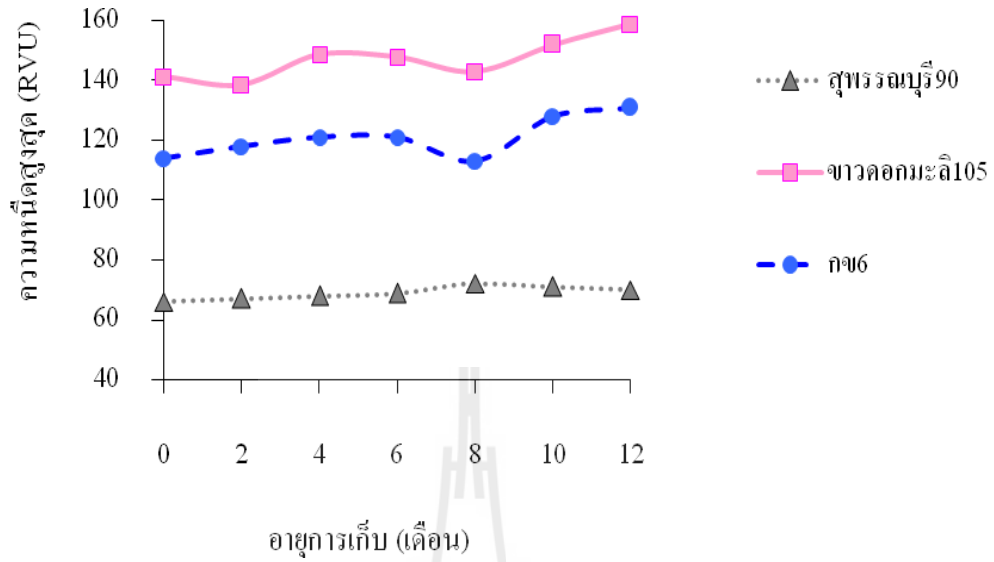
* คือ ตัวอักษรที่ต่างกัน ในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$



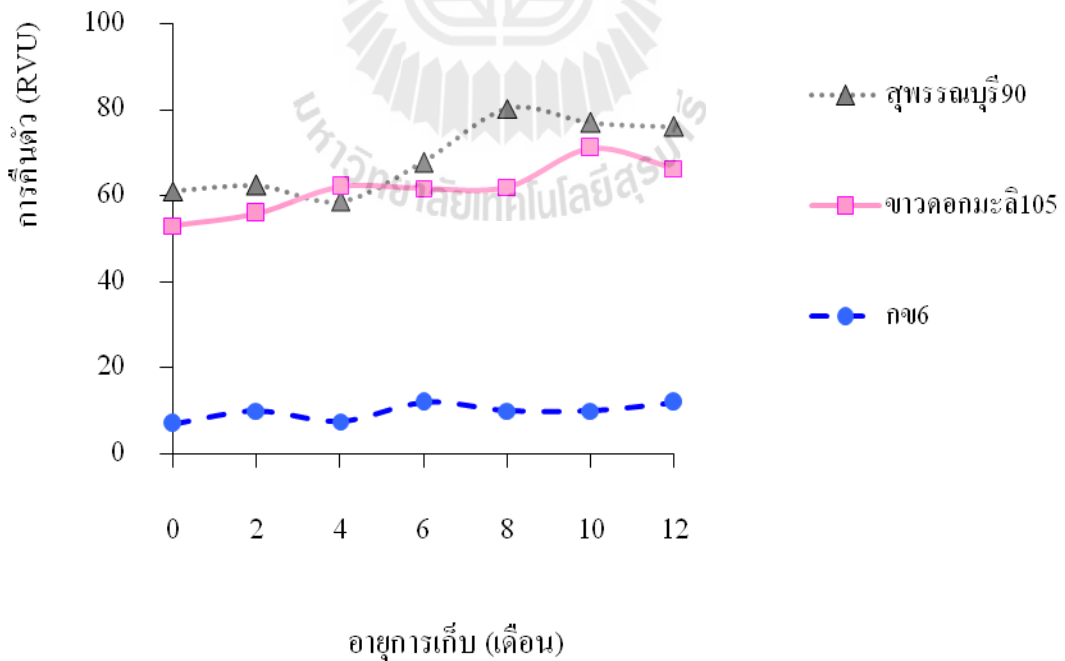
ภาพที่ 39 ความชื้นของข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 เดือน

ความชื้นของข้าวสารก่อนนำไปเก็บที่ 10 องศาเซลเซียสนั้นมีค่าน้อยกว่าข้าวที่ผ่านการเก็บโดยข้าวที่ผ่านการเก็บมีค่าคงที่ ตั้งแต่เดือนที่ 2-12 (ภาพที่ 39) ซึ่งความชื้นที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บเกิดจากในห้องเย็นมีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าความชื้นของข้าว ทำให้ความชื้นภายนอกถุงข้าว แพร่เข้าไปในข้าวแล้วเกิดสมดุลทางความชื้นใหม่ จากข้อสังเกตเมื่อนำข้าวออกมาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 6 ชั่วโมง เพื่อปรับอุณหภูมิของข้าวให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง ในช่วง 1-2 ชั่วโมงแรก พบว่าด้านในของถุงข้าวมีละอองน้ำเกาะ แล้วหายไปเมื่อครบ 6 ชั่วโมง ความชื้นที่หายไปส่วนหนึ่งนี้อาจระเหยออกมานอกถุงอีกส่วนหนึ่งอาจถูกดูดซึมเข้าไปในข้าว จึงทำให้ข้าวที่ผ่านการเก็บมีความชื้นสูงกว่าข้าวที่ไม่ได้เก็บรักษา

การเก็บข้าวไว้ที่ 10 องศาเซลเซียสมีผลให้พฤติกรรมทางความชื้นของข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าไม่คงที่ระหว่างที่เก็บ 0-12 เดือน ดังแสดงในภาพที่ 40 และ 41 ค่าความชื้นและการคืนตัวของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ105 สูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเก็บรักษาในห้องเย็นได้ 10 เดือน ขณะที่ค่าความชื้นสูงสุดของข้าวสุพรรณบุรี90ไม่แตกต่างกันตลอดอายุการเก็บ แต่มีค่าการคืนตัวสูงขึ้นเล็กน้อย



ภาพที่ 40 ค่าความหนึ่ดสูงสุดของเป้่งฟลาวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน



ภาพที่ 41 ค่าการคั้ดตัวของเป้่งฟลาวร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน

5.2 ผลของอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

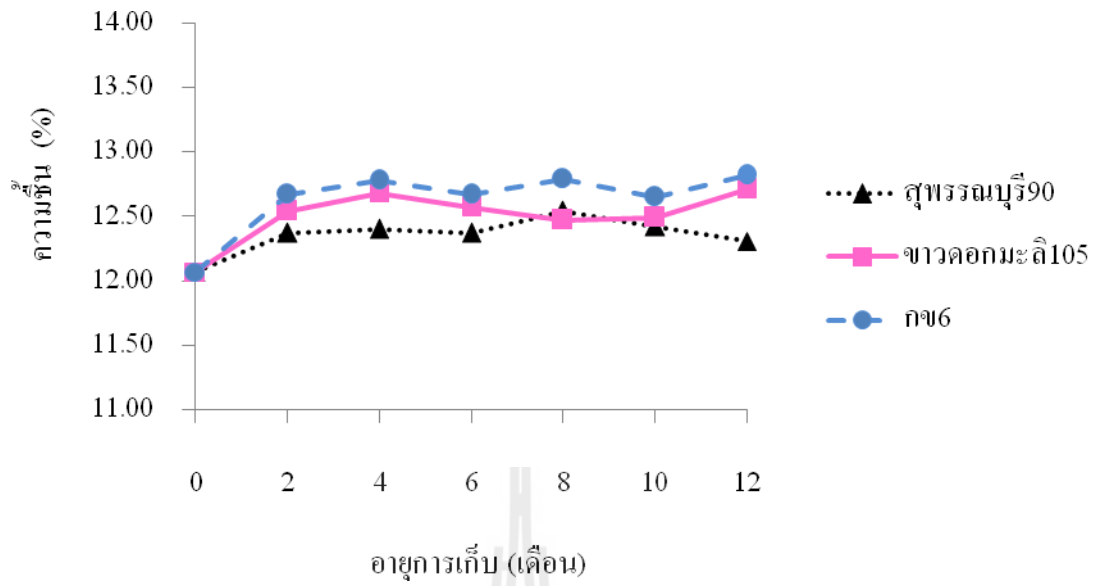
ข้าวทั้งสามพันธุ์ที่ผ่านการเก็บในห้องแช่แข็ง มีค่าความชื้นของทุก 2 เดือนแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งมีสาเหตุเกี่ยวกับการเก็บในอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ส่วนปริมาณทางเคมีอื่นๆ ได้แก่ ปริมาณหมู่ซัลไฟดริล น้ำตาลรีดิวิซ์ และสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความแข็งสี ค่าทางพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงความหนืด กำลังการพองตัว ร้อยละการละลาย ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะ สมบัติทางการหุงต้ม และเนื้อสัมผัสของข้าวสุกนั้นไม่เปลี่ยนแปลงทางสถิติทั้งสามพันธุ์

ตารางที่ 17 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าว ตั้งแต่เดือนที่ 0 - 12 ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

พันธุ์	สุพรรณบุรี90	ขาวดอกมะลิ105	กข6
ความชื้นเมล็ดข้าวสาร	*	*	*
ค่าสีน้ำตาลของแป้งข้าว	ns	ns	ns
เวลาในการหุงต้ม	ns	ns	ns
การดูดซับน้ำของข้าวสุก	ns	ns	ns
การขยายปริมาตรของข้าวสุก	ns	ns	ns
ความแข็งของข้าวสุก	ns	ns	ns
ความเหนียวของข้าวสุก	ns	ns	ns
อุณหภูมิเริ่มหนืด	ns	ns	ns
ความหนืดสูงสุด	ns	ns	ns
เบร็กคาวน์	ns	ns	ns
การคืนตัว	ns	ns	ns
ปริมาณซัลไฟดริล	ns	ns	ns
กำลังการพองตัว	ns	ns	ns
ความสามารถในการละลาย	ns	ns	ns
ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะ	ns	ns	ns
ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อย	ns	ns	ns
ปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์	ns	ns	ns

ns คือ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

* คือ ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$



ภาพที่ 42 ความชื้นของข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 -12 เดือน

บทที่ 4

บทสรุป

1. ผลของการเก็บรักษาข้าวสารต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าว

ข้าวทั้งสามพันธุ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ปี ทำให้ปริมาณความชื้นลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ ค่าสีเหลืองของข้าวสารมีค่าเพิ่มขึ้นเฉพาะข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข6 ข้าวสุกของข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าแข็งของข้าวสุกเพิ่มขึ้น ความเหนียวลดลงตามระยะเวลาในการเก็บ ข้าวสารที่ผ่านการเก็บทั้งสามพันธุ์ใช้เวลาในการหุงต้มเพิ่มขึ้นตามเวลาในการเก็บรักษา อัตราการดูดซับน้ำของข้าวสุกทั้งสามพันธุ์เริ่มลดลงในเดือนที่ 8 อัตราการขยายปริมาตรของข้าวเจ้ามีปริมาตรเพิ่มในเดือนที่ 10 โดยข้าวสุพรรณบุรี 90 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ส่วนข้าวเหนียว กข6 มีอัตราการขยายปริมาตรลดลงพบในเดือนที่ 8-12 ปริมาณยางข้าวของข้าวข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ลดลงด้วยอัตราที่ใกล้เคียงกัน โดยปริมาณโปรตีนและอะมิโลสในยางข้าวลดลงด้วย แป้งฟลาวร์จากข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าเบร็กคาวนัลลดลง แต่ค่า PT และ T_0 มีค่าเพิ่มตามระยะเวลาในการเก็บค่า PV ของข้าวเหนียว กข6 มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ของข้าวเจ้ามีค่าลดลงในเดือนที่ 6 และลดลงอย่างต่อเนื่อง แป้งฟลาวร์จากข้าวสุพรรณบุรี 90 และขาวดอกมะลิ 105 มีค่ากำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บ แต่ความสามารถในการละลายและอะมิโลสที่ถูกชะมีค่าลดลง ส่วนสมบัติทางด้านปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าลดลง การเก็บรักษาข้าวสารไว้ที่อุณหภูมิ -18 และ 10 องศาเซลเซียส มีผลให้ความชื้นของข้าวสารมากกว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านการเก็บ การเก็บรักษาที่ -18 องศาเซลเซียสไม่ทำให้สมบัติของข้าวเปลี่ยนแปลงตลอดการเก็บ 12 เดือน แต่การเก็บที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ทำให้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข6 มีค่า PV เพิ่มขึ้น และ ทำให้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และสุพรรณบุรี 90 มีค่า SB เพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโปรตีนเกิดขึ้นภายหลังการเก็บรักษาข้าว โปรตีนมีการเปิดตัวเพิ่มขึ้น โดยโมเลกุลของโปรตีนสามารถเกิดการเกาะกลุ่มกันด้วยแรงไฮโดรโฟบิกและพันธะไดซัลไฟด์ สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของโปรตีนขนาดใหญ่ และการลดลงของโปรตีนโมเลกุลขนาดเล็กภายหลังการเก็บ ความร้อนทำให้โปรตีนเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยโปรตีนมีการเปิดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนให้ความร้อน โปรตีนขนาดเล็กเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นโปรตีนกลุ่มใหม่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของค่าพื้นที่ผิวไฮโดรโฟบิกและพันธะไดซัลไฟด์ภายหลังให้ความร้อน

2. ผลของการเก็บรักษาข้าวระยะยาวต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางการหุงต้ม เนื้อสัมผัส และการเกิดเพสท์ของข้าว

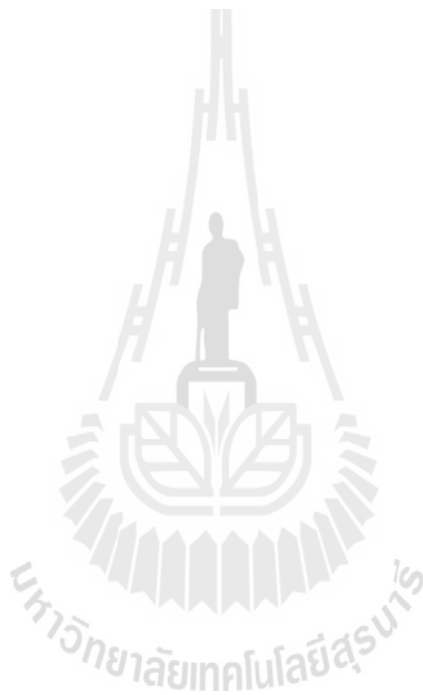
การเก็บรักษาข้าวสุพรรณบุรี90 ข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียว กข6 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 1- 4 ปี จะทำให้ค่าความชื้นลดลง ค่าสีเหลืองมากขึ้น การหุงต้ม ใช้เวลาในการหุงต้ม นานขึ้น ข้าวสุกมีอัตราการดูดซับน้ำมากขึ้นในข้าวสุพรรณบุรี90 ที่มีอายุการเก็บ 4 ปี แต่ข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียว กข 6 อัตราการดูดซับน้ำไม่เปลี่ยนแปลง อัตราการขยายปริมาตรของข้าวสุพรรณบุรี90 มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ของข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวเหนียว กข 6 มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื้อสัมผัสของข้าวสุกทางด้านความแข็งของข้าวทั้งสามพันธุ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ความเหนียวของข้าวข้าวเหนียว กข 6 มีค่าลดลง แต่ความเหนียวของข้าวขาวดอกมะลิ105 มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการเก็บ สมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งพลาร์จากข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาทั้งสามพันธุ์ พบว่า PT มีค่าเพิ่มขึ้น BD, PV และ SB ส่วนแป้งสตาร์ชมีค่า BD, PV และ SB ลดลงในข้าวทุกพันธุ์ที่อายุการเก็บรักษา 4 ปี

3. ผลของการใช้ความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวและแป้งข้าว

การ HMT ข้าวสารเต็มเมล็ด ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ใช้ความร้อน 12% เป็นเวลา 0.5 สามารถทำให้ข้าวสุพรรณบุรี90 และขาวดอกมะลิ105 มีค่าของสมบัติทางการหุงต้มและเนื้อสัมผัสของข้าวสุกเท่ากับข้าวอายุการเก็บ 6 เดือน ส่วนของข้าวเหนียวมีค่าอยู่ระหว่างข้าวที่มีอายุการเก็บ 6-12 เดือน เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 1.0 ชั่วโมงทำให้ข้าวทั้งสามพันธุ์มีค่าสมบัติทางการหุงต้มและเนื้อสัมผัสของข้าวสุกใกล้เคียงข้าวอายุการเก็บ 12 เดือน

การเร่งความเก่าของข้าวหักทั้งสามพันธุ์ด้วยการ annealing และ HMT ทำให้สมบัติบางประการของข้าวมีค่าใกล้เคียงกับข้าวเก่า โดยการเร่งด้วย annealing เป็นเวลา 12 ชั่วโมงทำให้ข้าวมีสมบัติทางความร้อน (ค่า T_0) และสมบัติการเกิดเพสท์ (ค่า PT, PV, BD และ SB) เท่ากับข้าวที่มีอายุการเก็บ 6 เดือน แต่เมื่อ annealing 24 ชั่วโมง ทำให้ข้าวมีค่า PT สูงกว่าข้าวเก่าอายุ 12 เดือน ค่า PV, BD และ SB ต่ำกว่าข้าวเก่าอายุ 12 เดือน หรือมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเก่ามากกว่าข้าวเก่าอายุ 12 เดือน นอกจากนี้การ annealing ยังทำให้ข้าวมีค่าสีเหลืองน้อยกว่าของข้าวใหม่ ส่วนการ HMT ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ใช้ความร้อน 12% และ 30 % เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง และ 1 ชั่วโมง ทำให้มีค่า T_0 ค่าของสมบัติการเกิดเพสท์ ค่ากำลังการพองตัว ค่าความสามารถในการละลาย และค่าปริมาณอะมิโลสที่ถูกหะ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับข้าวที่ผ่านการเก็บรักษา โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาและความชื้น

การชะลออายุการเก็บด้วยการเก็บข้าวไว้ที่อุณหภูมิ -18 และ 10 องศาเซลเซียส ทำให้คุณสมบัติของข้าวยังคงความเป็นข้าวใหม่ แต่การเก็บ 10 องศาเซลเซียส มีสมบัติทางการเกิดเพสท์เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยหลังจากข้าวมีอายุการเก็บ 8 เดือน



บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2546). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3
สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. 292 หน้า.
- ไกรสิทธิ์ พิธิษฐกุล, ศักดา จงแก้ววัฒนา, สุกัญญา วงศ์พรชัย, วรณนาคุณชัย และ สาวิตร มีจ้อย.
(2549). การตัดแปรคุณภาพการหุงต้มของข้าวหอมมะลิ 105. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**.
ปีที่ 37 ฉบับที่ 5 หน้า 187-190.
- งามชื่น คงเสรี. (2539). **คุณภาพข้าวสารและข้าวสุก**. เอกสารการฝึกอบรมหลักสูตรการรักษา
คุณภาพข้าวสารและการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์เพื่อการส่งออก. ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี
สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพมหานคร. 23 หน้า.
- จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร, เพลงพิน ศิวรักษ์ และทรงศิลป์ พจน์ชนะชัย. (2547). การเปลี่ยนแปลง
คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีกายภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระหว่างการเก็บรักษา
ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**. ปีที่ 27 ฉบับที่ 3 หน้า 285-297.
- คลฤดี ใจสุทธิ, สมเกียรติ ปรัชญาวรากร, วารุณี วารุญญานนท์, พัชรี ตั้งตระกูล และสมชาติ โสภณ
รณฤทธิ์. (2550). การเร่งความแก่ข้าวกล้องหอมมะลิด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซนซ์ร่วมกับการ
เก็บในที่อับอากาศ. **การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1**.
- เบญจลักษณ์ ศิริบูรณ์. (2550). **ผลของการ annealing ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกันต่อโครงสร้าง
และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
เทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 153 หน้า.
- เพลงพิน ศิวพรรักษ์. (2541). **ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลง
ปริมาณอะมิโลส คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105**.
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ. 56 หน้า.
- ภัทรพร ัญญูวินิชกุล. (2540). **ผลของภาชนะบรรจุและสภาพการเก็บรักษาต่อคุณภาพข้าวสาร**.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
172 หน้า.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. (2546). **การศึกษาคุณสมบัติแป้งข้าวพันธุ์ต่างๆ ในประเทศไทย เพื่อเป็น
กลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม**. รายงานการวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการวิจัย
แห่งชาติ. 160 หน้า.

- ละมุด วิเศษ. (2541). ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมัน
คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ105. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร. 69 หน้า.
- ละมุด วิเศษ, ทรงศิลป์ พจน์ชนะชัย และจรัสศักดิ์ คงเกียรติขจร. (2546). การเปลี่ยนแปลงปริมาณ
องค์ประกอบของไขมัน คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติแป้งสูกของข้าวกล้องพันธุ์
ขาวดอกมะลิในระหว่างการเก่าของข้าว. คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วราทัศน์ วงศ์สุรไกร. (2539). แนวทางการผลิตข้าวไทย. ใน รายงานการประชุมวิชาการและ
นิทรรศการ เนื่องในงานมหกรรมข้าวไทยเทิดพระเกียรติ, หน้า 48. 5-8 กันยายน
2539 ณ ห้องริเจนซี โรงแรมเซ็นทรัลพลาซ่า กรุงเทพมหานคร.
- วินิต ชินสุพรรณ และ ภูมิสิทธิ์วรรณชาติ. (2545). การเร่งความเก่าของข้าวเปลือกหอมมะลิโดยการ
อบในภาชนะปิด. วิศวกรรมสาร ม.ช. ปีที่ 29 ฉบับที่ 1-2 หน้า 131-146.
- สุนีย์ เสริมสิริโสภณ. (2546). ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณสมบัติทางกายภาพ
และเคมีกายภาพของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร
มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 137 หน้า.
- สุทัศน์ ศรีวัฒนพงษ์. (2549). ประวัติความเป็นมาและพัฒนาการของข้าวไทย. ใน การพัฒนา
เทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรมอาหารในทศวรรษหน้า. สมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ทางอาหารแห่งประเทศไทย. 194 หน้า.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2546). เคมีทางธัญญาหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร คณะ
อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. 75 หน้า.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2550). ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
การอาหาร. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 30.
- AOAC. (1997). Official method of analysis. 16th ed. Washington: The Association of Official
Agricultural Chemists.
- AOAC. (2000). **Official Methods of Analysis** (17th ed.). Washington DC. U.S.A.: Association of
Official Analytical Chemists, Inc.
- Adachi. M., Chunying. H., Utsumi. S. (2004). Effects of Designed Sulfhydryl Groups and
Disulfide Bonds into Soybean Proglycinin on Its Structural Stability and Heat-Induced
Gelation. **J. Agric. Food Chem.** 52:5717-23

- Adebowale, K.O and Lawal, O.S. (2003). Microstructure, physicochemical properties and retrogradation behaviour of Mucuna (*Mucuna pruriens*) starch on heat moisture treatments. **Food Hydrocolloids**. 17: 265-272.
- Adebowale, K.O, Olu-Owolabi, B.I., Olayinka, O.O. and Lawal, O.S. (2005). Effect of heat-Moisture and annealing on physicochemical properties of red sorghum starch. **J. Biotechnol.** 4(9): 928-933.
- Alizadeh-Pasdar, N., and Li-Chan, E. C. Y. (2000). Comparison of protein surface hydrophobicity measured at various pH values using three different fluorescent probes. **J. Agric. Food Chem.** 48:328–334.
- Anderson, A. K. and Guraya, H.S. (2006). Effects of microwave heat-moisture treatment on properties of waxy and non-waxy rice starches. **Food Chem.** 97: 318-323.
- Anderson, A. K., Guraya, H. S., James, C., and Salvaggio, L. (2002). Digestibility and pasting properties of rice starch heat-moisture treated at the melting temperature (T_m). **Starch/Starke.** 54: 401-409.
- Barber, S. (1972). Milled rice and changes during ageing. In '**Rice: Chemistry and Technology**', 1st edn, (D.F. Houston, ed.), American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN, U.S.A. pp. 215-263.
- Benjakul, S., Thongkaew, S. and Visessanguan, W. (2005). Effect of reducing agents on physicochemical properties and gel-forming ability of surimi produced from frozen fish. *Eur Food Res Technol*, 220: 316-321.
- Benjakul, S., Visessanguan, W., Thongkaew, C. and Tanaka, M. (2005). Effect of frozen storage on chemical and gel-forming properties of fish commonly used for surimi production in Thailand. **Food Hydrocolloids**, 19:197-207.
- Bhattacharya, K.R., Sowbhagya, C.M. and Indudhara Swamy, Y.M. (1978). Importance of insoluble amylose as a determinant of rice quality. **J. Sci. Food Agric.** 29: 359-364.
- Cao, Y., Wang, Y., Chen, X. and Ye, J. (2004). Study on sugar profile of rice during ageing by capillary electrophoresis with electrochemical detection. **Food Chem.** 86: 131-136.

- Champagne, E.T., Lyon, B.G., Min, B.K., Vinyard, B.T., Bett, K.L., Barton, F.E., Webb, B.D., McClung, A.M., Moldenhauer, K.A., Linscombe, S., McKenzie, K. and Kohlwey, D.E. (1998). Effect of postharvest processing on texture profile analysis of cooked rice. **Cereal Chemistry**. 75: 181-186.
- Cheetham, N. W. H., Tao. L. (1998). Solid State NMR Studies on the Structural and Conformational Properties of Natural Maize Starches. **Carbohydrate Polymers**. 36:285-292.
- Chrastil, J. and Zarins, Z.M. (1992). Influence of storage on peptide subunit composition of rice oryzenin. **J. Agric. Food Chem.** 40: 927-930.
- Chrastil, J. (1990). Chemical and physicochemical changes of rice during storage at different temperatures. **J. Cereal Sci.** 11: 71-85.
- Chrastil, J. (1990). Protein-starch in rice grains: Influence of storage on oryzenin and starch. **J. Agri. Food Chem**, 38: 1804-1809.
- Chrastil, J. (1992). Correlations between the physicochemical and functional properties of rice. **J. Agric. Food Chem.** 40: 1683-1686.
- Charstil, J and Zarins, Z.M. (1992). Influence of Storage on Peptide Subunit Composition of Rice Oryzenin. **J. Agric. Food Chem**, 40(6): 927-930.
- Chrastil, J. (1994). Effect of storage on the physicochemical properties and quality factors of rice. In **'Rice Science and Technology'**, (W.E. Marshall and J.I. Wadsworth, eds), Marcel-Dekker, New York. pp 49-81.
- Chung, H.J., and Lim, S.T. (2004). Physical aging of glassy normal and waxy rice starches: thermal and mechanical characterization. **Carbo Polym.** 57: 15-21
- Chung, H.J., and Lin, H.T. (2003). Physical aging of glassy normal and waxy rice starches : effect of aging time on glass and enthalpy relaxation. **Food hydrocolloids.** 17: 855-861.
- Daniels, J.M., Marks, P.B., Siebenmorgen, J.T., Mcnew, W.R. and Meullenet, F.J. (1998). Effect of long-grain rough rice storage history on end-use quality. **J. Food Sci.** 63(5): 832-835.
- Desikachar, H.S.R. and Subrahmanyam, V. (1960). The relative effects of enzymatic and physical changes during storage on the culinary properties of rice. **Cereal Chem.** 37: 1-8.
- Dhaliwal, Y.S., Sekhon, K.S. and Nagi, H.P.S. (1991). Enzymatic activities and rheological properties of stored rice. **Cereal Chem.** 68: 18-21.

- Eerlingen, R. C., Jacobs, H., Van Win H. and Delcour, J.A. (1996). Effect of hydrothermal treatment on the gelatinisation properties of potato starch as measured by differential scanning calorimetry. **J. Thermal Anal.** 47: 1229-1246.
- El Khalifa, A.E.O. and A.H. El Tinay. (2002). Effect of cystine on bakery products from wheat sorghum blends. **Food Chem.** 77: 133-137.
- Faruq, G., Mohamad, O., Hadzim, M. and Meisner, C.A. (2003). Optimization of Aging Time and Temperature for Four Malaysian Rice Cultivars. Pak. **J. Nutr.** 2(3): 125-131.
- Fukui, T., Nikuni, Z. (1969) Heat-moisture treatment of cereal starch observed by X-ray diffraction. **Agric. Biol. Chem.** 33: 460-462.
- Furukawa, S., Tanaka, K., Masumura, T., Ogihara, Y., Kiyokawa, Y. and Wakai, Y. (2006). Influence of Rice Proteins on Eating Quality, Cooked Rice and on Aroma and Flavor of Sake. **Cereal Chem.** 83(4): 439-446.
- Gujral, S. H. and Kumar, V. (2003). Effect of accelerated aging on the physicochemical and textural properties of brown and milled rice. **J. Food Eng.** 59: 117-121.
- Hamaker B. R. and Griffin, V. K. (1990). Changing and viscoelastic properties of cooked rice through protein disruption. **Cereal chem.** 67(3): 261-264.
- Hamaker B. R. and Griffin, V. K. (1993). Effect Of disulfide bond-containing protein on rice starch gelatinization and pasting. **Cereal chem.** 70(4): 377.
- Hamaker, B.R., Siebenmorgen, T.J. and Dilday, R.H. (1993). Ageing of rice in the first six months after harvest. **Arkansas Farm Research.** 42: 8-9.
- Horndok, R. and A. Noomhorm. (2007). Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality. **LWT.** 40: 1723-1731.
- Hoover, R. and Manuel, H. (1996). The effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of Normal Maize, Waxy Maize, Dull Waxy Maize and Amylomaize V Starches . **J. Cereal Sci.** 23: 153-162.
- Houston, D. F., Marian, E. A., and Kohler, G. o. (1969). Amino acid composition of rice and rice by-product. **Western Regional Research Laboratory**, Albany, Calif. p. 527-537.
- Jacobs, H and Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal Modifications of Granular Starch, with Retention of the Granular Structure: A Review. **J. Agric. Food Chem.** 46(8): 2895-2905.

- Ju, Z.Y., Hettiarachchy, N.S. & Rath, N. (2001). Extraction, Denaturation and Hydrophobic Properties of Rice Flour Proteins. **J. Food Sci.** 66(2): 229-232.
- Juliano, B.O. (1971). **A simplified assay for milled-rice amylose.** Cereal Science Today. 16:334-340.
- Juliano, B.O. (1985). **Criteria and tests for rice grain qualities.** In 'Rice Chemistry and Technology', (B.O. Juliano, ed.), American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN, U.S.A. pp 443-524.
- Kato, A., and Nakai, S. (1980). Hydrophobicity determined by a fluorescence probe method and its correlation with surface properties of protein. **Biochim. Acta.** 624:13.
- Kaur, K., and Singh, N. (2000). Amylose–lipid complex formation during cooking of rice flour. **Food Chem.** 71: 511-517.
- Kawabata, A., Takase, N., Miyoshi, E., Sawayama, W., Kimura, T. and Kudo, K. (1994). Microscopic observation and X-ray diffractometry of heat/moisture-treated starch granules. **Starch/Staerke.** 46: pp. 463–469.
- Krueger, B. R., Knutson, C. A., Inglett, G. E. and Walker, C. E. (1987). A Differential Scanning Calorimetry Study on the Effect of Annealing on Gelatinization Behavior of Corn Starch. **J. Food Sci.** 52:715-718.
- Laemmli, U. K. (1970). Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. **Nature.** 227, 680 – 685.
- Lawal, O.S., Adebawale, K.O. (2005). An assessment of changes in thermal and physico-chemical parameters of jack bean (*Canavalia ensiformis*) starch following hydrothermal modifications. **Eur. Food Res. technol.** 221: 631-638.
- Leelayuthsoontorn, P. (2006). Textural and Morphological Changes of Jasmine Rice Under Various Elevated Cooking Conditions. **Food Chemistry.** 96: 606–613.
- Lii, C.Y., Tsai, M.L. and Tseng, K.H. (1996). Effect of amylose content on the rheological property of rice starch. **Cereal Chem.** 73: 415-420.
- Lima, I. and Singh, R.P. (1993). Objective measurement of retrogradation in cooked rice during storage. **J. Food Qual.** 16: 321-337.
- Lim, S.T., Chang, E. H. and Chung, H.J.(2001). Thermal transition characteristics of heat – moisture treated corn and potato starches. **Carbohydr. polym.** 46: 107-115.

- Lorenz, K., and Kulp, K. (1982). Cereal and Root Starch Modification by Heat- Treatment. I. Physicochemical Properties. *Staerke*, 43:50.
- Martin, M. and Fitzgerald, M.A. (2002). Proteins in Rice Grains Influence Cooking Properties. **J. Cereal Sci.** 36: 285-294.
- Matsukura, U., Kaneko, S. and Momma, M. (2000). Method for measuring the freshness of individual rice grains by means of a color reaction of catalase activity. **Journal of the Japanese Society of Food Science and Technology**. 47: 523-528.
- Meullenet, J-F.C., Marks, B.P., Griffin, K. and Daniels, M.J. (1999). Effects of rough rice drying and storage conditions on sensory profiles of cooked rice. **Cereal Chem.** 76: 483-486.
- Meullenet, J.F., Marks, B.P., Hankins, J.A., Griffin, V. K. and Daniels, M.J. (2000). Sensory quality of cooked long-grain rice as affected by rough rice moisture content, storage temperature, and storage duration. **Cereal Chem.** 77: 259-263.
- Miyoshi, E. (2002). Effect of heat-moisture treatment and lipids on gelatinization and retrogradation of maize and potato starches. **Cereal Chem.** 79(1): 72-77.
- Moritaka, S., Sawada, K. and Yasumatsu, K. (1971). Studies on cereals. VI. Effect of fat extraction on rice quality and storage deterioration of defatted rice. **Eiyo To Shokuryo**. 24: 457-460.
- Mossman, A.P., Fellers, D.A. and Suzuki, H. Rice stickiness. I. (1983). Determination of rice stickiness with an Instron Tester. **Cereal Chemistry**. 60: 286-292.
- Nishiba, Y., Sato, T. and Suda, I. (2000). Convenient method to determine free fatty acid of rice using thin-layer chromatography and flame-ionization detection system. **Cereal Chem.** 77: 223-229.
- Noomhorm, A ., Kongseree, N. and Apintanapong, M. (1997). Effect of Aging on the Quality of Glutinous Rice Crackers. **Cereal chem.** 74(1): 12-15.
- Ohno, T. and Ohisa, N. (2005). Studies on textural and chemical changes in aged rice grains. **Food Sci. Technol. Res.** 11(4): 385-389.
- Ohno, T., Tomatsu, M., Toeda, K. and Ohisa, N. (2007). Texture of Cooked Rice Prepared from Aged Rice and Its Improvement by Reducing Agents. **Biosci. Biotechnol. Biochem.** 71(12): 2912-2920.

- Olayinka, O., Adebawale, K.O. Olu-Owolabi, B. I. (2008). Effect of heat-moisture treatment on Physicochemical properties of white sorghum starch. **Food Hydrocolloids**. 22(2): 225-230
- Paraman, I., Hettiarachchy, N. S., Schaefer, C., and Beck, M. I. (2007). Hydrophobicity, solubility, and emulsifying properties of enzyme-modified rice endosperm protein. **Cereal Chemistry**. 84(4): 343-349.
- Patindol, J., Wang, Y.J. and Jane, J.L. (2005). Structure-Functionality Changes in Starch Following Rough Rice Storage. **Starch/Starke**. 57: 197-207.
- Perera, C., Hoover, R. & Martin, A.M. (1997). The effect of hydroxypropylation on the structure and physicochemical properties of native, defatted and heat-moisture treated potato starches. **Food Res. Inter**. 30(3/4): 235-247.
- Perdon, A.A., Siebenmorgen, T.J., Buescher, R.W. and Gbur, E.E. (1999). Starch retrogradation and Texture of Cooked Milled Rice During Storage. **J. Food Sci**. 64(5): 828-832.
- Pushpamma, P. and Reddy, M.U. (1979). Physico-chemical changes in rice and jowar stored in difference agroclimatic regions of Andhra Pradesh. *Bulletin of Grain Technology*. 17: 97-108.
- Rehman, Z.U. (2006). Storage effects on nutritional quality of commonly consumed cereals. **Food Chem**. 95: 53-57.
- Sae-Eaw, A., Chompreedal, P., Suwonsichon, T., Prinyawiwatkul, W. and Haruthaithanasan, V. (2007). Effects of Storage Time of Jasmine Rice on Flour Physicochemical Properties and Consumer Acceptance of Jasmine Rice Cakes. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://uma.sut.ac.th/iat/food/FIA2007/FIA2007/paper/P4-38-NC.pdf>
- Schierbaum, F., and Kettlitz, B. (1994). Studies on Rye Starch Properties and Modification. Part III. Viscograph Pasting Characteristics of Rye Starches. **Starch/Staerke**. 46:2-8.
- Seow, C. C., and Teo, C. H. (1993). Annealing of Granular Rice Starches-Interpretation of the Effect on Phase Transitions Associated with Gelatinization. **Starch/Staerke**. 45:345-351.
- Shin, M.G., Yoon, S.H., Rhee, J.H. and Kwon, T.W. (1986). Correlation between oxidative deterioration of unsaturated lipid and n-hexanal during storage of brown rice. **J. Food Sci**. 51: 460-463.

- Singh, N., Kaur, L., Sodhi, N.S, Sekhon, K.N. (2005). Physicochemical, cooking and textural properties of milled rice from different Indian rice cultivars. **Food Chem.** 89: 253-259.
- 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, V., Okadome, H., Toyoshima, H., Isobe, S. and Ohtsubo, K. (2000). Thermal and Physicochemical Properties of Rice Grain, Flour and starch. **J. Agric. Food Chem.** 48: 2639-2647.
- Sirisoontarak, P. and Noomhorm, A. (2007). Changes in physicochemical and sensory-properties of irradiated rice during storage. **J. of stored Products Res.** 43: 282-289.
- Sodhi, N.S., singh, N., Arora, M. and Singh, J. (2003). Changes in physico-chemical thermal, cooking and textural properties of rice during aging. **J. Food Process. Preserv.** 27: 387-400.
- Soponronnarit, S., Chiawwet,M., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P. and Taechapiroj, C. (2008). Comparative study of physicochemical properties of accelerated and naturally aged rice. **J. Food Eng.** 85: 268-276.
- Sowbhagya, C. M. and Bhattacharya, K. R. (2001). Changes in Pasting Behaviour of Rice during Ageing. **J. Cereal Sci.** 34: 115-124.
- Sowbhagya, C.M. and Bhattacharya, K.R. (1976). Lipid autoxidation in rice. **J. Food Sci.** 41: 1018-1023.
- Takeuchi, W., Masui, H. and Yamaguchi, J. (1999). Reducing-agents-mediated Solubilization and Activation of Debranching Enzyme(Pullulanase) in Rice Flour. **Biosci.biotechnol.biochem.** 63(3): 510-514.
- Takahashi, T., Miura, M., Ohisa, N., Mori, K., and Kobayashi, S., (2005). Heat Treatments of Milled Rice and Properties of the Flours. **Cereal chem.** 82(2): 228-232.
- Tamaki, M., Tashiro, T., Ishikawa, M. and Ebata, M. (1993). Physico-ecological studies on quality formation of rice kernel. IV Effect of storage on eating quality of rice Japanese. **J. Crop Sci. Biotechnol.** 62: 540-546.
- Thannhauser, R., Konishi, Y. and Scheraga, H. A. (1987). **Methods Enzymol.** 143:115-119.

- Tsugita, T., Ohta, T. and Kato, H. (1983). Cooking flavour and texture of rice stored under different conditions. **Agric. Biol. Chem.** 47: 543-549.
- Teo, C.H., Karim, A. A., Cheah, P.B., Norziah, M.H. and Seow, C. (2000). On the roles of protein and starch in the aging of non-waxy rice flour. **Food Chem.** 69: 229-236.
- Tester, R.F. and Debon, S.J. (2000). Annealing of starch-a review. **Int. J. Biol. Macromol.** 27: 1-12.
- Tester, R.F., Debon, S.J.J. and Sommerville, M.D. (2000). Annealing of maize starch. **Carbohydr. Polym.** 42: 287-299.
- Tulyathan, V. and Leeharatanaluk, B. (2007). Changes in Quality of Rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105 During Storage. **J. Food Biochem.** 31: 415-426.
- Vermeylen, R., Goderis, B., and Delcour, J. A. (2006). An X-ray study of hydrothermally treated potato starch. **Carbohydr. Polym.** 64:364-375.
- Villareal, R.M., Suzuki, L.B. and Juliano, B.O. (1976). Changes in physicochemical properties of rice during storage. **Starch/Starke.** 28(3): 89-94.
- Wall, J.S., Friedman, M., Krull, L.H., Cavins, J.F. and Backwith, A.C. (1968). Chemical modification of wheat gluten proteins and related model systems. **J. of Polymer Science Pantc.** 24(1): 147-161.
- Whistler, R.L. and Daniel, J.R. (1985). Carbohydrates. In Food **Chem'stry**, (O.R. Fennema, *ed.*) Marcel Dekker, New York. pp. 96-105,.
- Wiset, L., Kongkiattikajorn, J. and Potchanachai, S., (2005). Effect of free fatty acid contents on pasting behaviour of postharvest brown rice flour, **31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology**, 18 – 20 October.
- Yost, D. A., and Hoseney, R. C. (1986). Annealing and Glass Transition of Starch. **Starch.** 38:289-292.
- Zhou, Z., Blanchard, C., Helliwell, S. and Robards, K. (2003). Fatty Acid Composition of Three Rice Varieties Following Storage. **J. Cereal Sci.** 37: 327-335.
- Zhou, Z., Robards, K., Blanchard, C. and Baxter, G. (2003). Rice Ageing. I. Effect of Changes in protein on starch Behaviour. **Starch/Starke.** 55: 162-169.
- Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S. and Blanchard, C. (2002). Ageing of Stored Rice: Changes in Chemical and Physical Attributes. **J. Cereal Sci.** 35: 65-78.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S. and Blanchard, C. (2003). Effect of rice storage on pasting properties of rice flour. **Food Res. Inter.** 36: 625-634.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S. and Blanchard, C. (2007). Effect of storage temperature on Cooking behaviour of rice flour. **Food Res. Inter.** 105: 491-495.



ภาคผนวก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

1. ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

วิธีการ

1. อบอุ่นสำหรับหาความชื้นในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105°C นาน 2-3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน

2. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1-3 กรัม ใส่ลงในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว

3. อบอุ่นตัวอย่างในตู้อบไฟฟ้าด้วยอุณหภูมิ 105°C นาน 5-6 ชั่วโมง

4. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำออกจากตู้อบ ใส่ไว้ในโถดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนัก

5. คำนวณหาปริมาณความชื้นจากสูตร

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

2. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 2000)

วิธีการ

1. อบอุ่นด้วยแก้วสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไขมันในตู้อบไฟฟ้าทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน

2. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก 3-5 กรัม ท่อให้มิดชิดและใส่ลงใน cellulose thimble คลุมด้วยใยแก้วหรือสำลีให้สารทำละลายมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

3. นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในชอคเลต

4. เติมสารตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ ในขนาดหาปริมาณไขมันประมาณ 150 มิลลิลิตร

5. ประกอบอุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควบแน่น และเปิดสวิตช์ให้ความร้อน โดยใช้เวลาในการสกัดไขมัน 3-4 ชั่วโมง

6. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักด้วยแก้ว

7. คำนวณปริมาณไขมันจากสูตร

$$\text{ปริมาณไขมัน (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

3. ปริมาณโปรตีน (AOAC, 2000)

วิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างบนกระดาษกรองให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 0.5-1.0 กรัม ห่อให้มีมิดชิดใส่ลงในขวดย่อยโปรตีน

2. ใส่สารผสมคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) และ โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) 5 กรัม (อัตราส่วนระหว่างคอปเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมซัลเฟต 1 : 10) เพื่อเร่งปฏิกิริยา

3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร และสารป้องกันการเกิดโฟม (anti-foaming agent) 4-5 หยด

4. ย่อยตัวอย่างบนเตาเครื่องย่อยโปรตีนที่อุณหภูมิ 380°C จนได้สารละลายใส ปล่อยให้เย็น

5. จัดอุปกรณ์การกลั่น แล้วเปิดสวิตซ์ไฟ และเปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องควบแน่น

6. ใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุกรดบอริก (ความเข้มข้น 4%) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และน้ำซึ่งเติมอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด เรียบร้อยแล้ว ไปรับรองของเหลวที่กลั่นโดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควบแน่นจุ่มลงในสารละลายกรดนี้

7. กำหนดให้เครื่องเติมน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 32% โดยน้ำหนัก และทำการกลั่นที่ประมาณ 10 นาที ล้างปลายอุปกรณ์ควบแน่นด้วยน้ำกลั่นลงในขวดรองรับ

8. ไตรเตทสารละลายที่กลั่นได้กับกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนสีของสารละลายเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีม่วง

9. ทำ blank และปฏิบัติตามข้อ 1-8 โดยไม่เติมตัวอย่าง

10. คำนวณปริมาณโปรตีนจากสูตร

$$\text{ปริมาณโปรตีน (\%)} = \frac{(A-B)N \times 1.4 \times F}{W}$$

W

เมื่อ A = ปริมาตรกรดที่ใช้ไตรเตทตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรกรดที่ใช้ไตรเตทกับ blank (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของกรด (นอร์มัล)

F = ค่าคงที่สำหรับแป้งข้าวเจ้าคือ 6.25

W = น้ำหนักตัวอย่างที่เริ่มต้น (กรัม)

4. การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส

ทำตามวิธี Colorimetric ของ Juliano (1971) โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และใช้อะมิโลสบริสุทธิ์ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

วิธีการ

1. ชั่งแป้งมา 0.1000 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่แห้งสนิท
2. เติมเอทิลนอลความเข้มข้น 95% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ เพื่อให้แป้งกระจายตัว
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 9 มิลลิลิตร
4. นำไปต้มให้ความร้อนในน้ำเดือดนาน 10 นาที ให้เป็นแป้ง ที่งัวเหี้ยน แล้วเติมน้ำกลั่น เพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร
5. ดูดสารละลายน้ำแป้งที่เตรียมได้มา 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร กรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 1 มิลลิลิตร และ สารละลายไอโอดีน จำนวน 2 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที
6. นำไปวัดค่าความเข้มสีของสารละลายด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแสง 620 นาโนเมตร แล้วปรับเครื่องด้วย blank ให้ได้ค่าดูดกลืนแสง เท่ากับ 0
7. นำอะมิโลสบริสุทธิ์ 0.0400 กรัม เตรียมเป็นสารละลายแป้งเช่นเดียวกับตัวอย่าง ที่งัวเหี้ยว ค้างคืน เขย่าให้เข้ากัน แล้วดูดสารละลายอะมิโลสมาตรฐานมา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 มิลลิลิตร ตามลำดับ เติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที อ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของอะมิโลสกับค่าการดูดกลืนแสง
8. คำนวณปริมาณอะมิโลสจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐาน แล้วแสดงค่าเป็น % โดยน้ำหนัก

ประวัติผู้วิจัย

นางสุนันทา ทองทา

นางสุนันทา ทองทา เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2506 ณ จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วท.บ. (พัฒนาผลิตภัณฑ์) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2529 จบการศึกษาระดับปริญญาโท วท.ม. (วิทยาศาสตร์การอาหาร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2533 จากนั้นเข้ารับราชการบรรจุตำแหน่งอาจารย์ที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีเดียวกัน ต่อมาในปี พ.ศ. 2536 ได้รับทุน Fulbright จากมูลนิธิการศึกษาไทย-อเมริกัน ไปศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ที่ University Of Illinois at Urbana-Champaign สหรัฐอเมริกา และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2541

นางสุนันทา ทองทา ได้มีผลงานทางวิชาการดังต่อไปนี้

1. ผลงานตีพิมพ์ / การประชุมระดับชาติและนานาชาติ

- Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S.** 2009. Effect of extrusion parameters on starch digestion and physicochemical properties of Job's Tear (*Coix lacryma jobi* L.) flour. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2009. Physicochemical properties of waxy and high amylose rice flour during storage. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Kiatponglar, W. and **Tongta, S.** 2009. Comparative effect of different temperature cycling on resistant starch formation. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.** and Boonna, S. 2009. Physical modification of rice flour by extrusion. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.** and Kiatponglar, W. 2009. Impact of enzyme concentration and hydrolysis time on resistant starch formation. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.

- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2009. Physiochemical and textural properties of high amylose rice during storage. Poster presentation in Food Innovation Asia Conference 2009. June 18-19, 2009. BITEC, Bangkok, Thailand.
- Boonna, S., **Tongta, S.** and Piyachomkwan, K. Effect of aging condition on resistant starch formation of rice starch. Poster presentation in 2009 IFT Annual Meeting. June 6-9, 2009. Anaheim, CA, USA.
- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2008. Comparative study on physical properties of waxy and non-waxy rice during storage. Poster presentation in The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.
- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2008. Effect of starch content and aging temperature on slowly digestible starch and resistant starch formation in debranched rice starch. Oral presentation in The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.
- Apirattanasorn, S., **Tongta, S.**, Cui, S.W., and Wang, Q. 2008. Chemical, molecular, and structural characterization of alkali extractable polysaccharides from Job's Tears. *J. Agric. Food. Chem.* 56:8549-8557.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2008. Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 1(02):97-104.
- Phoungchandand, S., Bhulaidok, S., Nantachai, K., Woraphuttaporn, W., **Tongta, S.** and Suvannason, V. 2007. Influence of various cereal flours on physical properties of expanded extrudates. *Khon Kaen University Research Journal*. 12(4):431-441.
- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2007. Effect of drum drying parameters on physical properties of pregelatinized rice flour. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Kiatponglar, W. and **Tongta, S.** 2007. Structural and physical properties of enzyme-resistant starch produced from debranched and retrogradation of cassava starch. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Siriboon, B. and **Tongta, S.** 2007. Effect of annealing on physicochemical properties of waxy and normal rice starches. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.

- Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S.** 2007. Physicochemical and antioxidant properties of Job's Tear Flour. Poster presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2007. Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog. Oral presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Siriboon, B. and **Tongta, S.** 2007. Effect of Annealing on Physicochemical Properties of Waxy Rice. Poster presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Kiatponglar, W. and **Tongta, S.** 2007. Structural and Physical Properties of Debranched Tapioca Starch. Suranaree Journal of Science and Technology, 14(2):195-204.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2007. Effect of full fat soy flour on characteristics of soy protein meat analog. Suranaree Journal of Science and Technology, 14(2):185-193.
- Pakdeechanuan, P., Intarapichet, K. and **Tongta, S.** 2007. Effect of extrusion parameters on conjugated linoleic acids of corn extrudate. J. Agric. Food. Chem., 55: 1463-1468.
- Apirattananusorn, S., Cui, S.W., Wang, Q. and **Tongta, S.** 2006. Extraction and composition of water-unextractable arabinoxylans from Job's tears (*Coix lacryma-jobi* L.) (Abstract. pp. 238 and Poster presentation). 2006 CIFST/AAFC Joint Conference, May 28-30, 2006. Montreal, Canada.
- Kiatponglar, W. and **Tongta, S.** 2006. Effect of debranching on enzyme resistant starch formation in tapioca starch. Poster presentation in The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.**, Ningsanond, S. and Boonna, S. 2006. Influence of hydrocolloids and soy milk solid on physical and textural qualities of soy yoghurt. Poster presentation in The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.**, Kiatponglar, W. and K. Sriroth, K. 2004. Effect of aging temperature on retrogradation of concentrated cassava starch gel. In ' Starch: Progress in Structural studies, Modifications and Applications' Tomasik, P., Yuryev, V.P. and Bertoft, E. (eds.). pp. 357-364. Drukarnia GS, Cracow.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2004. Structure and texture characteristic of soy protein meat analog. Poster presentation The 6th Agro-Industrial Conference. May 28-29, 2004. Bangkok, Thailand.

Sottirattanapan, P. and **Tongta, S.** 2003. Effect of extrusion parameters on physical characteristics of rice extrudate. Suranaree Journal of Science and Technology. 10(3):220-229.

สถานที่ติดต่อ: สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ (044) 22-4266 โทรสาร (044) 22-4187

